

AGEVAP
**ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PARAÍBA DO SUL**

Serviço

Estudo de atualização do quadro de demandas hídricas e atualização dos balanços hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul

Relatório

Produto 4 – Balanço Hídrico da Bacia do Rio Paraíba do Sul

Revisão 2
Julho, 2025

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE QUADROS	5
LISTA DE SIGLAS	7
1. APRESENTAÇÃO	8
2. OBJETIVOS	9
3. ÁREA DE ABRANGÊNCIA DOS ESTUDOS E SISTEMATIZAÇÃO DA BASE ESPACIAL	11
4. CONTEXTUALIZAÇÃO E METODOLOGIA	14
4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PRODUTO	14
4.2. ESTUDOS ANTERIORES	17
4.2.1. RESULTADOS DA ETAPA ANTERIOR	17
4.2.2. ESTUDO DAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL – EDH-PS	17
4.2.3. ESTUDO DO ENQUADRAMENTO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL	20
4.3. METODOLOGIA DE BALANÇO HÍDRICO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS	22
4.3.1. Conceitos e apresentação	22
4.3.2. Cenários considerados	23
4.3.3. Definição do cenário de condição de escassez hídrica	25
4.3.4. Metodologia de cálculo do balanço hídrico	29
4.3.5. Balanço de outorgas	32
4.4. METODOLOGIA DE BALANÇO HÍDRICO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	33
5. BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL	35
5.1. CENA ATUAL	35
5.1.1. Análise dos resultados para a Bacia do Paraíba do Sul	35
5.1.2. Análise dos resultados por Unidade de Planejamento	43
5.1.3. Resultados do cenário de aplicação dos Critérios de Outorga	63
5.1.4. Cenário de escassez hídrica e priorização de usos	68
5.2. CENA FUTURA DE MAIOR PRESSÃO (2045)	74
6. BALANÇO HÍDRICO SUBTERRÂNEO	97
6.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA HIDROGEOLOGIA DA BACIA	97
6.2. RESULTADOS PARA A CENA ATUAL E CENA FUTURA	101

7. IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS COM MAIOR ÍNDICE DE COMPROMETIMENTO HÍDRICO.....	107
7.1. ÁGUAS SUPERFICIAIS	107
7.2. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	109
7.3. ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEO	110
7.4. INDICAÇÃO DE PROPOSTAS DE SOLUÇÕES PARA OS PROBLEMAS NAS ÁREAS PRIORITÁRIAS	114
7.5. AÇÕES EM EXECUÇÃO PELO PAP E POA.....	117
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
8.1. BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL	119
8.2. BALANÇO HÍDRICO SUBTERRÂNEO	121
9. REFERÊNCIAS	122
APÊNDICE A. BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL – CENA ATUAL	124
APÊNDICE B. BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL – CENA FUTURA DE MAIOR PRESSÃO (2045)	126

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3-1 – UNIDADES DE PLANEJAMENTO E PRINCIPAIS CURSOS D'ÁGUA	12
FIGURA 3-2 – DIVISÃO DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL EM SUB-BACIAS E UNIDADES DE PLANEJAMENTO	13
FIGURA 4-1 – FLUXOGRAMA DE PROCESSO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO	15
FIGURA 4-2 – FLUXOGRAMA COM AS ATIVIDADES PREVISTAS PARA SEREM EXECUTADAS NA ETAPA 5.....	16
FIGURA 4-3 – MODELAGEM DE QUALIDADE PARA DBO E VAZÃO DE REFERÊNCIA Q95	21
FIGURA 4-4 – MODELAGEM DE QUALIDADE PARA OXIGÊNIO DISSOLVIDO E VAZÃO DE REFERÊNCIA Q95	21
FIGURA 4-5 – MODELAGEM DE QUALIDADE PARA COLIFORMES TOTAIS E VAZÃO DE REFERÊNCIA Q95.....	22
FIGURA 4-6 – FLUXOGRAMA DO CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO	31
FIGURA 5-1 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO NA CENA ATUAL	39
FIGURA 5-2 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₀ , CENA ATUAL – BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL.....	40
FIGURA 5-3 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , CENA ATUAL – BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL.....	41
FIGURA 5-4 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q _{7,10} , CENA ATUAL – BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL.....	42
FIGURA 5-5 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , CENA ATUAL – UP ALTO PARAÍBA DO SUL	47
FIGURA 5-6 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q _{7,10} , CENA ATUAL – UP ALTO PARAÍBA DO SUL	48
FIGURA 5-7 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , CENA ATUAL – UP PRETO E PARAIBUNA.....	49
FIGURA 5-8 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q _{7,10} , CENA ATUAL – UP PRETO E PARAIBUNA.....	50
FIGURA 5-9 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , CENA ATUAL – UP POMBA E MURIAÉ	51
FIGURA 5-10 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q _{7,10} , CENA ATUAL – UP POMBA E MURIAÉ	52
FIGURA 5-11 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , CENA ATUAL – UP MÉDIO PARAÍBA DO SUL	54
FIGURA 5-12 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL, CENA ATUAL – Q ₉₅ – UP PIABANHA.....	55
FIGURA 5-13 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , CENA ATUAL – UP RIO DOIS RIOS	56
FIGURA 5-14 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , CENA ATUAL – UP BAIXO PARAÍBA DO SUL.....	57
FIGURA 5-15 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , CENA ATUAL – UP RIO PIRAI.....	59
FIGURA 5-16 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO PARA VAZÃO Q ₉₅ NA CENA ATUAL COM E SEM APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE OUTORGA.....	64
FIGURA 5-17 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO PARA VAZÃO Q _{7,10} NA CENA ATUAL COM E SEM APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE OUTORGA.....	64
FIGURA 5-18 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO PARA VAZÃO Q ₉₅ NA CENA ATUAL NO CENÁRIO DE ESCASSEZ	68
FIGURA 5-19 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO PARA VAZÃO Q _{7,10} NA CENA ATUAL NO CENÁRIO DE ESCASSEZ	69
FIGURA 5-20 – NÚMERO DE OTTOBACIAS ACIMA DE 75% DE COMPROMETIMENTO NOS CENÁRIOS DE ESCASSEZ E DE PRIORIZAÇÃO DE USOS, VAZÃO DE REFERÊNCIA Q ₉₅ , ANUAL.....	71

FIGURA 5-21 – NÚMERO DE OTTOBACIAS ACIMA DE 75% DE COMPROMETIMENTO NOS CENÁRIOS DE ESCASSEZ E DE PRIORIZAÇÃO DE USOS, VAZÃO DE REFERÊNCIA $Q_{7,10}$, ANUAL.....	72
FIGURA 5-22 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, Q_{90} – CENÁRIO ATUAL E DE MAIOR PRESSÃO (2045)	75
FIGURA 5-23 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, Q_{95} – CENÁRIO ATUAL E DE MAIOR PRESSÃO (2045)	76
FIGURA 5-24 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, $Q_{7,10}$ – CENÁRIO ATUAL E DE MAIOR PRESSÃO (2045)	76
FIGURA 5-25 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q_{95} , CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) – UP ALTO PARAÍBA DO SUL.....	81
FIGURA 5-26 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – $Q_{7,10}$, CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) – UP ALTO PARAÍBA DO SUL.....	82
FIGURA 5-27 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q_{95} , CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) – UP PRETO E PARAIBUNA.....	83
FIGURA 5-28 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – $Q_{7,10}$, CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) – UP PRETO E PARAIBUNA.....	84
FIGURA 5-29 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q_{95} , CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) – UP POMBA E MURIAÉ	85
FIGURA 5-30 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – $Q_{7,10}$, CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) – UP POMBA E MURIAÉ	86
FIGURA 5-31 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q_{95} , CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) – UP MÉDIO PARAÍBA DO SUL.....	87
FIGURA 5-32 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q_{95} , CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) – UP PIABANHA.....	88
FIGURA 5-33 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q_{95} , CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) – UP RIO DOIS RIOS	89
FIGURA 5-34 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q_{95} , CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) – UP BAIXO PARAÍBA DO SUL.....	90
FIGURA 5-35 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q_{95} , CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) – UP RIO PIRAÍ.....	91
FIGURA 6-1 – DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL E SUA PRODUTIVIDADE	100
FIGURA 6-2 – DEMANDA HÍDRICA SUBTERRÂNEA – CENA ATUAL.....	103
FIGURA 6-3 – DEMANDA HÍDRICA SUBTERRÂNEA – CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045).....	103

LISTA DE QUADROS

QUADRO 3-1 – ÁREAS DE ABRANGÊNCIA DAS UNIDADES DE PLANEJAMENTO.	11
QUADRO 4-1 – ÍNDICES UTILIZADOS PARA A ANÁLISE DE BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL	23
QUADRO 4-2 – REGRAS DE OUTORGA CONSIDERADAS EM CADA ESTADO E EM RIOS DE DOMÍNIO DA UNIÃO.	25
QUADRO 4-3 – RESUMO DOS CENÁRIOS CONSIDERADOS NO BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL.....	25
QUADRO 4-4 – COMPARAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA HISTÓRICA (1978 A 2020) E DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO PERÍODO CRÍTICO (2014 A 2020) PARA DIFERENTES PONTOS DA BHPS.	27
QUADRO 4-5 – ÍNDICES UTILIZADOS PARA A ANÁLISE DE BALANÇO HÍDRICO SUBTERRÂNEO	34
QUADRO 5-1 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO (Q_{90}) NA CENA ATUAL	36
QUADRO 5-2 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO (Q_{95}) NA CENA ATUAL	36
QUADRO 5-3 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO ($Q_{7,10}$) NA CENA ATUAL	37
QUADRO 5-4 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, NA CENA ATUAL, POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO, Q_{90}	44
QUADRO 5-5 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, NA CENA ATUAL, POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO, Q_{95}	44
QUADRO 5-6 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, NA CENA ATUAL, POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO, $Q_{7,10}$	45
QUADRO 5-7 – ANÁLISE DE RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL DA CENA ATUAL INTEGRADA À DISPONIBILIDADE HÍDRICA (VAZÃO DE REFERÊNCIA Q_{95})	60
QUADRO 5-8 – ANÁLISE DE RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL DA CENA ATUAL INTEGRADA À DISPONIBILIDADE HÍDRICA (UPS COM VAZÃO DE REFERÊNCIA $Q_{7,10}$)	62
QUADRO 5-9 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO – CENA ATUAL COM E SEM CRITÉRIO DE OUTORGA – POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO, VAZÃO DE REFERÊNCIA Q_{95}	66
QUADRO 5-10 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO – CENA ATUAL COM E SEM CRITÉRIO DE OUTORGA – POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO, VAZÃO DE REFERÊNCIA $Q_{7,10}$	67
QUADRO 5-11 – SETORES COM REDUÇÕES DE DEMANDA NO CENÁRIO DE PRIORIZAÇÃO, PARA AS VAZÕES Q_{95} E $Q_{7,10}$	70
QUADRO 5-12 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO – CENÁRIO DE ESCASSEZ COM E SEM PRIORIZAÇÃO DE USOS – POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO, Q_{95}	73
QUADRO 5-13 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO – CENÁRIO DE ESCASSEZ COM E SEM PRIORIZAÇÃO DE USOS – POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO, $Q_{7,10}$	73
QUADRO 5-14 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, Q_{95} - CENÁRIO ATUAL E DE MAIOR PRESSÃO (2045) – POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO	79
QUADRO 5-15 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, $Q_{7,10}$ - CENÁRIO ATUAL E DE MAIOR PRESSÃO (2045) – POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO.....	80
QUADRO 5-16 – ANÁLISE DE RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL INTEGRADA À DISPONIBILIDADE HÍDRICA, PARA O CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO 2045 (VAZÃO DE REFERÊNCIA Q_{95}).....	94
QUADRO 5-17 – ANÁLISE DE RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL INTEGRADA À DISPONIBILIDADE HÍDRICA, PARA O CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO 2045 (UPS COM VAZÃO DE REFERÊNCIA $Q_{7,10}$).	96

QUADRO 6-1 – RESUMO DAS DEMANDAS HÍDRICAS SUBTERRÂNEAS, POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO, NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL CONSIDERANDO A CENA ATUAL E O CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045).	102
QUADRO 6-2 – DEMANDAS SUBTERRÂNEAS EM RELAÇÃO ÀS RESERVAS EXPLOTÁVEIS – CENA ATUAL.....	104
QUADRO 6-3 – DEMANDAS SUBTERRÂNEAS EM RELAÇÃO ÀS RESERVAS EXPLOTÁVEIS – CENÁRIO FUTURO DE MAIOR PRESSÃO (2025)	105
QUADRO 7-1 – ÍNDICES UTILIZADOS PARA A ANÁLISE DE BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL E DE BALANÇO HÍDRICO SUBTERRÂNEO	111
QUADRO 7-2 – ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS DE BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL E DE BALANÇO HÍDRICO SUBTERRÂNEO, CONSIDERANDO A CENA ATUAL, POR SUB-BACIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL.....	112
QUADRO 7-3 – ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS DE BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL E DE BALANÇO HÍDRICO SUBTERRÂNEO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL	113
QUADRO 9-1 – LISTAGEM DOS MAPAS COM RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL NA CENA ATUAL .	124
QUADRO 9-2 – LISTAGEM DOS MAPAS COM RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL NA CENA FUTURA	126

LISTA DE SIGLAS

AGEVAP – Associação Pró-Gestão das Águas do Rio Paraíba do Sul

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

BHPS – Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul

BHO – Base Hidrográfica Ottocodificada

CEIVAP – Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica (atual SP Águas)

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

EDH-PS – Estudo das Disponibilidades Hídricas da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul

GTEE – Grupo de Trabalho dos Estudos Estratégicos

ICH – Índice de Comprometimento Hídrico

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INEA – Instituto Estadual do Ambiente

PAP – Plano de Aplicação Plurianual

PCJ – Piracicaba, Capivari e Jundiaí

PERH-SP – Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo

PIRH-PS – Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul

POA – Plano de Execução Orçamentária Anual

SIGA-CEIVAP – Sistema de Informações Geográficas e Ambientais da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul

UHEs – Usinas Hidrelétricas

UP – Unidade de Planejamento

1. APRESENTAÇÃO

Este documento técnico consiste no quinto produto do estudo em desenvolvimento para a Associação Pró-Gestão das Águas do Rio Paraíba do Sul – AGEVAP com vistas à atualização do quadro de demandas hídricas e dos balanços hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul.

O estudo vem sendo elaborado no contexto do contrato nº 071/2023 assinado entre a AGEVAP e o Consórcio NIPPON KOEI LAC – REGEA – RHAMA. Nesse sentido, este produto apresenta os resultados do trabalho de construção do quadro das demandas hídricas da bacia do rio Paraíba do Sul atual e futuro. Para isso, o presente documento é estruturado nos seguintes capítulos:

- ✓ Capítulo 1 – Apresentação: apresenta a estrutura do documento;
- ✓ Capítulo 2 – Objetivos: apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos a serem atingidos com o desenvolvimento do estudo;
- ✓ Capítulo 3 – Área de abrangência dos estudos: apresenta a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, como área de abrangência do trabalho em desenvolvimento;
- ✓ Capítulo 4 – Metodologia de processo: apresenta o caminho previsto para a execução do trabalho, envolvendo todas as etapas de estudo, bem como contextualiza os resultados obtidos na etapa anterior (Produto 3) e em outros estudos utilizados como base para o balanço hídrico;
- ✓ Capítulo 5 – Balanço Hídrico Superficial: apresenta os resultados do balanço hídrico superficial para a cena atual e cenas futuras;
- ✓ Capítulo 6 – Balanço Hídrico Subterrâneo: apresenta os resultados do balanço hídrico superficial para a cena atual e cenas futuras;
- ✓ Capítulo 7 – Identificação das áreas com maior índice de comprometimento hídrico;
- ✓ Capítulo 8 – Considerações finais: apresenta alguns comentários sobre os trabalhos realizados e próximos passos no sentido do atendimento aos objetivos do trabalho; e
- ✓ Capítulo 9 – Referências.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente estudo trata da atualização do quadro de demandas e do balanço hídrico na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Para isso, várias atividades vêm sendo desenvolvidas, como será apresentado mais adiante no capítulo de metodologia.

Este produto trata especificamente do balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, realizado a partir dos resultados das estimativas de demandas realizadas nas etapas anteriores do presente estudo, em cotejo com a base de disponibilidade hídrica advinda do Estudo das Disponibilidades Hídricas na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul – EDH-PS.

Podem ser destacados, na sequência, alguns objetivos específicos e que serão atendidos no contexto desse produto:

- Realizar o balanço hídrico atual e futuro de águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul;
- Sistematizar os resultados do balanço de águas superficiais para diferentes vazões de referência de acordo com as bases de disponibilidade hídrica obtidas do EDH-PS;
- Realizar o balanço hídrico atual e futuro de águas subterrâneas da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul.

De acordo com o previsto no termo de referência de contratação do presente estudo, foram indicadas algumas prerrogativas para esta etapa, podendo ser destacados alguns pontos:

- O produto 6 do presente estudo (Avaliação do Impacto Econômico e Social e do Impacto das Mudanças Climáticas no Balanço Hídrico) trata do aspecto Mudanças Climáticas e, portanto, atenderá aos itens sobre avaliação do impacto de mudanças climáticas no balanço hídrico (previsto nas prerrogativas r e m);
- No que se refere à questão relacionada à mobilização e divulgação dos trabalhos junto aos setores usuários, atores chave e representações setoriais, foi realizada e concluída em etapa anterior do trabalho, inclusive com a realização de eventos de mobilização e discussão em oficinas setoriais, o que atende à prerrogativa m prevista no termo de referência;
- No contexto do balanço hídrico de águas superficiais, a análise quanto aos aspectos de qualidade está sendo realizada no estudo de Enquadramento dos Corpos de Água em Classes para a bacia do rio Paraíba do Sul, em paralelo ao presente trabalho. Assim, considerando que a modelagem de qualidade das águas está sendo feita no estudo em questão, foram disponibilizadas as informações referentes às demandas pelo uso da água para que a outra empresa possa desenvolver tais análises em sua

modelagem qualitativa e foram recebidas as informações referentes ao quantitativo dos lançamentos de efluentes. Assim, conforme apresentado e acordado com o próprio Grupo de Trabalho dos Estudos Estratégicos – GTEE em reunião realizada em 21/03/2025, as análises do presente estudo considerarão as informações de quantidade dos lançamentos de efluentes advindas do outro estudo ora em curso, sendo que a modelagem de qualidade da bacia já está sendo realizada no referido estudo e, com isso, não faria sentido dois estudos desenvolvendo as mesmas avaliações e com as mesmas informações;

- No que se refere às diretrizes, foi prevista a análise das vazões de referência $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{90} anuais, mensais, bimestrais e trimestrais, para os horizontes de curto, médio e longo prazos: 5, 10, 15 e 20 anos. No entanto, considerando que tais análises gerariam um excessivo número de mapas e resultados a serem apresentados, foi discutido e acordado a partir da mesma reunião do GTEE de 21/03/2025 que todas as análises estarão disponíveis no modelo elaborado, possibilitando que seja possível verificar qualquer dos resultados de interesse, mas, para apresentação no presente relatório, será mostrada uma parte dos resultados de forma a possibilitar as análises quanto ao entendimento da condição da bacia e pontos de criticidade hídrica. No presente relatório será dado enfoque nas análises das vazões de referência $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{90} anuais e mensais na cena atual e na cena futura de maior pressão em seu horizonte de 20 anos. Tais resultados possibilitam a avaliação da situação atual da bacia hidrográfica e o prognóstico no cenário futuro mais crítico, permitindo a tomada de decisão em pontos estratégicos.

3. ÁREA DE ABRANGÊNCIA DOS ESTUDOS E SISTEMATIZAÇÃO DA BASE ESPACIAL

Conforme já exposto nas etapas anteriores e no termo de referência de desenvolvimento deste estudo, a área de abrangência trata da totalidade da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, envolvendo a bacia como um todo e suas Unidades de Planejamento e Gestão, de acordo com o Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul – PIRH-PS e conforme exposto no Quadro 3-1.

A Figura 3-1 espacializa as Unidades de Planejamento no contexto da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e apresenta a localização dos três estados que a bacia faz parte (Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo).

Quadro 3-1 – Áreas de abrangência das Unidades de Planejamento.

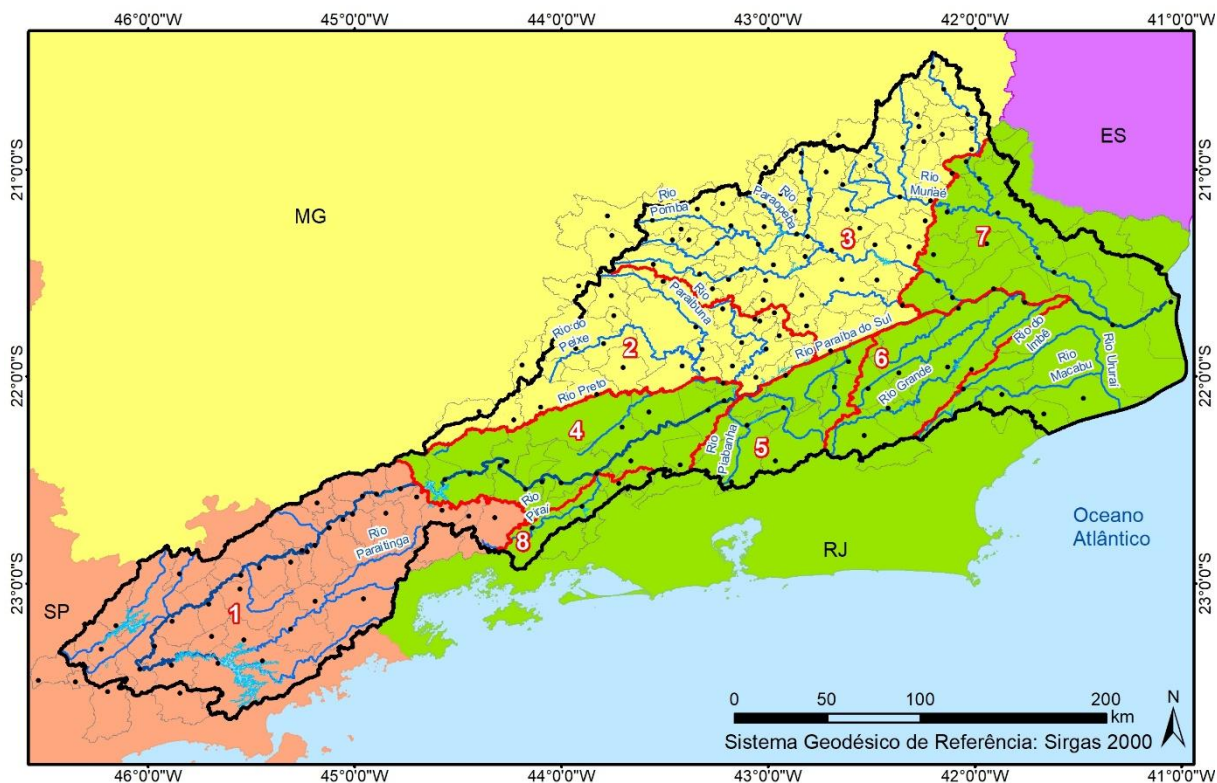
Nº	Nome	Área (km²)	% da bacia do rio Paraíba do Sul	Unidade da Federação
1	Paraíba do Sul – Trecho Paulista	13.944,01	22,6%	SP
2	Preto Paraibuna	7.185,99	11,7%	MG
3	Pomba e Muriaé	13.537,26	22,0%	MG
4	Médio Paraíba do Sul	6.429,06	10,4%	RJ
5	Piabanha	3.459,19	5,6%	RJ
6	Rio Dois Rios	4.462,38	7,3%	RJ
7	Baixo Paraíba do Sul	11.509,60	18,7%	RJ
8	Sub-bacia do Rio Pirai	1.017,90	1,7%	RJ

Fonte: PIRH-PS, 2021.

Além da divisão em Unidades de Planejamento, o Estudo das Disponibilidades Hídricas na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul – EDH-PS adota a divisão por sub-bacia afluente e Ottobacias. A Figura 3-2 apresenta a localização das 13 sub-bacias que compõem a bacia do rio Paraíba do Sul, sendo elas: Alto Vale do Rio Paraíba do Sul, Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul, Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul, Rio Carangola, Rio Dois Rios, Rio Muriaé, Rio Paraibuna, Rio Piabanha, Rio Pirai, Rio Pomba e Rio Preto.

Assim, destaca-se que as informações de balanço hídrico a serem apresentadas no presente relatório são espacializadas por ottobacias / microbacias (trechos de rio), ou seja, na discretização dos estudos de disponibilidade hídrica. Dessa forma, os resultados podem ser analisados por trecho de rio ou por microbacia.

Figura 3-1 – Unidades de planejamento e principais cursos d'água.



Legenda

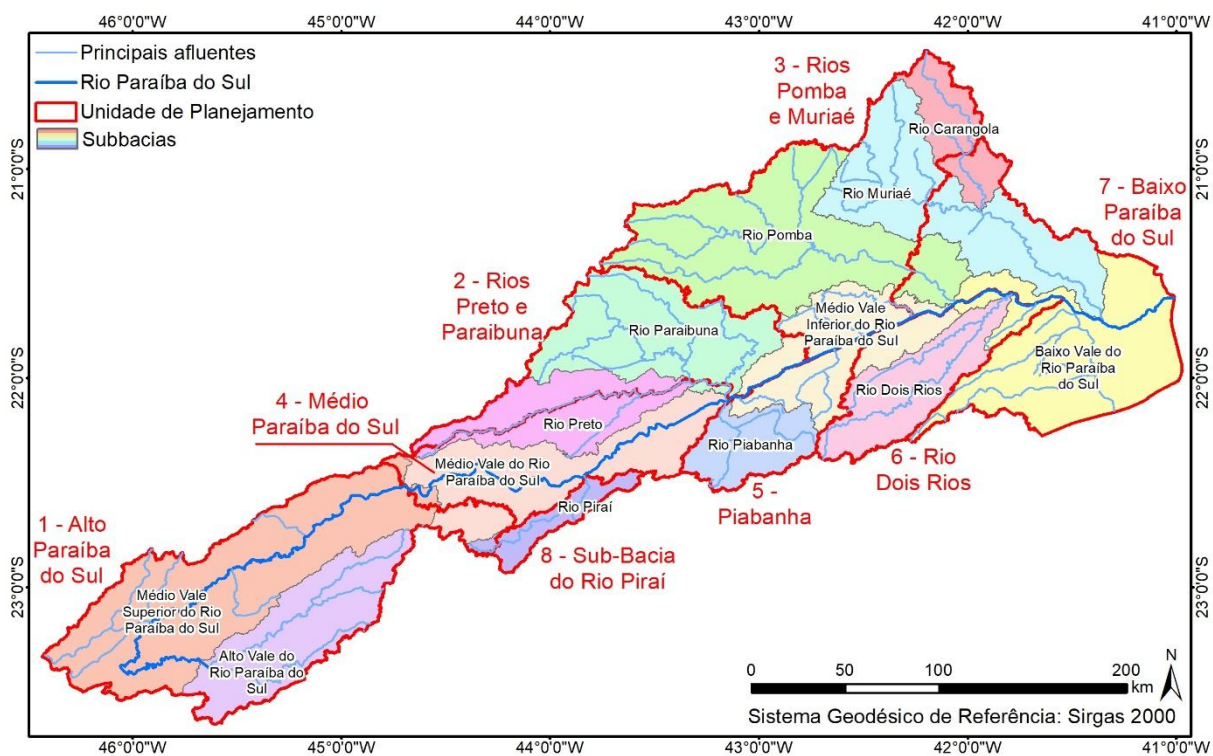
- Sede municipal
- Principais cursos d'água
- Rio Paraíba do Sul
- Principais massas d'água
- Limite municipal
- Unidade de Planejamento
- Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul

- Unidade da Federação**
- Espírito Santo
 - Minas Gerais
 - Rio de Janeiro
 - São Paulo

Código da Unidade de Planejamento	Comitê	Nome da Unidade de Planejamento	Unidade da Federação
1	CBH - Paraíba do Sul (SP)	Alto Paraíba do Sul	São Paulo
2	CBH - Preto Paraibuna	Rios Preto e Paraibuna	Minas Gerais
3	COMPÉ (MG)	Rios Pomba e Muriaé	Minas Gerais
4	CBH - Médio Paraíba do Sul	Médio Paraíba do Sul	Rio de Janeiro
5	Comitê Piabanha	Piabanha	Rio de Janeiro
6	CBH - Rio Dois Rios	Rio Dois Rios	Rio de Janeiro
7	CBH - Baixo Paraíba do Sul	Baixo Paraíba do Sul	Rio de Janeiro
8	Comitê Guandu (Sub-bacia do Rio Pirai)	Sub-Bacia do Rio Pirai	Rio de Janeiro

Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Figura 3-2 – Divisão da bacia do rio Paraíba do Sul em Sub-bacias e Unidades de Planejamento



Fonte: elaborado pelo Consórcio

4. CONTEXTUALIZAÇÃO E METODOLOGIA

4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PRODUTO

Conforme vem sendo exposto ao longo do desenvolvimento do trabalho, este estudo tem um total de oito etapas, tendo iniciado com o planejamento do estudo e seguindo até a consolidação do relatório final e do banco de dados com as informações geradas e sistematizadas ao longo do estudo.

Para acompanhamento das etapas de desenvolvimento do estudo, foi construída a Figura 4-1 com o processo adotado envolvendo o caminho previsto, destacando, em verde, as etapas já concluídas, incluindo a relacionada ao presente produto.

De uma forma geral, durante a Etapa 2 foram consultadas diversas bases de dados, envolvendo desde planos de recursos hídricos, estudos setoriais, bases de outorgas ou estudos de estimativas de usos consuntivos. Na sequência, a Etapa 3 realizou a mobilização e reuniões com representantes dos setores usuários, bem como a avaliação e definição das metodologias de estimativas de uso da água que deram suporte ao cálculo propriamente dito do quadro de demandas da Etapa 4.

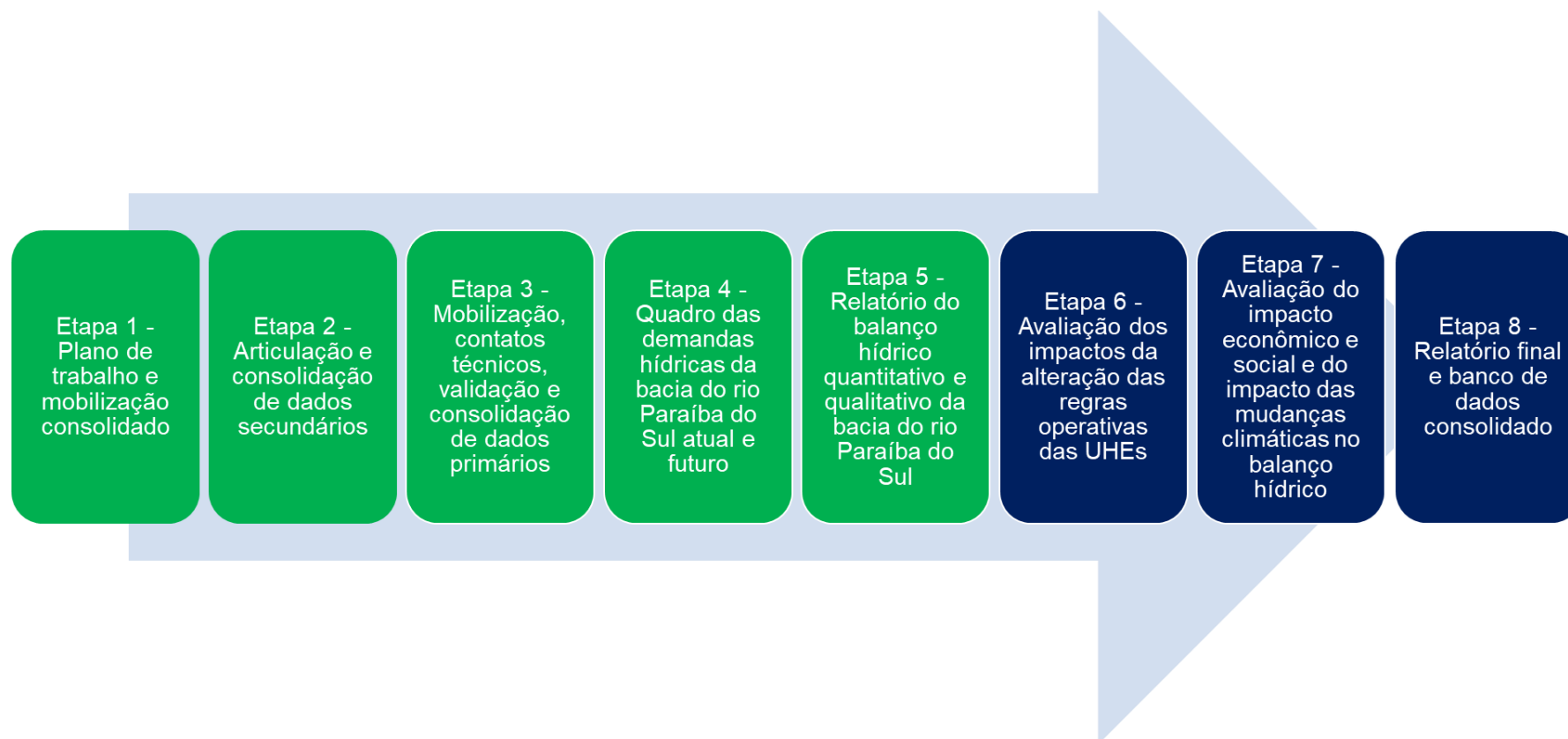
Assim, a Etapa 4 tratou da consolidação e apresentação das demandas por setor usuário e por unidade de planejamento para a cena atual e para cenas futuras, sendo estabelecidos no termo de referência os horizontes de 5, 10, 15 e 20 anos e cenários tendencial e de menor ou maior pressão.

Assim, seguindo o fluxograma apresentado na Figura 4-1, esta é a quinta etapa do trabalho, que trata do balanço hídrico propriamente dito, cotejando as demandas pelo uso da água com as disponibilidades hídricas, tanto no que se refere às águas superficiais quanto subterrâneas. Para o desenvolvimento dessa análise, o fluxograma com as principais atividades é apresentado na Figura 4-2, sendo detalhado na sequência.

Na sequência, as Etapas 6 e 7 tratarão de avaliações dos balanços hídricos a partir de impactos de mudanças climáticas, questões econômicas e sociais, bem como alterações de regras operativas de reservatórios de Usinas Hidrelétricas – UHEs.

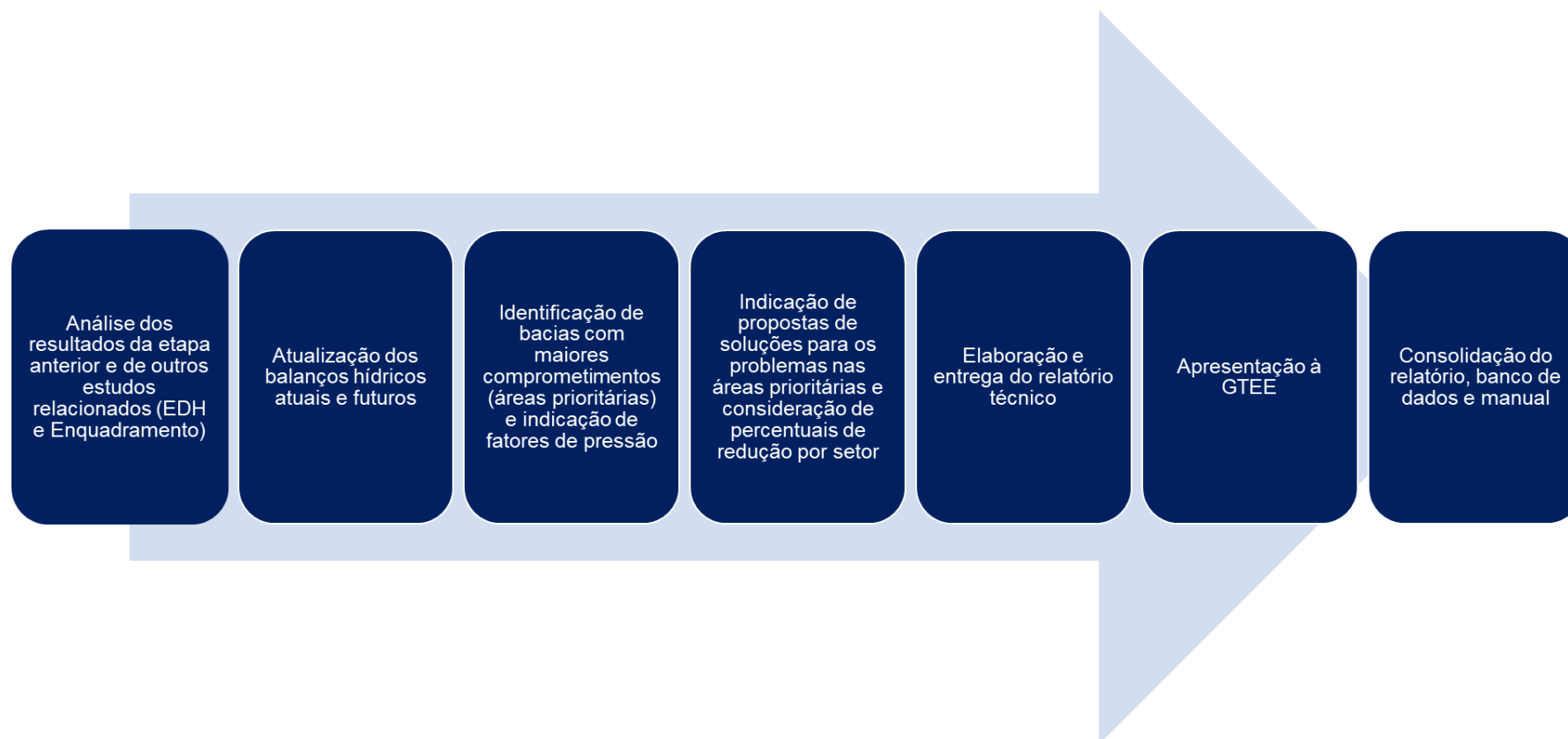
Concluindo-se os estudos da Etapa 7, tem-se a oitava e última etapa de trabalho, em que serão consolidados os resultados em um relatório final, assim como a base de dados também será integrada de forma completa.

Figura 4-1 – Fluxograma de processo para o desenvolvimento do estudo



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 4-2 – Fluxograma com as atividades previstas para serem executadas na Etapa 5



Fonte: elaborado pelo Consórcio

4.2. ESTUDOS ANTERIORES

4.2.1. RESULTADOS DA ETAPA ANTERIOR

No Produto 03 – Quadro de Demandas Hídricas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, foi realizada a atualização das demandas hídricas da bacia para a cota atual e suas projeções de curto, médio e longo prazo (5, 10, 15 e 20 anos). Além disso, foram adotadas três perspectivas: Cenário Tendencial (continuação das tendências passadas); Cenário de Maior Pressão (modificações nas tendências passadas que exacerbam a pressão sobre os recursos hídricos; e Cenário de Menor Pressão (modificações nas tendências passadas que atenuam a pressão sobre os recursos hídricos).

A identificação das demandas envolveu o levantamento dos setores usuários, assim como o tipo de uso da água: superficial ou subterrâneo. Dessa forma, foram identificados fatores essenciais para a gestão das águas, como a localização de regiões críticas, setores usuários de maior impacto e áreas sujeitas à estresses hídricos nos cenários futuros. Dentre os resultados obtidos, observa-se uma demanda hídrica na bacia de 75 m³/s (sem considerar as transposições), dentre os quais aproximadamente 62 m³/s são provenientes de fontes superficiais, enquanto os 13 m³/s restantes referem-se a captações de águas subterrâneas. Esses resultados serão utilizados como dados de entrada para o cálculo do balanço a ser realizado no presente estudo.

4.2.2. ESTUDO DAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL – EDH-PS

O Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (PIRH-PS), aprovado em 2021, identificou que uma das necessidades para o gerenciamento eficaz dos recursos hídricos é a compreensão da disponibilidade hídrica. Tais dados são essenciais, pois as outorgas de uso da água são derivadas destas informações, e por meio de tais dados os órgãos gestores tem a possibilidade de definir a alocação das águas, impactando toda a sociedade em termos de desenvolvimento econômico, limitando ou concedendo permissão para a instalação de novos empreendimentos.

Sendo assim, resultou do Programa de Ações do PIRH-PS a necessidade de refinamento das disponibilidades hídricas da BHPS, tendo como base os resultados obtidos no mesmo. Dessa forma, foi elaborado o Estudo das Disponibilidades Hídricas na Bacia Hidrográfica na Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul – EDH-PS (Profill, 2024). Os resultados de disponibilidades hídricas provenientes do EDH-PS foram utilizados como dados de entrada para os cálculos do balanço hídrico superficial realizado no presente estudo.

O método utilizado no estudo EDH-PS para gerar as disponibilidades hídricas da região foi o modelo chuva-vazão MGB. Ainda, para complementar a regionalização em trechos de rios pequenos, foi utilizado o método da vazão específica para transferência dos dados desde os rios maiores. Em resumo, para compatibilizar os resultados gerados pelo modelo MGB com a base hidrográfica BHO 6, o estudo realizou um tratamento de dados espacialmente, onde os resultados das minibacias do MGB foram transferidos para os 272.188 trechos de rio da base para cada uma das vazões de referência e suas variações temporais.

Os dados de disponibilidade hídrica foram gerados a partir de simulações considerando um período de 43 anos de dados (1978 a 2021), o que é considerado um período robusto e representativo para obtenção de vazões de referência. O estudo EDH-PS também avaliou separadamente um período crítico de disponibilidade hídrica da bacia (2015 a 2021). No entanto, para o cenário crítico as vazões estão disponíveis em um formato menos detalhado que o cenário histórico (apenas nos trechos de minibacias do MGB e não em otobacias da BHO). Ainda, a informação do cenário crítico é sobre as alterações (m^3/s) em relação às vazões do período histórico, e não com valores de disponibilidades hídricas. Essas questões impossibilitaram a utilização deste cenário crítico (2015 a 2021) no balanço hídrico do estudo atual. Ressalta-se, no entanto, que a disponibilidade hídrica utilizada no presente estudo foi obtida de uma série histórica que inclui este período crítico, pois é de 1978 a 2021, bem como foi gerado um cenário de condição de escassez (detalhado no Item 4.3.3).

As vazões de referência calculadas no EDH-PS e que foram utilizadas neste estudo são as seguintes: vazão mínima média de 7 dias de duração e 10 anos de período de retorno ($Q_{7,10}$), vazão média de longo termo (Q_{mlt}) e vazões que são igualadas ou superadas em 95% do tempo (Q_{95}) e em 90% do tempo (Q_{90}). Os cálculos foram aplicados nas vazões anuais, trimestrais, bimestrais e mensais (totalizando 23 diferentes sazonalidades). Em termos anuais, os resultados de disponibilidade hídrica demonstraram o seguinte:

- O cenário de vazão $Q_{7,10}$ foi o mais restritivo em termos de disponibilidade hídrica, com um valor de apenas $186 \text{ m}^3/\text{s}$ no exutório da bacia;
- O cenário de vazão Q_{95} apresenta pouca diferença do cenário $Q_{7,10}$ em diversos trechos, apresentando uma vazão de aproximadamente $241 \text{ m}^3/\text{s}$ no exutório da bacia;
- O cenário Q_{90} ainda é similar aos dois primeiros, mas apresenta uma vazão ligeiramente maior no exutório da bacia ($284 \text{ m}^3/\text{s}$);

Os grandes barramentos de água que causam impactos na disponibilidade hídrica da bacia e na dinâmica de fluxo, como os reservatórios Santa Branca, Jaguari, Funil, Santa Cecília, Furnas/Simplicio e Picada foram representados no modelo do estudo EDH-PS como

condições de contorno, ou seja, pontos do modelo onde as vazões foram substituídas por séries de vazões renaturalizadas.

Em relação às transposições, o modelo do estudo EDH-PS já considerou a incorporação das vazões transpostas nos barramentos que regularizam o rio Paraíba do Sul por meio de séries observadas de defluência dos seguintes reservatórios: Jaguari, Funil, Santa Cecília e Simplício/Furnas. A seguir é apresentado um resumo do que foi adotado no estudo EDH-PS em relação às transposições:

- Complexo de Lajes: o estudo considerou um valor constante de 119 m³/s, que é o patamar baixo para condições hidrológicas adversas no bombeamento do reservatório Santa Cecília (Decreto nº 81.436/78; Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1.382/2015);
- Reservatório Jaguari: o estudo considerou uma vazão média de 5,13 m³/s (CEIVAP, 2021) com valores somados às defluências do reservatório;
- Rio Macabu: tem uma vazão média de 5,4 m³/s (CEIVAP, 2021) no local onde é feita a transposição das vazões. No entanto, de acordo com o estudo EDH-PS, uma vez que o rio não é parte da BHPS e não existem dados de defluência no local onde ocorre a transposição, o estudo de disponibilidade hídrica não considerou os impactos dessa transposição no trecho de rio.

Destaca-se que esses valores de vazão das transposições consideradas no EDH-PS são representativos para a cena atual de demandas hídricas do presente estudo. Dessa forma, para os cenários futuros, onde há uma previsão de aumento das vazões transpostas, as mesmas foram inseridas no balanço hídrico como a diferença de vazão entre a cena atual e as cenas futuras.

Outro aspecto já contemplado nos resultados do EDH-PS é a evaporação líquida dos reservatórios atualmente existentes na bacia. O modelo chuva-vazão MGB, utilizado no estudo de disponibilidade hídrica, considera o balanço vertical de água no solo, incorporando variáveis como vegetação, clima e umidade do solo para a simulação das séries hidrológicas. Dessa forma, a evaporação dos reservatórios atualmente presentes na bacia já está incorporada na estimativa da disponibilidade hídrica. Contudo, nos cenários futuros de projeção de demandas hídricas, estão previstos novos reservatórios para contenção de cheias e novos aproveitamentos hidrelétricos na bacia. A evaporação associada a esses empreendimentos futuros foi inserida no balanço hídrico como uma demanda adicional, e não como um fator já embutido na disponibilidade hídrica — como ocorre na cena atual.

4.2.3. ESTUDO DO ENQUADRAMENTO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Os estudos necessários para a definição do enquadramento de corpos de água em classes de qualidade da BHPS estão atualmente na etapa técnico-propositiva, a qual correspondem à elaboração e complementação de subsídios técnicos, incluindo diagnóstico, prognóstico, bem como alternativas para o enquadramento e estimativas de custos para sua implementação. Estes estudos estão sendo desenvolvidos pela empresa Água e Solo e contam com o Produto 01 (Plano de Trabalho) e Produto 02 (Diagnóstico) já publicados e disponíveis para consulta pública em <https://www.ceivap.org.br/instrumentos-de-gestao/enquadramento> (CEIVAP, 2025).

O Produto 03 do estudo de enquadramento conta com a modelagem hidrológica de qualidade das águas para a bacia e ainda está em fase de desenvolvimento. Portanto, no presente relatório foram utilizadas as informações disponibilizadas pela AGEVAP até a Julho de 2025. Alterações ou complementações do estudo devem ser consultadas em <https://www.ceivap.org.br/instrumentos-de-gestao/enquadramento>.

Conforme Água e Solo (2025), a simulação da qualidade da água foi realizada com o uso do modelo matemático WARM-GIS, adotando um conjunto de soluções analíticas em regime permanente, utilizando modelos de transporte advectivo com reações cinéticas simplificadas. As simulações foram realizadas considerando os cenários para as vazões de referência Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ para os parâmetros: Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO, Oxigênio Dissolvido, Coliformes Totais, Fósforo Total, Nitrogênio Amoniacal, Nitrato e Manganês. Na sequência, são apresentados os principais resultados da modelagem em questão referente à qualidade da água na bacia, advindos do estudo em questão, cujo produto foi concluído na mesma época do presente relatório.

A Figura 4-3, a Figura 4-4 e a Figura 4-5, advindas de Água e Solo (2025), apresentam os resultados obtidos para a vazão Q_{95} e para os parâmetros DBO, Oxigênio Dissolvido e Coliformes Totais, respectivamente. No que se refere aos resultados para DBO (Figura 4-3), mostram que a maior parte da bacia encontra-se em condição compatível com a classe 2, mas o eixo principal do rio Paraíba do Sul se mostra compatível, principalmente, com a classe 1.

No caso da Figura 4-4, observa-se que a maior parte da bacia encontra-se compatível com a classe 1 para Oxigênio Dissolvido, sendo observados alguns afluentes, principalmente na porção mais alta da bacia em condições de classes 2 e 3.

Na sequência, a Figura 4-5 mostra os resultados de qualidade das águas para Coliformes Totais, sendo a maior parte da bacia compatível com a condição de classe 4, com concentrações superiores a 2500 NMP/L.

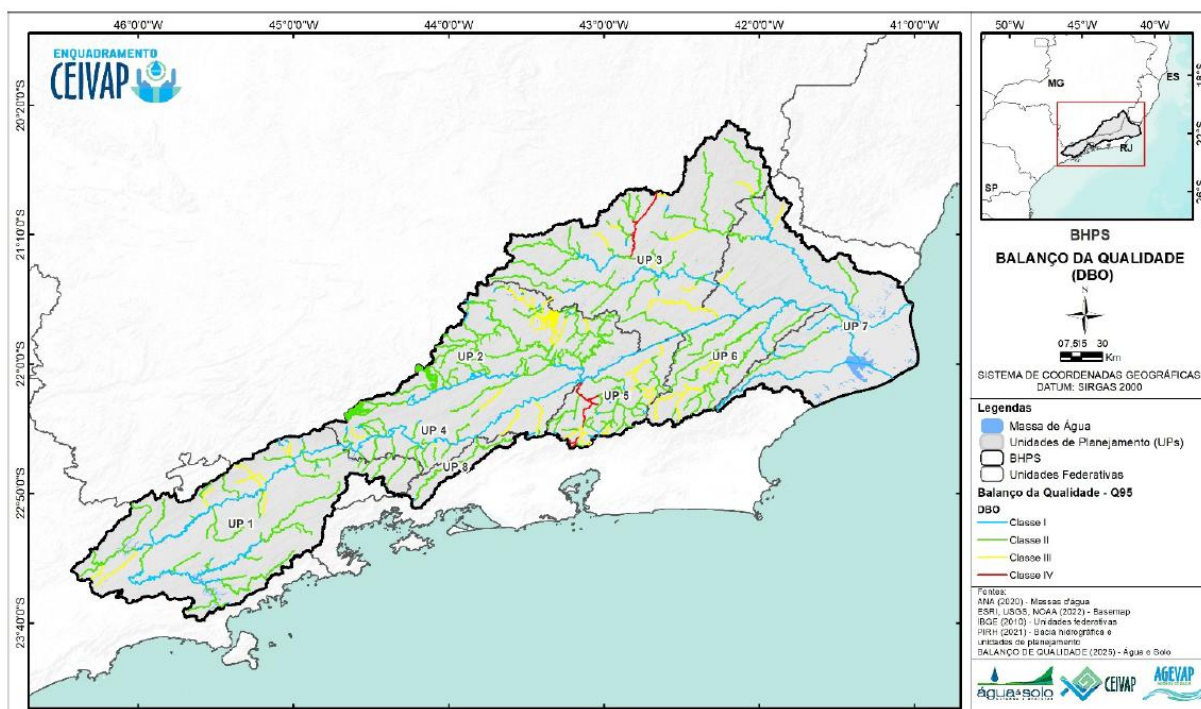


Figura 4-3 – Modelagem de qualidade para DBO e vazão de referência Q95
Fonte: Água e Solo (2025)

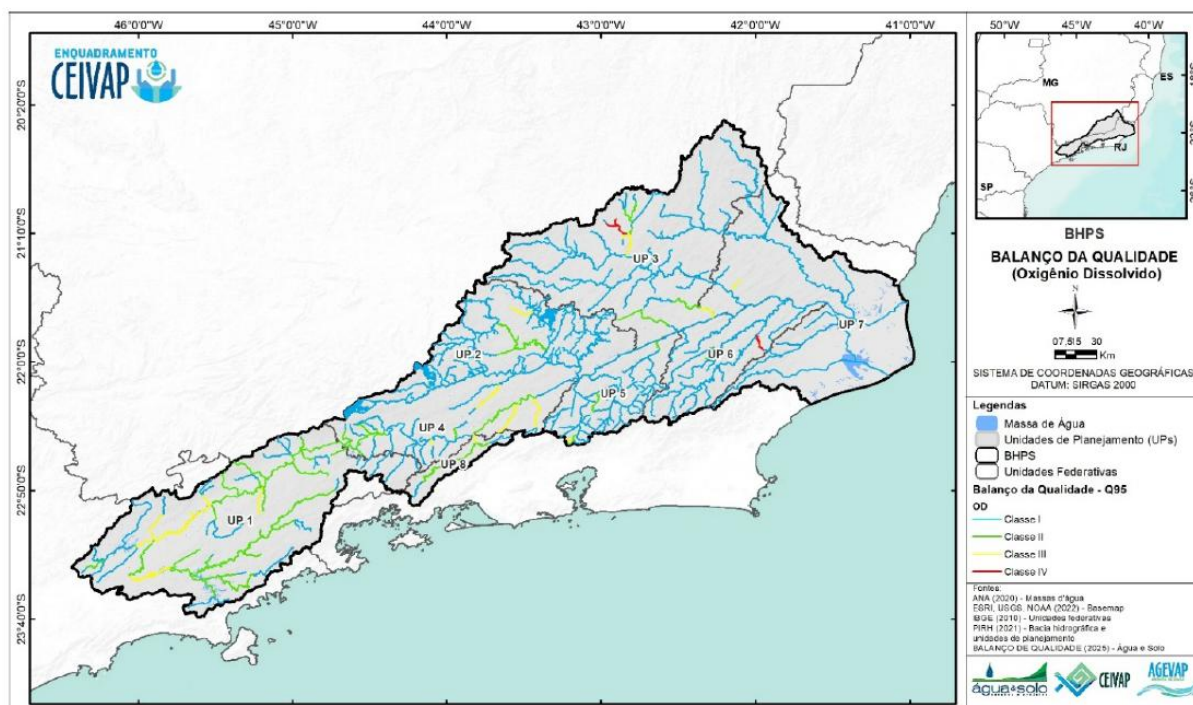


Figura 4-4 – Modelagem de qualidade para Oxigênio Dissolvido e vazão de referência Q95
Fonte: Água e Solo (2025)

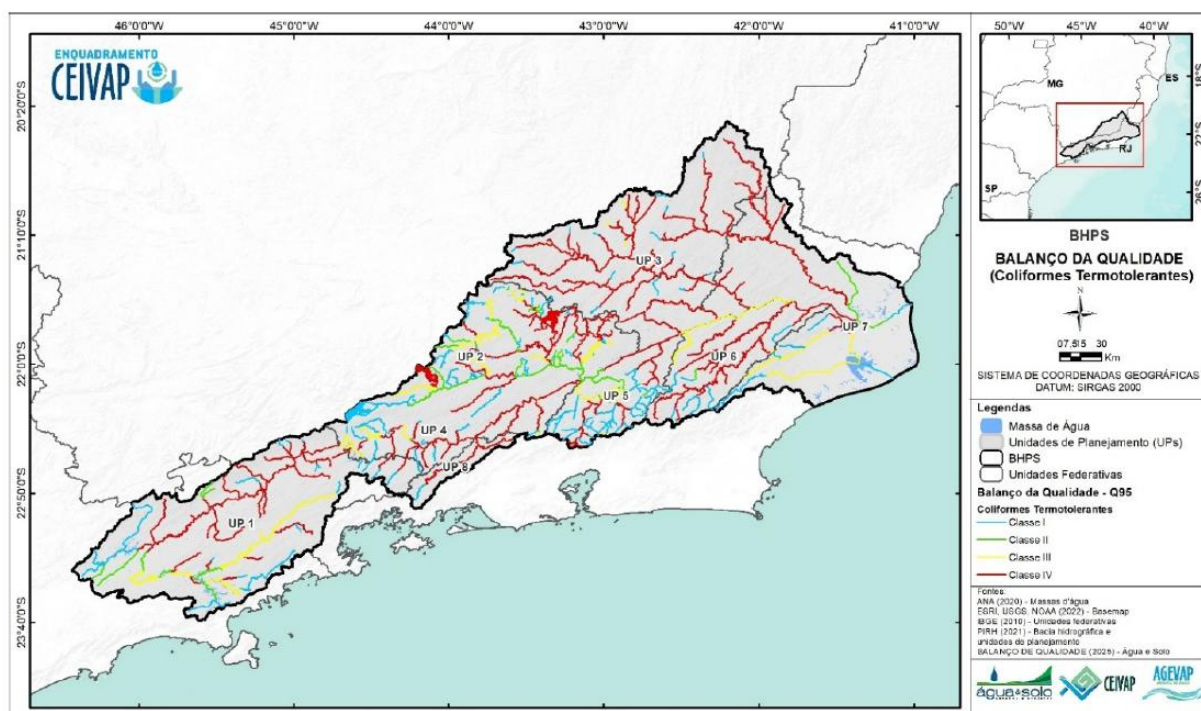


Figura 4-5 – Modelagem de qualidade para Coliformes Totais e vazão de referência Q95
Fonte: Água e Solo (2025)

4.3. METODOLOGIA DE BALANÇO HÍDRICO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS

4.3.1. Conceitos e apresentação

O balanço hídrico de uma bacia hidrográfica pode ser obtido por meio do cotejo entre as ofertas hídricas e demandas existentes em cada bacia hidrográfica. Para isso, foi utilizado o conceito de Índice de Comprometimento Hídrico – ICH em que é estimado o percentual comprometido da disponibilidade existente em cada bacia hidrográfica pela relação entre as demandas e a disponibilidade de cada vazão de referência, conforme a seguinte expressão.

$$I_{CH}^{Superficial} = \frac{Demandas\ Superficial}{Disponibilidade\ hídrica\ Superficial} \quad \text{Equação 1}$$

A partir da análise dos critérios em termos de vazões de referência e percentuais adotados usualmente, bem como da experiência técnica utilizada em avaliações semelhantes, foram utilizados diferentes percentuais relacionados aos níveis de comprometimento hídrico e que refletem boas condições hídricas, níveis de preocupação ou altos índices de criticidade. Tais índices são relevantes para dar suporte a proposições de ações de gerenciamento de recursos hídricos necessárias a dar maior segurança hídrica aos usuários existentes e potenciais em cada bacia hidrográfica.

Assim, apresenta-se o Quadro 4-1 com os índices adotados para a análise do ICH, considerando faixas intermediárias e que deram subsídio ao indicativo de áreas que precisam ações de gestão para a melhoria da segurança hídrica e para o atendimento aos usos da bacia. Nesse sentido, podem ser consideradas em condição de escassez as faixas “crítica” e “muito crítica” em que o percentual comprometido de demandas é superior a 75% das ofertas hídricas existentes.

Quadro 4-1 – Índices utilizados para a análise de balanço hídrico superficial

I_{CH} – Índice de Comprometimento Hídrico	Condição da bacia e ações de gestão indicadas
< 25%	Boa condição de disponibilidade; pouca atividade de gerenciamento é necessária, visando apenas a manutenção dos fatores contribuintes.
25 a 50%	Situação potencialmente preocupante, devendo ser desenvolvidas ações de gerenciamento para solução de problemas locais de abastecimento.
50 a 75%	Situação preocupante; a atividade de gerenciamento é indispensável, exigindo a realização de investimentos médios.
75% a 100%	Situação crítica, exigindo intensa atividade de gerenciamento e grandes investimentos.
> 100%	Situação muito crítica, em que atividades de gerenciamento e de investimentos e realocação de demandas são necessárias de forma urgente.

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Os resultados dos balanços hídricos realizados com diferentes vazões de referência e diferentes cenários foram comparados, de forma a verificar efeitos de possíveis alterações de critérios de outorga ou do crescimento futuro das demandas. Por fim, como resultado do apontamento das regiões de fragilidade hídrica, sob o ponto de vista do balanço hídrico, serão indicadas possíveis ações a serem desenvolvidas na bacia para a melhoria da criticidade hídrica, envolvendo recirculação de água ou reúso, por exemplo.

O balanço hídrico qualitativo será realizado com base nas informações advindas do estudo de enquadramento, destacando-se que a modelagem de qualidade e análise de condição atual já é prevista e deverá ser executada naquele estudo, além de cenários construídos em etapas propositivas de enquadramento.

4.3.2. Cenários considerados

O balanço hídrico superficial considerou as vazões de referência $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{90} anuais, mensais, bimestrais e trimestrais, tendo como resultado o comprometimento hídrico das bacias afluentes ao mesmo nível de detalhamento dos resultados das informações de

disponibilidade hídrica disponibilizadas pelo Estudo das Disponibilidades Hídricas na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul – EDH-PS (detalhado no Item 4.2.2). Todos esses resultados podem ser consultados no banco de dados do presente estudo, no entanto, em termos de relatório, será focada apenas a apresentação dos balanços hídricos anuais e mensais.

Em termos de demandas hídricas consideradas, para facilitar a sensibilidade e interpretação dos resultados, foram rodados apenas cenários considerando a cena atual de demandas hídricas e o cenário de maior pressão (cena futura com horizonte de 20 anos – 2045). Porém, os dados apresentados no banco de dados possibilitam a execução dos demais cenários e horizontes.

Adicionalmente, foram considerados cenários de critérios de outorga. Em Minas Gerais, de acordo com a Portaria IGAM no 48, de 04 de outubro de 2019, “a vazão de referência a ser utilizada para o cálculo das disponibilidades hídricas superficiais no Estado de Minas Gerais é a vazão mínima de sete dias de duração e dez anos de recorrência – $Q_{7,10}$ ” (IGAM, 2019). O mesmo ocorre com o estado de São Paulo, onde a Agência de Águas do Estado de São Paulo (SP Águas), que substituiu o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) emprega a $Q_{7,10}$ como base para concessão de outorgas (DAEE, 2017). Já para o estado do Rio de Janeiro, a vazão de referência utilizada é Q_{95} (INEA, 2018). Em rios de domínio da União, a vazão de referência estabelecida pela ANA é a Q_{95} . Ao aplicar um critério de outorga no balanço hídrico, trata-se de um cenário hipotético, dado que o valor outorgável limitará a retirada nas otobacias para atendimento do limite outorgável, mantendo a jusante o fluxo residual mínimo. O Quadro 4-2 resume os critérios de outorga de cada estado e dos rios federais.

No Quadro 4-3 é apresentado um resumo dos cenários considerados no balanço hídrico superficial. Constam no banco de dados um total de 188 resultados de balanço hídrico, considerando as diferentes vazões de referência, suas sazonalidades e variações das demandas hídricas. Destaca-se que se for de interesse rodar mais algum cenário de variação de demanda hídrica, ou algum outro critério de outorga de interesse, é possível utilizar o código disponibilizado em *Python* e o manual “Manual do Código de Balanço Hídrico” disponibilizado em conjunto a este documento.

Quadro 4-2 – Regras de outorga consideradas em cada estado e em rios de domínio da união.

Ato Legal	Órgão Gestor	Vazão de Referência	Vazão máxima outorgável
Portaria IGAM Nº 48, 09/2019	IGAM/MG	Q _{7,10}	50% da Q _{7,10}
Resolução INEA Nº 162, 12/2018	INEA/RJ	Q ₉₅	40% da Q ₉₅
Instrução Técnica DPO nº 12, 05/2017	SP Águas (Antigo DAEE)	Q _{7,10}	50% da Q _{7,10}
Nota Técnica Nº 75/2020/SPR	ANA – Águas de domínio da União	Q ₉₅	70% da Q ₉₅

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 4-3 – Resumo dos cenários considerados no balanço hídrico superficial.

Vazão de referência	Cenário de disponibilidade	Sazonalidade	Cenário de Demanda e Horizonte	Quantidade de Cenários
Q ₉₀	Período Histórico (1977-2021)	Anual, Mensal, Bimestral e Trimestral	Atual e Maior Pressão (20 anos)	46
Q ₉₅				46
Q _{7,10}				46
Q ₉₅ - Critério Outorga 40%			Atual	23
Q _{7,10} - Critério Outorga 50%				23
Q ₉₅	Condição de escassez hídrica	Anual	Atual	1
Q _{7,10}				1
Q ₉₅	Condição de escassez hídrica	Anual	Atual, priorização de usos	1
Q _{7,10}				1

Fonte: elaborado pelo Consórcio

4.3.3. Definição do cenário de condição de escassez hídrica

De acordo com o termo de referência, o presente estudo deve definir o que será considerado como “condição de escassez” e como utilizá-la para a realização de cenários de balanço hídrico, seja pela aplicação de um fator sobre as disponibilidades hídricas ou valores mais críticos do que as vazões de referência.

Desta forma, a definição da condição de escassez hídrica usada no balanço hídrico partiu da análise dos resultados de disponibilidades hídricas do período crítico (2015 a 2020) gerados pelo EDH-PS (Profill, 2024). Conforme mencionado anteriormente (Item 4.2.2), para o cenário crítico, os resultados do EDH-PS estão disponíveis em um formato menos detalhado que o cenário histórico (apenas nos trechos de minibacias do MGB e não em otobacias da BHO). Ainda, a informação do cenário crítico é sobre as alterações (m³/s) em relação às vazões do período histórico, e não com valores de disponibilidades hídricas. Essas questões impossibilitaram a utilização direta deste cenário crítico no balanço hídrico do estudo atual.

Como alternativa, portanto, foram analisados nos resultados do EDH-PS pontos importantes de entregas de vazões e trechos específicos do Rio Paraíba do Sul, comparando o período histórico e o período crítico. Os resultados obtidos (Quadro 4-4) mostram diferentes situações ao longo da bacia, onde as maiores alterações em volumes hídricos ocorrem no trecho final do Rio Paraíba do Sul após o reservatório de Furnas. Nos trechos imediatamente a jusante dos grandes reservatórios não são observadas grandes alterações, possivelmente em função do processo de regularização de vazões. Alguns afluentes importantes, como por exemplo o rio Piraí, também não demonstraram grande alteração. Isso evidencia que a situação crítica de 2014-2021 não ocorreu de forma generalizada na bacia.

Em linhas gerais, se observou que, em média na bacia do rio Paraíba do Sul, a redução da disponibilidade hídrica foi de 21 % para Q_{95} e 19,9 % para $Q_{7,10}$. Para o cenário de balanço hídrico em condições de escassez hídrica será considerada, portanto, uma redução uniforme de 20% na disponibilidade hídrica do período histórico. Este cenário representa uma condição de escassez generalizada em toda bacia, configurando um quadro conservador, útil ao planejamento e à gestão dos recursos hídricos.

Adicionalmente, o termo de referência define que os resultados obtidos com os balanços hídricos da bacia deverão permitir que, em condições de escassez e crise hídrica, seja possível avaliar cenários de priorização dos usos. Portanto, para a definição do cenário de priorização de usos, foi realizada uma seleção das otobacias inseridas nos cenários de escassez hídrica em situação crítica, especificamente aquelas enquadradas nas faixas de comprometimento entre 75% e 100%, bem como aquelas em déficit hídrico (acima de 100%) e aplicada uma hipótese de redução proporcional das demandas dos dois maiores setores de contribuição.

Quadro 4-4 – Comparação da disponibilidade hídrica histórica (1978 a 2020) e disponibilidade hídrica do período crítico (2014 a 2020) para diferentes pontos da BHPS.

Localização	Disponibilidade Hídrica (m³/s) do Período Histórico (1978-2020)		Disponibilidade Hídrica (m³/s) do Período Crítico (2014-2020)		% de diminuição na disponibilidade hídrica	
	Q ₉₅	Q _{7,10}	Q ₉₅	Q _{7,10}	Q ₉₅	Q _{7,10}
Defluência do reservatório Santa Branca	32,5	30,9	25,5	21,6	21,5%	30,1%
Rio Paraíba do Sul antes da entrega do Rio Jaguari	41,8	34,5	31,6	23,9	24,4%	30,7%
Entrega do Rio Jaguari	7,2	6,7	6,8	6,3	5,6%	6,0%
Rio Paraíba do Sul depois da entrega do Rio Jaguari	48,9	41,2	38,7	25,7	20,9%	37,6%
Rio Paraíba do Sul antes do Reservatório Funil	106,5	78,9	90,4	65,5	15,1%	17,0%
Rio Paraíba do Sul depois do Reservatório Funil	121,5	114,3	93,2	83,1	23,3%	27,3%
Rio Paraíba do Sul antes do Reservatório Santa Cecília	165,7	149,8	131	107,4	20,9%	28,3%
Rio Paraíba do Sul depois do Reservatório Santa Cecília	58,2	53,4	38,98	38,54	33,0%	27,8%
Entrega do Rio Piraí	10,8	7,5	10,2	7,4	5,6%	1,3%
Rio Paraíba do Sul depois da entrega do Rio Piraí	69	60,9	49,8	46	27,8%	24,5%
Rio Paraíba do Sul antes da entrega do Rio Paraibuna	71	61,8	49,2	44,4	30,7%	28,2%
Entrega do Rio Paraibuna	67	52,5	56,3	48,7	16,0%	7,2%
Rio Paraíba do Sul depois da entrega do Rio Paraibuna	138,1	114,4	110,37	79,36	20,1%	30,6%
Entrega do Rio Piabanha	12,6	9,5	9,9	8,6	21,4%	9,5%
Rio Paraíba do Sul depois da entrega do Rio Piabanha	150,6	123,8	124,1	89,8	17,6%	27,5%
Rio Paraíba do Sul depois do Reservatório Furnas	102,9	101,1	100,4	93,8	2,4%	7,2%
Rio Paraíba do Sul antes da entrega do Rio Pomba	169	136,7	127	102,9	24,9%	24,7%
Entrega do Rio Pomba	35,3	25,4	28,2	21,4	20,1%	15,7%
Rio Paraíba do Sul depois da entrega do Rio Pomba	204,3	162,1	155,1	133,1	24,1%	17,9%
Rio Paraíba do Sul antes da entrega do Rio Dois Rios	204,6	162,3	141,4	131,8	30,9%	18,8%
Entrega do Rio Dois Rios	13,8	10	10,9	8	21,0%	20,0%
Rio Paraíba do Sul depois da entrega do Rio Dois Rios	218,4	172,3	152	143,7	30,4%	16,6%

Localização	Disponibilidade Hídrica (m³/s) do Período Histórico (1978-2020)		Disponibilidade Hídrica (m³/s) do Período Crítico (2014-2020)		% de diminuição na disponibilidade hídrica	
	Q ₉₅	Q _{7,10}	Q ₉₅	Q _{7,10}	Q ₉₅	Q _{7,10}
Rio Paraíba do Sul antes da entrega do Rio Muriaé	218,9	172,6	173,6	154,2	20,7%	10,7%
Entrega do Rio Muriaé	21,8	13,3	17,1	9,8	21,6%	26,3%
Rio Paraíba do Sul depois da entrega do Rio Muriaé	240,7	185,9	190,3	178,2	20,9%	4,1%
Foz do Rio Paraíba do Sul	241,2	186,3	179,8	148,1	25,5%	20,5%
Alteração média					21,0%	19,9%

Fonte: elaboração própria a partir de Profill (2024)

4.3.4. Metodologia de cálculo do balanço hídrico

A estimativa do balanço hídrico de águas superficiais na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul foi conduzida por meio de *script* computacional desenvolvido na linguagem *Python*. O algoritmo de balanço hídrico quantitativo foi desenvolvido com base no conceito de “ottobacias”, concebido pelo Eng. Otto Pfafstetter. Cada unidade de ottobacia foi associada aos seus respectivos dados de demanda, volume de retorno, vazões remanescentes dos trechos a montante e incrementos de vazão nos limites da própria ottobacia em análise. Essa abordagem permite calcular o balanço hídrico de cada trecho codificado do rio dentro da bacia hidrográfica. O cálculo é realizado a partir da seleção das ottobacias a montante do trecho em questão, aplicando-se o somatório das vazões remanescentes desses trechos, acrescido da produção local de vazão, subtraídas as demandas e somados os retornos.

O procedimento envolveu a análise de 272.149 ottobacias, para as quais foram atribuídos os seguintes conjuntos de dados: disponibilidade hídrica, com base no Estudo de Disponibilidade Hídrica do Paraíba do Sul – *EDH-PS* (Profill, 2024, item 4.2.2); demanda hídrica, conforme o Estudo de Demandas da Bacia Hidrográfica – *EDBH-PS*, Produto 3 (item 4.2.1); e valores de lançamento de efluentes nos corpos hídricos, conforme o Estudo de Enquadramento das Águas da Bacia do Paraíba do Sul (Água e Solo, 2025, item 4.2.3).

Existem dois tipos de variáveis utilizadas para o cálculo do balanço hídrico:

- Variáveis provenientes das ottobacias de montante
 - Qmn: soma das vazões naturais (Q_{nat}) das bacias a montante (proveniente do arquivo de disponibilidade);
 - Qmr: soma das vazões de saída (Q_{out}) das bacias a montante;
 - Qmd: soma dos déficits acumulados (Q_{defacm}) nas bacias a montante.
- Variáveis próprias de cada ottobacia
 - Q_{nat} = Vazão natural em cada ottobacia (proveniente do arquivo de disponibilidade);
 - Q_{wit} = Vazão de retirada por ottobacia (proveniente do arquivo de retiradas);
 - Q_{eff} = Vazão de efluentes lançados por ottobacia (proveniente do arquivo de efluentes);
 - Q_{cat} = Vazão incremental;
 - Q_{natres} = Vazão disponível em cada ottobacia;
 - Q_{out} = Vazão de saída de cada ottobacia;
 - Q_{def} = Déficit observado na ottobacia;

- Q_{defacm} = Déficit acumulado até a ottobacia (déficit acumulado a montante somado ao déficit local);
- Q_{witacm} = Vazão de retirada acumulada até a ottobacia (retiradas acumuladas a montante somadas à retirada local);
- W_{bal} = Balanço hídrico.

O cálculo do balanço hídrico e suas etapas são apresentados no fluxograma na Figura 4-6 e serão explicitados a seguir. Deve-se levar em consideração que o cálculo é feito de montante para jusante, visando à propagação de vazões na bacia hidrográfica em uma situação próxima da realidade.

Inicialmente, é feita uma verificação para identificar se a ottobacia em questão é de cabeceira ou não:

- Se sim, os valores das variáveis Q_{mn} , Q_{mr} e Q_{md} são definidos como zero, já que tais variáveis são provenientes das ottobacias a montante (sendo uma ottobacia de cabeceira, não existem ottobacias a montante).
- Se não, serão calculadas as variáveis Q_{mn} , Q_{mr} e Q_{md} .

Após isso, é feito o cálculo da vazão incremental da ottobacia (Q_{cat}), e é feita uma verificação para identificar se o trecho está localizado após o barramento de um reservatório. Em locais de reservatório, o estudo de disponibilidades hídricas EDH-PS (Profill, 2024) inseriu as vazões após o barramento como vazões substituídas (provenientes de séries de vazão defluente dos reservatórios), enquanto nos demais trechos são vazões simuladas. Dessa forma, para o presente estudo, o cálculo dos parâmetros de balanço hídrico nestes locais foi realizado:

- Se não for reservatório, são calculados os parâmetros Q_{out} e Q_{natres} , conforme o fluxograma da Figura 4-6.
- Se for reservatório, o cálculo das vazões Q_{out} e Q_{natres} é diferente, tendo em vista que o reservatório afeta a regularização de vazões no trecho. Desta forma, a Q_{natres} será igual a Q_{nat} , que neste caso é a vazão substituída.

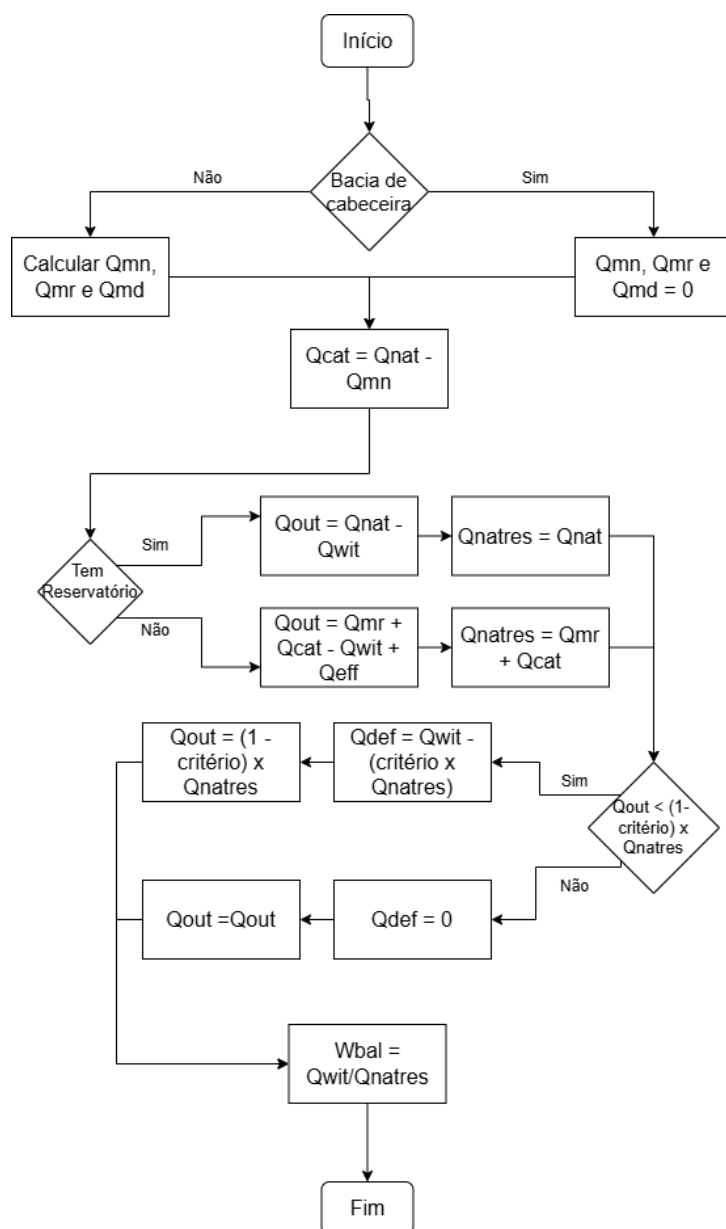


Figura 4-6 – Fluxograma do cálculo do balanço hídrico

Fonte: elaborado pelo Consórcio

O passo seguinte é a verificação do valor da vazão de saída de cada ottobacia. É possível a simulação de cenários referentes aos critérios de outorga de uso de recursos hídricos (no fluxograma, identificado como “critério”). Essa é uma situação **hipotética**, na qual os usuários limitariam sua retirada a uma porcentagem definida da vazão disponível (para um critério de outorga de 40%, por exemplo, as retiradas na ottobacia devem ser no máximo de 40% da disponibilidade, ocasionando a manutenção de uma vazão de saída de no mínimo 60% da disponibilidade). Para a simulação **sem** critérios de outorga, o parâmetro “critério” adotado é igual a 1.

- Se a vazão de saída for menor do que a expressão do fluxograma (0, para a simulação sem critérios de outorga, e 60% da Qnates para um critério de outorga de 40%), há o cálculo do déficit hídrico daquela bacia e é recalculada a vazão de saída:
 - Sem critérios de outorga a vazão de saída torna-se 0, tendo em vista que não é possível uma vazão de saída negativa (retirar mais água do que há disponível).
 - Com critério de outorga, considera-se que foi retirado o máximo possível da disponibilidade daquela ottobacia, resultando na saída definida pela expressão do fluxograma.
- Se a vazão de saída for maior do que a expressão do fluxograma, não há déficit, e o valor continua igual.

Os resultados obtidos para o balanço hídrico constituem uma base que possibilita a identificação de áreas prioritárias para intervenção em gestão de recursos hídricos, com vistas tanto à mitigação de déficits existentes quanto à prevenção de situações críticas projetadas em cenários futuros. Essa abordagem permite subsidiar estratégias de alocação de recursos e planejamento de ações no âmbito da gestão integrada da bacia.

4.3.5. Balanço de outorgas

De forma complementar, conforme exposto anteriormente, foi efetuado um balanço hídrico considerando as metodologias de outorga utilizadas por cada órgão gestor de recursos hídricos. Nesse sentido, trata-se de um balanço específico em que cada trecho de curso de água tem a limitação legal estabelecida pelos critérios legais de outorgas. Dessa forma, a vazão disponível em cada trecho se refere ao valor de vazão disponível, descontando-se a vazão remanescente mínima que deve ser mantida a jusante.

Esse balanço foi desenvolvido de forma a possibilitar a comparação com o balanço hídrico usual obtido por meio do ICH, o que permitirá também mostrar trechos mais críticos de disponibilidade para atendimento às demandas hídricas da bacia.

4.4. METODOLOGIA DE BALANÇO HÍDRICO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O conhecimento da demanda por água subterrânea é de fundamental importância para a gestão dos recursos hídricos, pois reflete a pressão direta sobre a disponibilidade hídrica subterrânea, podendo evidenciar situações críticas ou de conflito. Avaliar a intensidade e a tendência da demanda é um subsídio para gerenciar o balanço entre a demanda e a disponibilidade de água, sendo estes os principais dados de entrada para a realização do balanço subterrâneo.

A disponibilidade subterrânea é calculada através da estimativa do volume de água que está disponível para consumo sem comprometimento das reservas totais, ou seja, a partir da reserva explorável. Não foi prevista no presente estudo a realização de estudos detalhados de estimativas de disponibilidades hídricas subterrâneas. Com isso, foi realizado o levantamento de outros estudos já existentes e feita a sistematização de acordo com as melhores informações disponíveis. Também foi realizada uma análise de metodologias de estimativa de disponibilidade hídrica.

A metodologia adotada para estimativa da reserva explorável de água subterrânea no presente estudo segue a proposta do DAEE utilizada no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (PERH, 2024 - 2027), a qual também é adotada em estudos paulistas como, por exemplo, o Relatório de Situação dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (Comitê das Bacias PCJ, 2015). Esta metodologia, descrita no roteiro para elaboração de relatórios de situação segundo a deliberação do Conselho Estadual de Recursos Hídricos de São Paulo – CRH-SP nº 146/2012 (CRH, 2020), considera que a reserva explorável subterrânea pode ser obtida pela diferença entre a vazão com 95% de permanência (Q_{95}) e a vazão mínima de 7 dias com período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$). Essa abordagem aplica-se a aquíferos livres, desconsiderando os aquíferos confinados.

A disponibilidade hídrica subterrânea foi estimada, portanto, a partir da metodologia mencionada utilizando informações de disponibilidade hídrica anual ($Q_{7,10}$ e Q_{95}) fornecidas pelo Estudo das Disponibilidades Hídricas na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul – EDH-PS (Profill, 2024).

As demandas hídricas consideradas foram obtidas do Estudo de Demandas da Bacia Hidrográfica – EDBH-PS, Produto 3 (item 4.2.1), sendo que demanda subterrânea total corresponde à soma das demandas para todos os tipos de uso. Para facilitar a sensibilidade e interpretação dos resultados, foram explorados cenários considerando apenas a cena atual e o cenário de maior pressão (cena futura com horizonte de 20 anos – 2045).

Para fins de análise do balanço entre oferta e demanda (Equação 2) foram aplicadas as faixas de comprometimento hídrico apresentadas no Quadro 4-5, que está de acordo com o estabelecido por CRH (2020). São consideradas em condição de escassez as faixas “crítica” e “muito crítica” em que o percentual comprometido de demandas é superior a 50% das ofertas hídricas existentes. A discretização dos resultados é feita por Sub-bacia.

$$Balanço = \frac{Demanda\ Subterrânea}{Q_{95} - Q_{7,10}} \quad \text{Equação 2}$$

Quadro 4-5 – Índices utilizados para a análise de balanço hídrico subterrâneo

Demanda subterrânea em relação às reservas explotáveis	Classificação
< 5%	Boa condição de disponibilidade; pouca atividade de gerenciamento é necessária.
5 a 30%	Situação potencialmente preocupante, devendo ser desenvolvidas ações de gerenciamento para solução de problemas locais.
30 a 50%	Situação preocupante; a atividade de gerenciamento é indispensável, exigindo a realização de investimentos médios.
50 a 100%	Situação crítica, exigindo intensa atividade de gerenciamento e grandes investimentos.
> 100%	Situação muito crítica, em que atividades de gerenciamento e de investimentos e realocação de demandas são necessárias de forma urgente.

Fonte: elaborado pelo Consórcio

5. BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL

A realização das simulações permitiu a análise comparativa do balanço hídrico da cena atual utilizando as vazões de referências, através da apresentação do percentual de ottobacias classificadas em cinco diferentes faixas percentuais da relação demanda x disponibilidades hídricas: ottobacias com demandas menores do que 25% das disponibilidades; ottobacias com demandas entre 25% e 50% das disponibilidades; ottobacias com demandas maiores do que 50% e menores do que 75% das disponibilidades; ottobacias com demandas entre 75% a 100% das disponibilidades e ottobacias com demandas superiores a 100% das disponibilidades. Considera-se que demandas menores que 25% da disponibilidade hídrica não representam impactos significativos no balanço hídrico. Contudo, trechos de rios e ottobacias que apresentam demandas que necessitam de volumes maiores ou iguais a 50% da disponibilidade hídrica existente, correm risco de não atendimento. Aquelas ottobacias ou trechos de rio que apresentam demandas acima de 75% da disponibilidade podem ser consideradas como em situação crítica.

O Item 5.1 a seguir apresenta os resultados de balanço hídrico para a cena atual e o Item 5.1.4 para a cena futura de maior pressão – 2045. O APÊNDICE A e o APÊNDICE B apresentam os mapas do balanço hídrico para a bacia do rio Paraíba do Sul considerando a cena atual e futura, respectivamente.

5.1. CENA ATUAL

5.1.1. Análise dos resultados para a Bacia do Paraíba do Sul

A seguir, no Quadro 5-1, Quadro 5-2 e Quadro 5-3 são apresentados os percentuais de ottobacias por classe de comprometimento hídrico, com base nas vazões de referência Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$, respectivamente, ao longo dos diferentes períodos analisados. Considerando que o ano hidrológico adotado no EDH-PS (Profill, 2024) compreende o intervalo de dezembro de um ano a novembro do ano seguinte, observa-se, para todas as vazões, uma menor incidência de criticidade nos meses chuvosos, especialmente de janeiro a abril.

Em contraste, o período entre maio e novembro concentra os maiores percentuais de ottobacias em condição crítica, com destaque recorrente para o mês de novembro. Esse comportamento se deve, em geral, ao final do período de estiagem, antes do início das chuvas, resultando em vazões mínimas e baixas disponibilidades (Profill, 2024). Ressalta-se, ainda, a sensibilidade particular das análises baseadas na Q_{95} , que apresentaram o maior percentual de ottobacias em déficit hídrico em novembro, atingindo 1,45% (equivalente a 3.952 ottobacias), valor ligeiramente superior ao registrado para $Q_{7,10}$ no mesmo mês (1,42%).

Quadro 5-1 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico (Q₉₀) na cena atual

Faixas de Balanço Hídrico (Q ₉₀)	% de ottobacias por sazonalidade												
	Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	97,65%	99,26%	99,44%	99,22%	99,21%	98,70%	98,12%	97,84%	97,37%	96,77%	96,24%	96,54%	97,97%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	1,15%	0,34%	0,23%	0,36%	0,38%	0,54%	0,78%	1,03%	1,24%	1,69%	2,00%	1,66%	1,06%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,17%	0,07%	0,09%	0,15%	0,12%	0,12%	0,15%	0,21%	0,40%	0,45%	0,46%	0,45%	0,22%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,07%	0,06%	0,07%	0,11%	0,08%	0,08%	0,04%	0,06%	0,08%	0,17%	0,26%	0,25%	0,07%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,95%	0,27%	0,16%	0,16%	0,21%	0,56%	0,91%	0,86%	0,90%	0,91%	1,04%	1,10%	0,67%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 5-2 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico (Q₉₅) na cena atual

Faixas de Balanço Hídrico (Q ₉₅)	% de ottobacias por sazonalidade												
	Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	96,99%	98,58%	98,81%	98,55%	98,54%	97,85%	97,30%	97,37%	96,73%	95,10%	94,75%	94,99%	97,28%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	1,46%	0,83%	0,55%	0,68%	0,72%	0,99%	1,31%	1,24%	1,70%	2,78%	2,87%	2,70%	1,32%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,53%	0,09%	0,16%	0,19%	0,12%	0,23%	0,24%	0,40%	0,41%	0,61%	0,78%	0,65%	0,35%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,11%	0,06%	0,07%	0,09%	0,09%	0,09%	0,11%	0,08%	0,27%	0,28%	0,25%	0,21%	0,13%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,91%	0,44%	0,40%	0,49%	0,53%	0,86%	1,04%	0,91%	0,90%	1,22%	1,35%	1,45%	0,93%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 5-3 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico (Q_{7,10}) na cena atual

Faixas de Balanço Hídrico (Q _{7,10})	% de ottobacias por sazonalidade												
	Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	93,37%	98,51%	98,49%	98,29%	98,49%	97,89%	97,38%	97,36%	96,63%	95,52%	94,73%	95,01%	96,92%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	3,53%	0,86%	0,67%	0,76%	0,73%	0,95%	1,18%	1,21%	1,72%	2,40%	2,81%	2,63%	1,66%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,99%	0,15%	0,17%	0,16%	0,16%	0,16%	0,23%	0,38%	0,53%	0,65%	0,81%	0,66%	0,46%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,40%	0,07%	0,09%	0,09%	0,05%	0,08%	0,09%	0,08%	0,16%	0,26%	0,22%	0,28%	0,08%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	1,71%	0,41%	0,58%	0,69%	0,56%	0,92%	1,11%	0,96%	0,96%	1,16%	1,42%	1,42%	0,88%

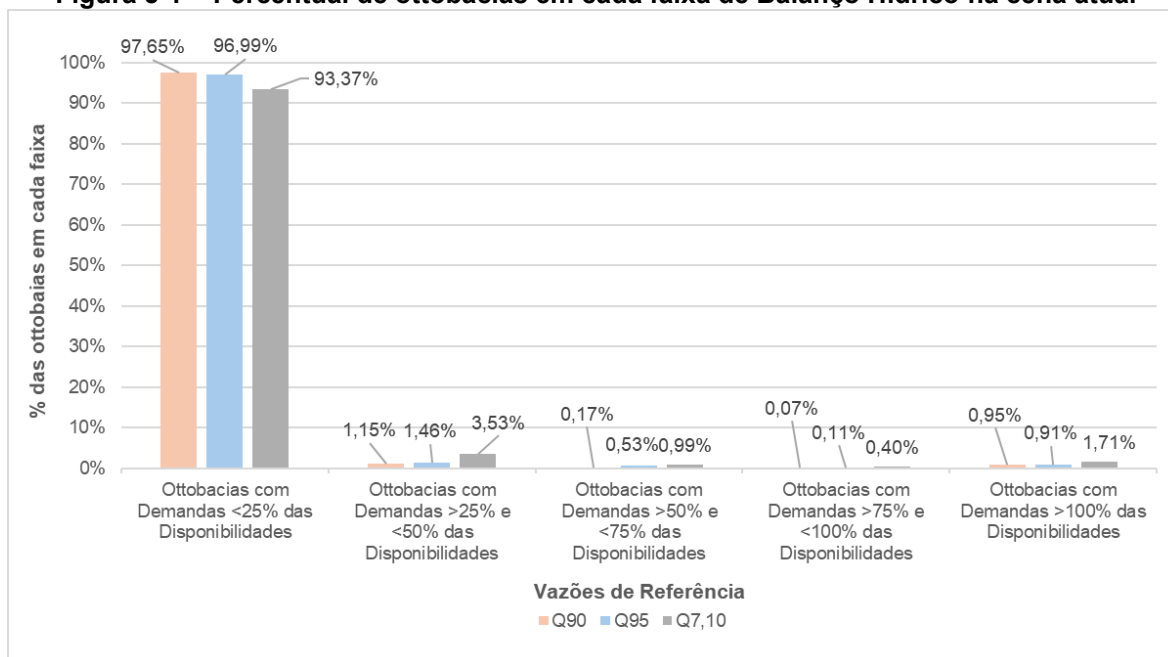
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Embora as análises mensais sejam fundamentais para captar a resposta dinâmica da bacia frente à variabilidade sazonal do regime hidrológico, a avaliação baseada nas vazões anuais proporciona uma visão consolidada e estratégica sobre o grau de comprometimento hídrico na bacia. A Figura 5-1 apresenta a comparação entre os resultados de balanço hídrico anual obtidos para as três vazões anuais de referência.

Ao se considerar a bacia hidrográfica como um todo, observa-se um predomínio de ottobacias com baixo nível de comprometimento hídrico. Em todos os casos, mais de 90% das ottobacias encontram-se na faixa de comprometimento de 0 a 25%, evidenciando um cenário geral de conforto hídrico. De forma geral, esse resultado reforça a capacidade da bacia, em termos médios anuais, de atender às demandas atuais com relativa folga.

Dentre as vazões de referência, a $Q_{7,10}$ apresenta o maior nível de criticidade relativa, com 93,37% das ottobacias ainda na faixa inicial, mas uma maior proporção em faixas intermediárias e críticas em comparação às demais. Destaca-se principalmente a faixa de déficit hídrico, que atinge 1,71% das ottobacias, o maior valor entre as vazões analisadas. Apesar de aparentemente modesto em termos percentuais, esse valor representa, em números absolutos, 4.664 ottobacias em situação de déficit hídrico, configurando áreas com potencial risco de escassez e conflitos de uso, especialmente em períodos de estiagem prolongada. Tais regiões devem ser consideradas prioritárias em ações de monitoramento, otimização das demandas, alocação de água e planejamento de intervenções estruturais e não estruturais com foco na segurança hídrica e na sustentabilidade dos usos múltiplos da água.

Figura 5-1 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico na cena atual



Fonte: elaborado pelo Consórcio

A seguir, a Figura 5-2, Figura 5-3 e Figura 5-4 apresentam os resultados espacializados de balanço hídrico anual para as vazões Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10}, respectivamente. Nota-se que as regiões com altos índices de comprometimento possuem pouca variação entre as diferentes vazões de referência, alterando basicamente sua intensidade e extensão. Tais resultados serão explorados a nível de Unidade de Planejamento no item 5.1.2.

Figura 5-2 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₀, Cena Atual – Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul

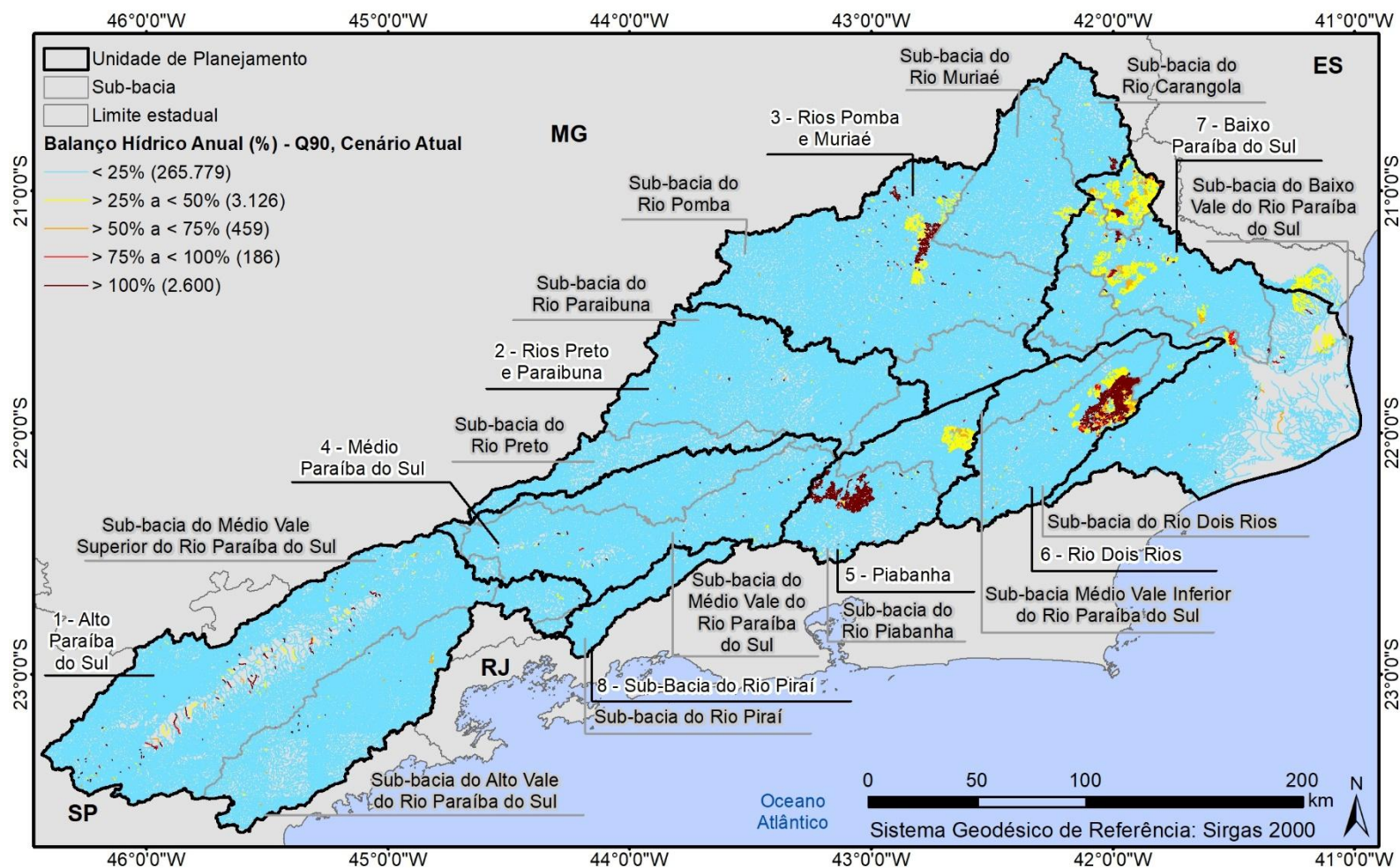


Figura 5-3 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, Cena Atual – Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul

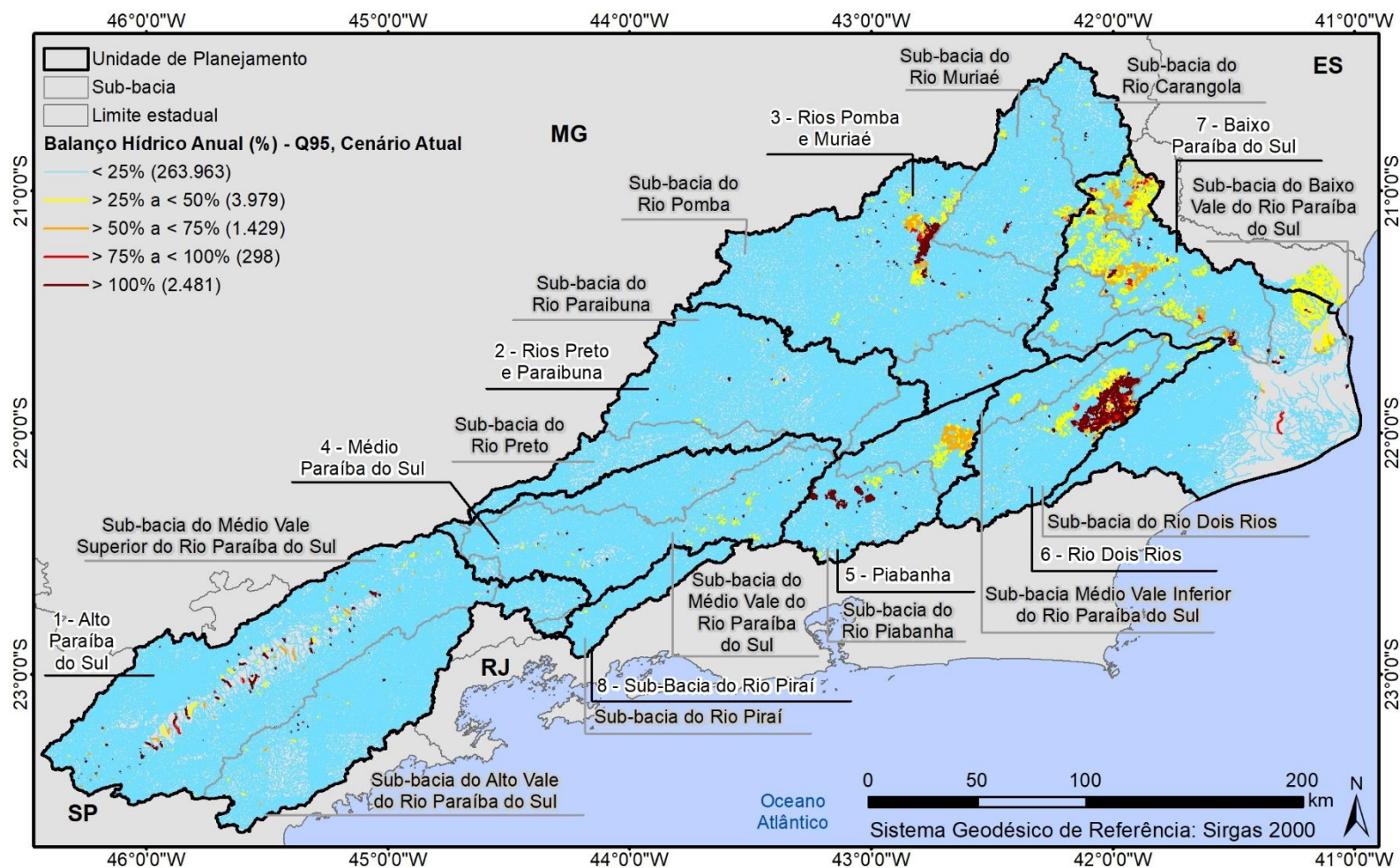
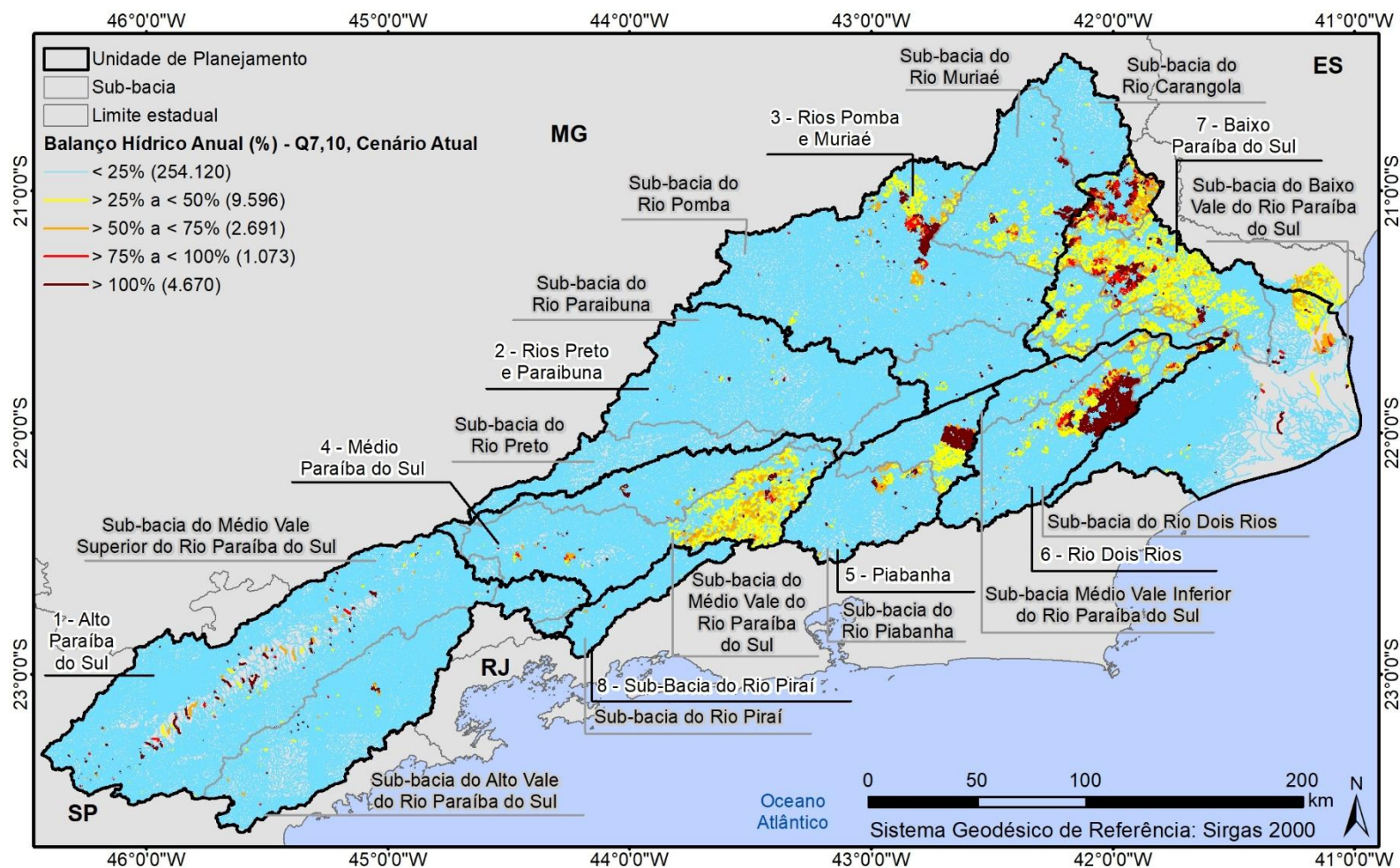


Figura 5-4 – Balanço Hídrico Superficial Anual – $Q_{7,10}$, Cena Atual – Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul



5.1.2. Análise dos resultados por Unidade de Planejamento

A desagregação dos resultados do balanço hídrico anual por Unidade de Planejamento (UP) permite identificar padrões espaciais relevantes, essenciais para o direcionamento de ações específicas de gestão. O Quadro 5-4, Quadro 5-5 e Quadro 5-6 apresentam a distribuição percentual das ottobacias por classes de comprometimento hídrico, com base nas vazões de referência Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$, respectivamente, para cada Unidade de Planejamento. De forma geral, para as vazões Q_{90} e Q_{95} a maioria das UPs apresenta acima de 90% de ottobacias com demandas inferiores a 25% das disponibilidades, indicando uma cena geral de baixa pressão hídrica. Já para a $Q_{7,10}$ há um aumento considerável na criticidade das ottobacias, o que é esperado, já que se trata de uma vazão indicativa de um cenário de maior escassez hídrica.

Observa-se que os percentuais de comprometimento hídrico das ottobacias apresentam certa estabilidade entre as Unidades de Planejamento (UPs) nas diferentes vazões de referência, com variações geralmente discretas nos níveis de criticidade. No entanto, algumas UPs se destacam por oscilações mais expressivas: no Médio Paraíba do Sul, por exemplo, a proporção de ottobacias com comprometimento inferior a 25% — indicativo de baixa pressão hídrica — cai de aproximadamente 99% nos cenários de Q_{90} e Q_{95} para 90,93% na $Q_{7,10}$, revelando um avanço das faixas intermediárias de criticidade; na UP do Piabanha, observa-se um comportamento flutuante nas ottobacias em déficit hídrico (>100% de comprometimento): o valor é de 1,65% com base na Q_{95} , mas salta para 5,13% na Q_{90} , e recua para 4,11% na $Q_{7,10}$; a UP do Rio Dois Rios exibe altos níveis de comprometimento em todas as vazões analisadas, com destaque para a $Q_{7,10}$, na qual apenas 82,66% das ottobacias permanecem em condição confortável (<25% de comprometimento), enquanto 9,43% já operam em déficit; por fim, a UP do Baixo Paraíba do Sul também apresenta variações significativas, com presença constante de ottobacias nas faixas intermediárias em todos os cenários. Já na $Q_{7,10}$, os valores mais elevados ocorrem na faixa entre 25% e 50% de comprometimento (11,05% das ottobacias), além de 2,80% das ottobacias em déficit hídrico, configurando um aumento relevante da pressão sobre os recursos hídricos nessa condição de vazão crítica.

Quadro 5-4 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, na cena atual, por Unidade de Planejamento, Q₉₀

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento							
	Alto Paraíba do Sul	Rios Preto e Paraibuna	Rios Pomba e Muriaé	Médio Paraíba do Sul	Piabanha	Rio Dois Rios	Baixo Paraíba do Sul	Sub-bacia do Rio Pirai
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	99,72%	99,92%	98,71%	99,74%	92,19%	90,52%	95,00%	99,96%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	0,10%	0,03%	0,59%	0,08%	2,40%	2,66%	2,70%	0,04%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,05%	0,01%	0,04%	0,02%	0,22%	0,79%	0,28%	0,00%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,06%	0,41%	0,10%	0,00%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,11%	0,03%	0,64%	0,15%	5,13%	5,63%	0,29%	0,00%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 5-5 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, na cena atual, por Unidade de Planejamento, Q₉₅

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento							
	Alto Paraíba do Sul	Rios Preto e Paraibuna	Rios Pomba e Muriaé	Médio Paraíba do Sul	Piabanha	Rio Dois Rios	Baixo Paraíba do Sul	Sub-bacia do Rio Pirai
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	99,74%	99,90%	98,40%	99,51%	93,45%	88,02%	92,30%	99,94%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	0,07%	0,05%	0,65%	0,35%	2,45%	3,17%	3,65%	0,04%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,05%	0,02%	0,25%	0,02%	2,40%	0,78%	1,11%	0,02%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,02%	0,003%	0,08%	0,01%	0,04%	0,51%	0,18%	0,00%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,13%	0,03%	0,62%	0,11%	1,65%	7,52%	0,25%	0,00%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 5-6 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, na cena atual, por Unidade de Planejamento, Q_{7,10}

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento							
	Alto Paraíba do Sul	Rios Preto e Paraibuna	Rios Pomba e Muriaé	Médio Paraíba do Sul	Piabanha	Rio Dois Rios	Baixo Paraíba do Sul	Sub-bacia do Rio Pirai
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	99,64%	99,90%	96,92%	90,93%	89,08%	82,66%	81,84%	99,90%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	0,10%	0,03%	1,49%	6,35%	5,98%	4,90%	11,05%	0,06%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,06%	0,02%	0,36%	2,06%	0,76%	1,92%	2,92%	0,02%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,03%	0,01%	0,20%	0,25%	0,07%	1,08%	1,40%	0,02%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,18%	0,04%	1,02%	0,41%	4,11%	9,43%	2,80%	0,00%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

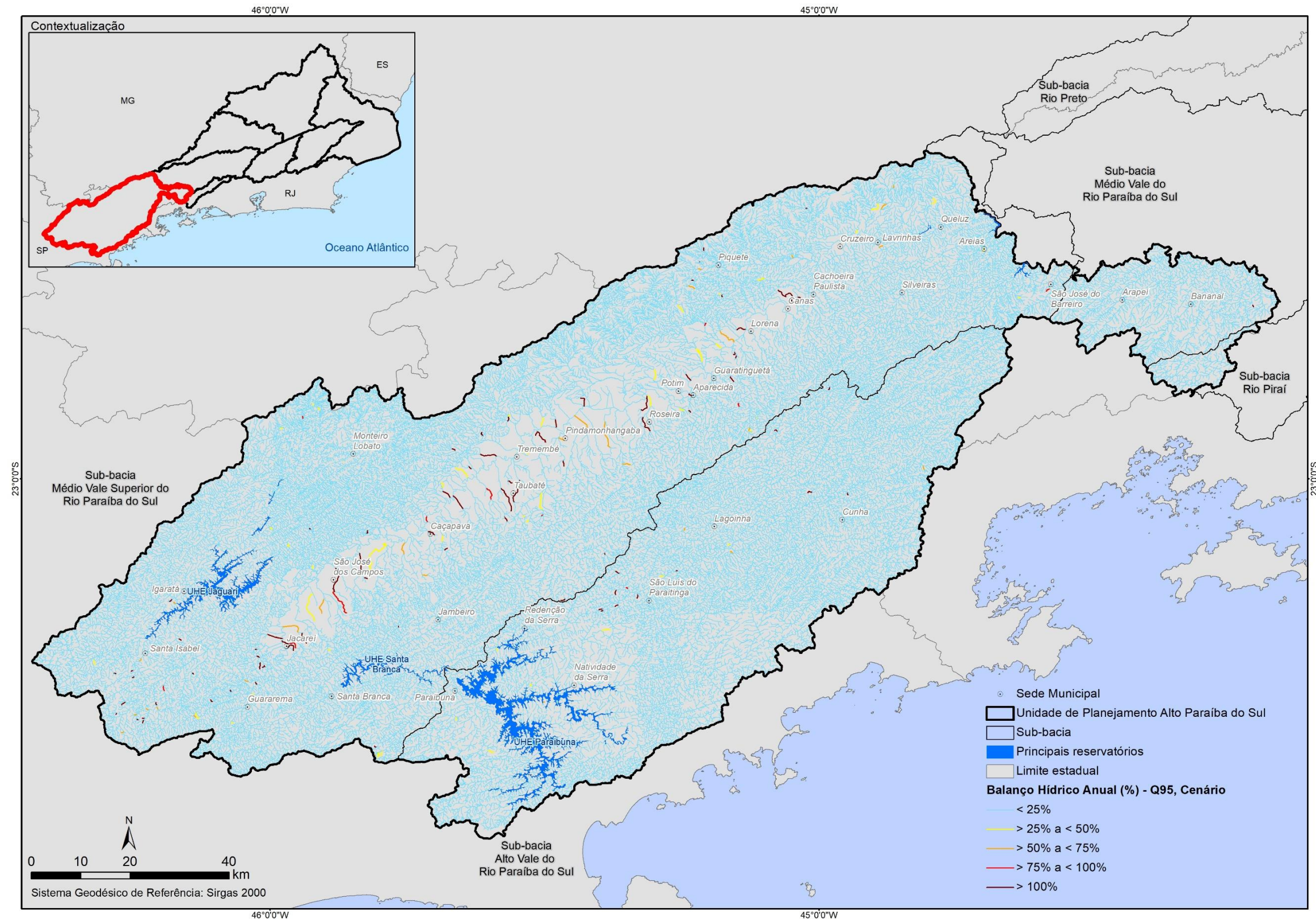
A seguir, será apresentada a espacialização dos resultados em cada uma das Unidades de Planejamento analisadas. Os resultados serão analisados em todas as UPs para a vazão de referência Q_{95} , pois trata-se da vazão de referência utilizada pela ANA (Quadro 4-2). Além disso, nas UPs que possuem como vazão de referência a $Q_{7,10}$ (Alto Paraíba do Sul, Preto e Paraibuna e Pomba e Muriaé), também serão apresentados tais resultados.

Em relação ao Alto Paraíba do Sul (Figura 5-5 Q_{95} e Figura 5-6 $Q_{7,10}$), nota-se que os trechos nos quais existe alguma criticidade no balanço hídrico estão de forma geral localizados em afluentes do rio Paraíba do Sul. Para a $Q_{7,10}$ especificamente, nota-se uma pequena concentração de trechos críticos entre os municípios de Cunha e Lagoinha. Além disso, essa é a região mais a montante da bacia hidrográfica, e possui um papel fundamental ao regularizar (a partir de diferentes reservatórios) as vazões que são propagadas para jusante, impactando diretamente no restante do trecho principal do Paraíba do Sul.

A UP dos Rios Preto e Paraibuna (Figura 5-7 Q_{95} e Figura 5-8 $Q_{7,10}$), apresenta o menor índice de comprometimento: 99,9% de suas ottobacias estão na faixa de menos de 25% de comprometimento em todas as vazões de referência. Tal região possui grande destaque na produção hídrica da bacia, já que após suas demandas entrega na junção do rio Paraibuna com o Paraíba do Sul uma vazão de aproximadamente 66 m³/s na Q_{95} e 52 m³/s na $Q_{7,10}$, com forte superávit hídrico.

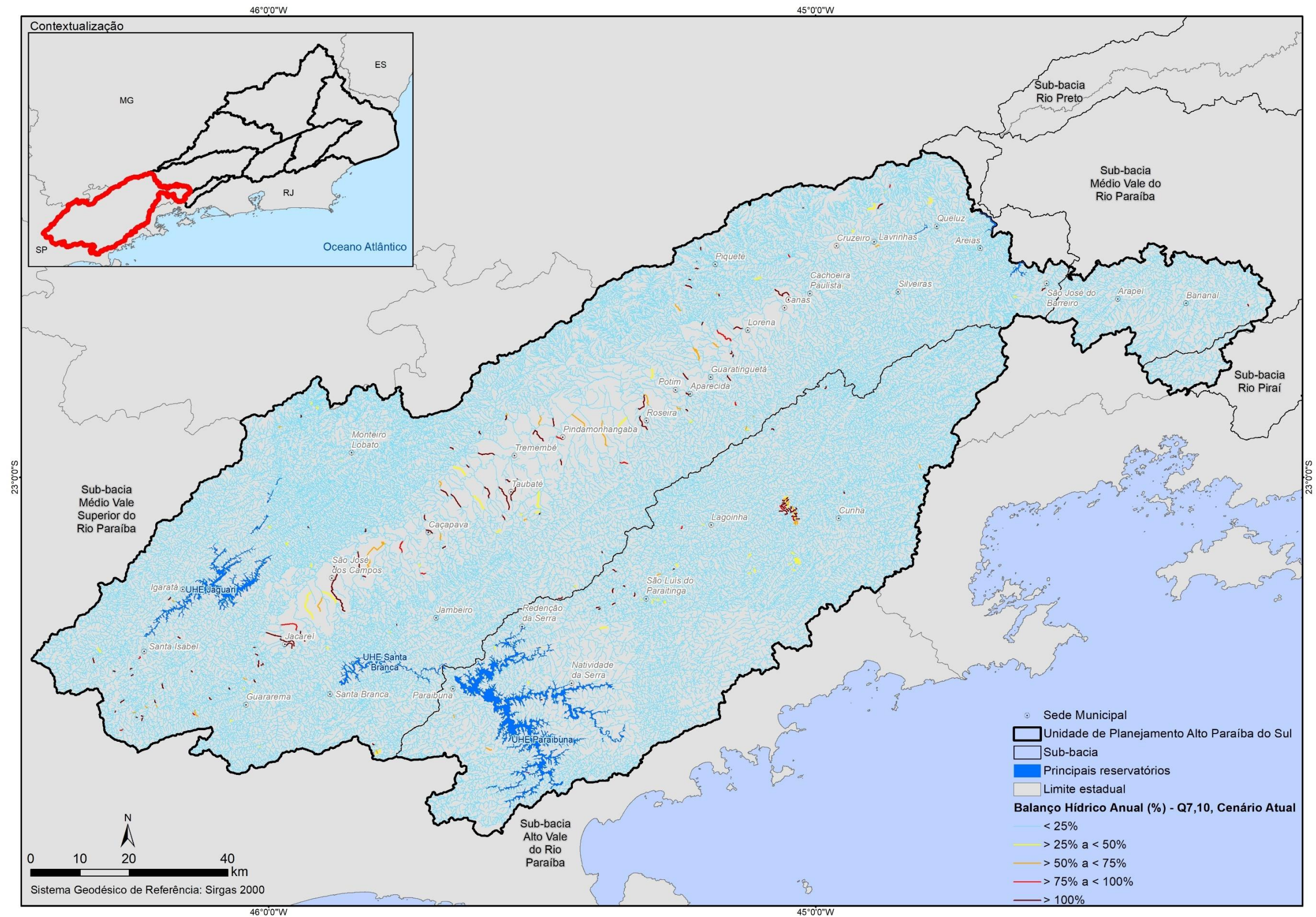
Por outro lado, ainda tratando das UPs que possuem vazão de referência de outorgas $Q_{7,10}$, a UP Rios Pomba e Muriaé (Figura 5-9 Q_{95} e Figura 5-10 $Q_{7,10}$), apresenta maiores índices de ottobacias em situações críticas. Foram identificadas para a $Q_{7,10}$ 1,02% das ottobacias em déficit e 2,05% em faixas intermediárias (25%–100%), o que indica uma tendência de agravamento caso não sejam implementadas medidas de gestão preventiva. Tais tendências podem ser observadas nos afluentes do rio Xopotó e do rio Muriaé. Neste, apesar de nascer na UP dos Rios Pomba e Muriaé, tem a maior parte de sua extensão na UP do Baixo Paraíba do Sul, e nela possui maior grau de criticidade em seus afluentes.

Figura 5-5 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, Cena Atual – UP Alto Paraíba do Sul



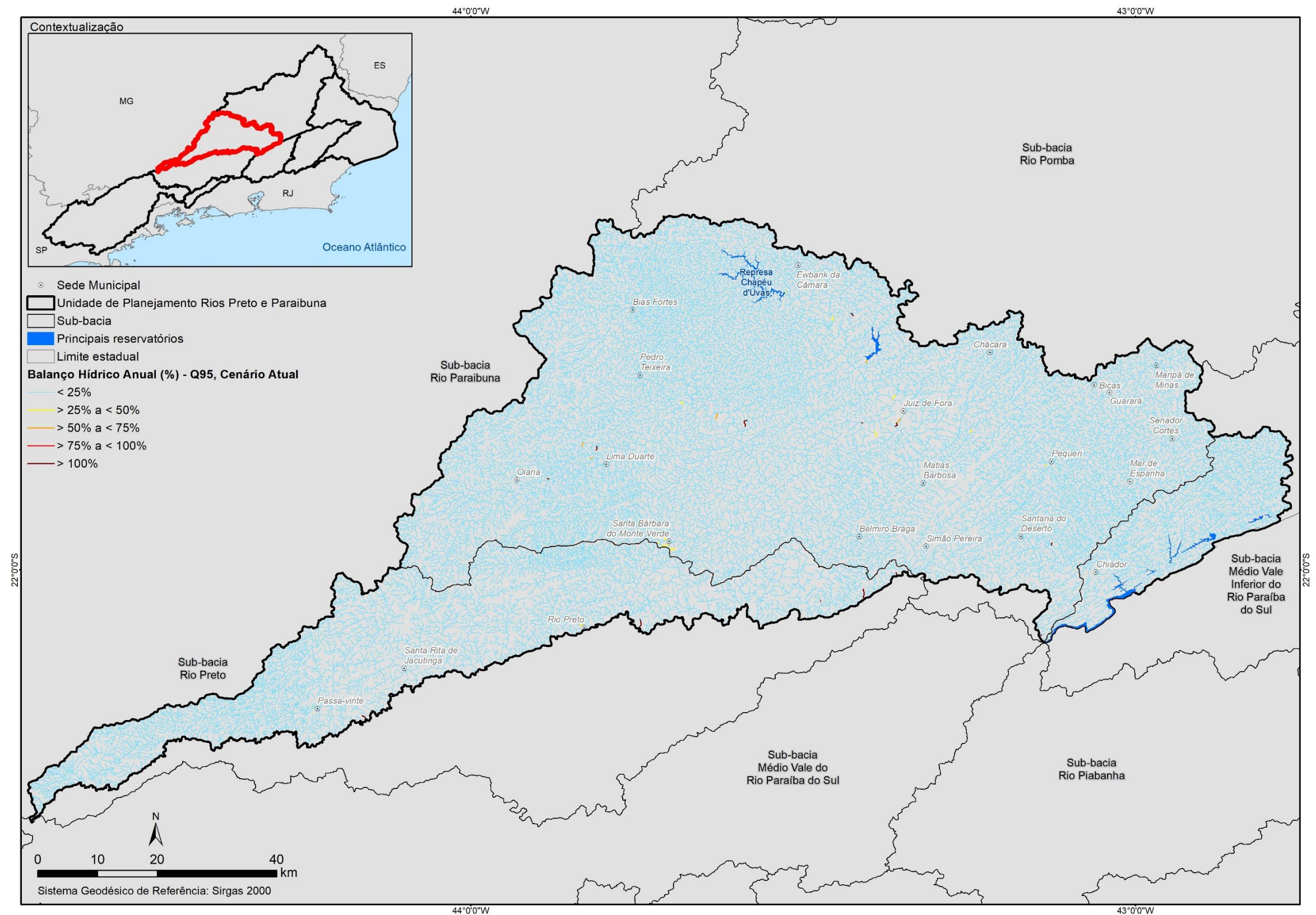
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-6 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q_{7,10}, Cena Atual – UP Alto Paraíba do Sul



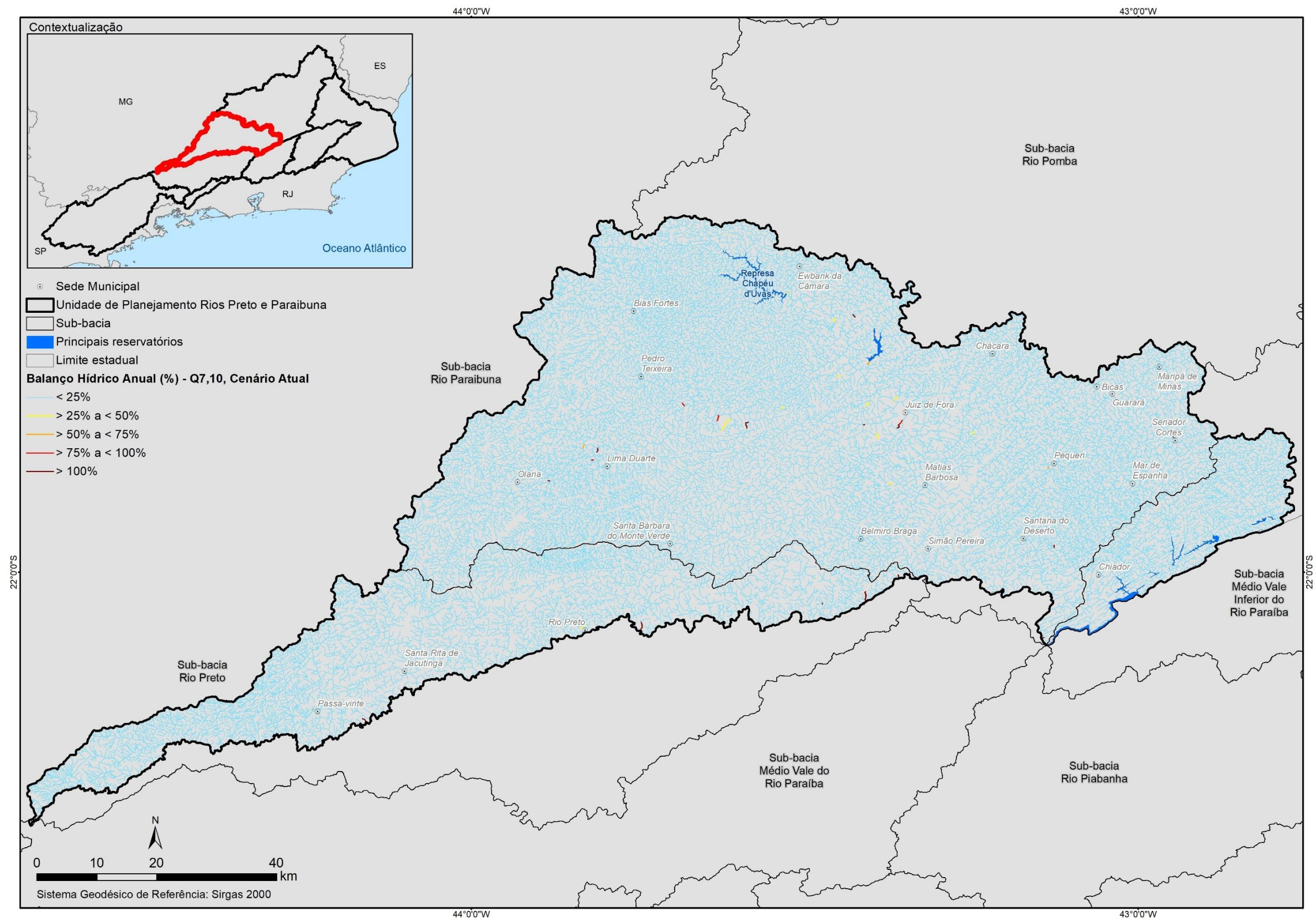
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-7 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, Cena Atual – UP Preto e Paraibuna



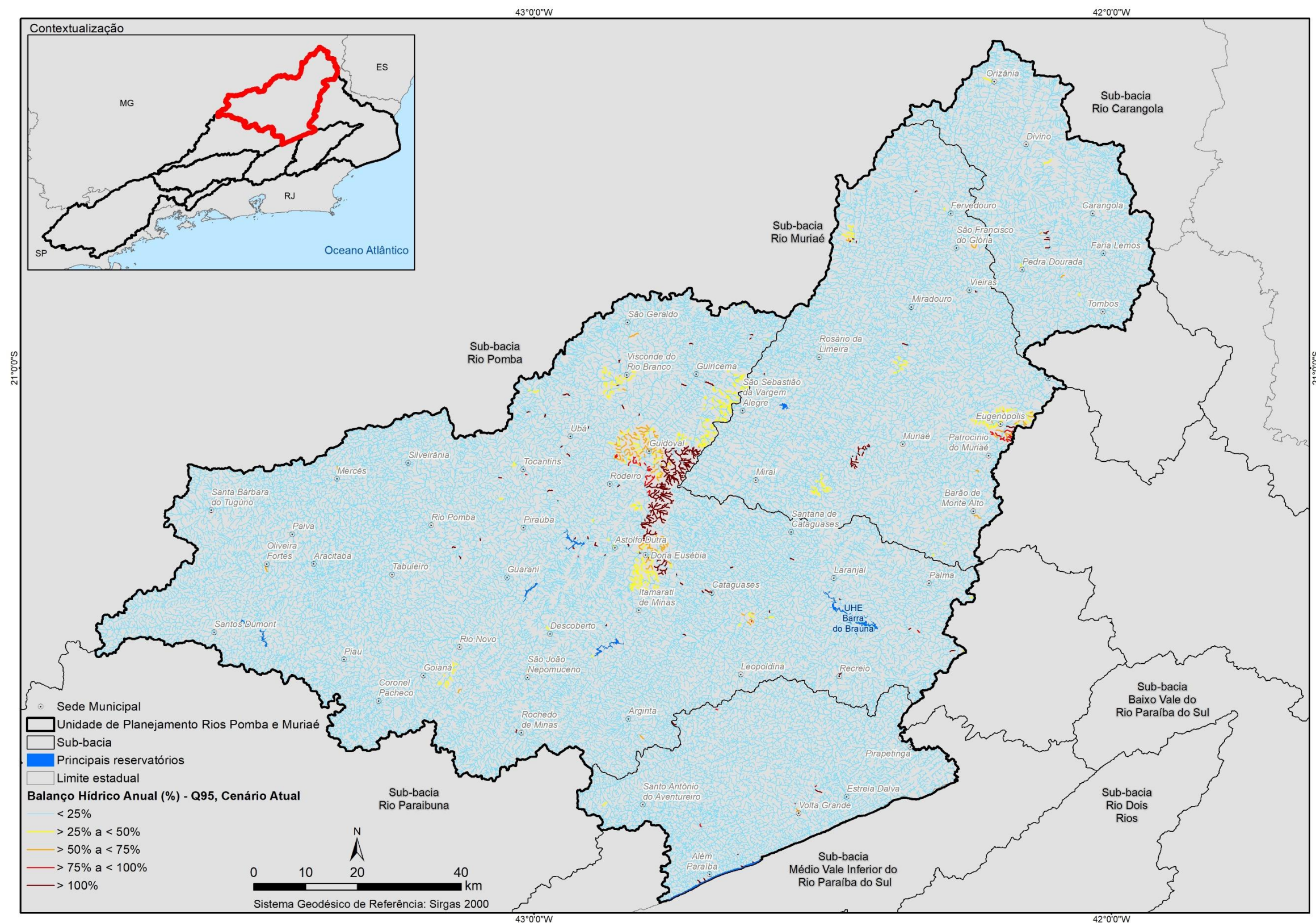
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-8 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q_{7,10}, Cena Atual – UP Preto e Paraibuna



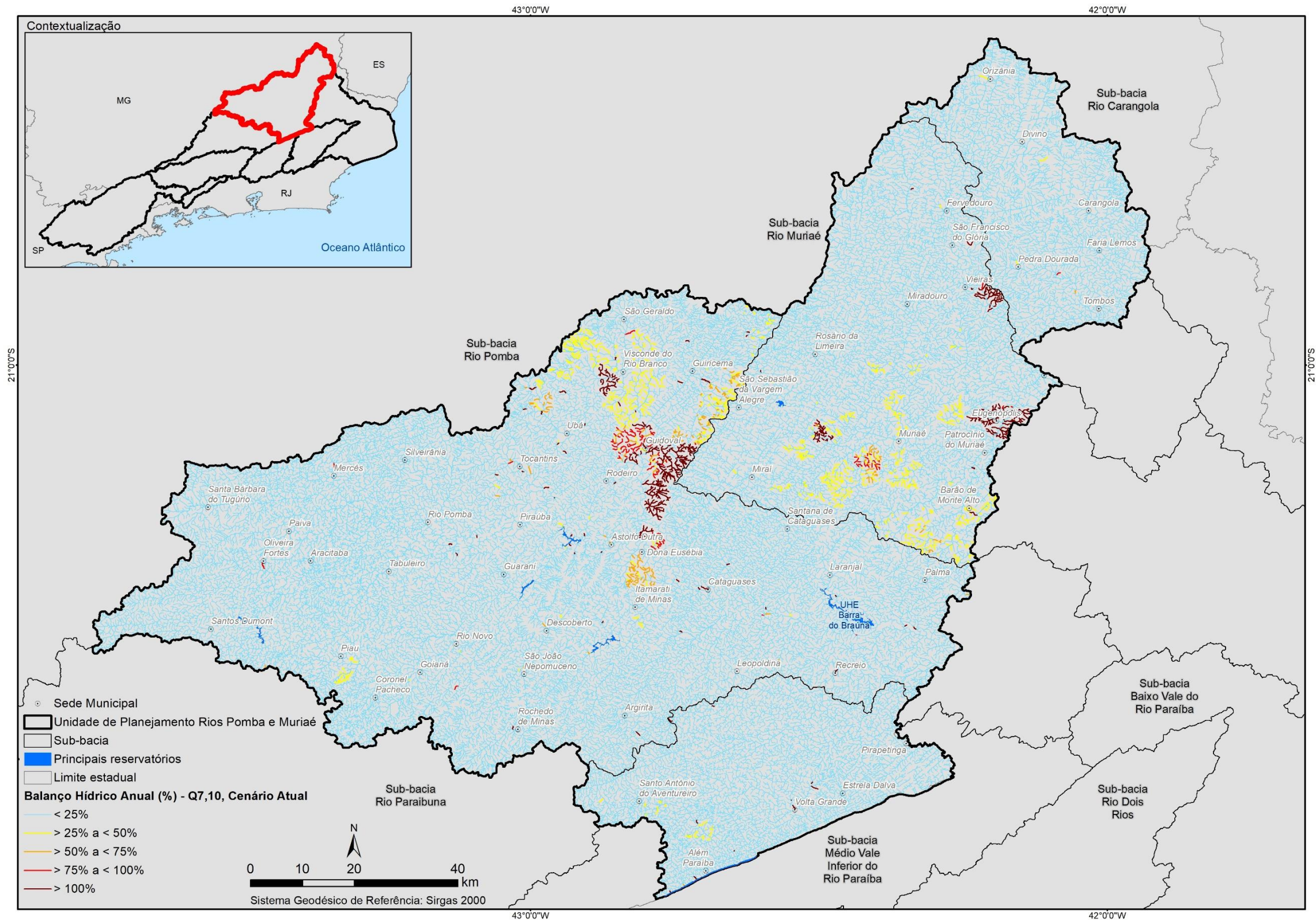
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-9 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, Cena Atual– UP Pomba e Muriaé



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-10 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q_{7,10}, Cena Atual– UP Pomba e Muriaé



Fonte: elaborado pelo Consórcio

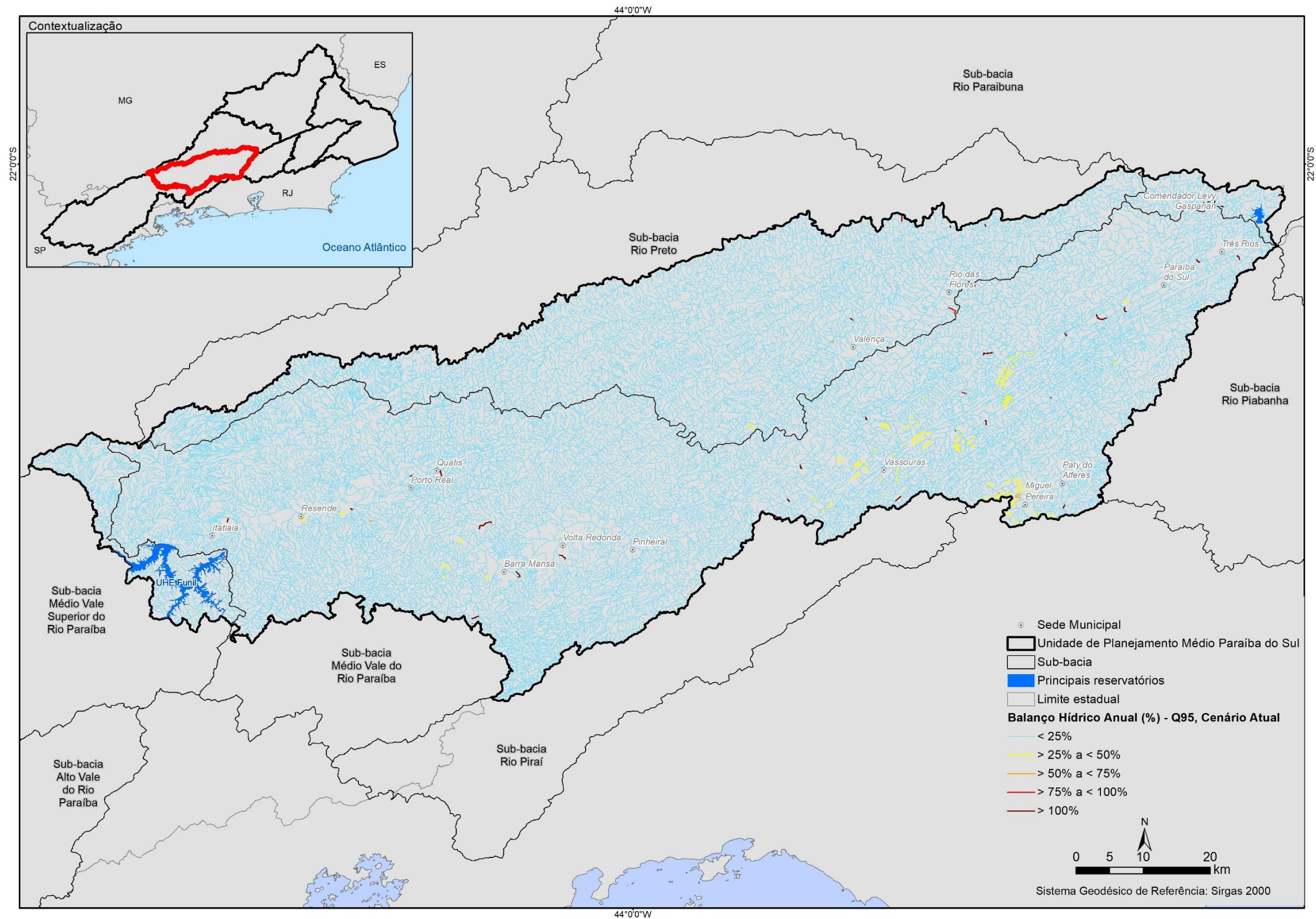
A UP do Médio Paraíba do Sul (Figura 5-11), apesar de ter alta concentração industrial (indústrias automobilísticas, principalmente) apresenta um baixo índice de comprometimento, com trechos críticos espalhados em pontos específicos. Observam-se trechos com comprometimento intermediário entre os municípios de Barra do Piraí e Paraíba do Sul. Destaca-se a presença da Companhia Siderúrgica Nacional, que apresenta uma demanda superficial de 3,8 m³/s. Além disso, em termos de disponibilidade hídrica, esta região depende diretamente da regularização dos reservatórios citados anteriormente.

Já a UP Piabanha (Figura 5-12) demanda atenção especial, possuindo na Q₉₅ 4,85% de suas bacias na faixa entre 25% e 75% de comprometimento, assim como 1,65% já em déficit hídrico. A região do rio Preto e seus afluentes apresenta a maior concentração de déficits hídricos. Já para os índices de comprometimento entre 25% e 75%, nota-se que sua distribuição está especialmente localizada no rio Paquequer e em seus afluentes, indicando a necessidade de ações para que tais índices não atinjam patamares mais críticos no futuro.

A UP Rio Dois Rios (Figura 5-13) concentra a situação mais crítica da bacia, com 88,02% de suas ottobacias na faixa de menor pressão e 7,52% em situação de déficit hídrico para a Q₉₅, o maior valor observado. Observa-se que esta criticidade se concentra principalmente nos afluentes do rio Grande. Tendo em vista o baixo índice de demandas superficiais na UP (1,77 m³/s no total, com destaques para abastecimento urbano, 0,96 m³/s, e irrigação, 0,43 m³/s), observa-se que tais balanços em altas faixas de criticidade advêm das baixas disponibilidades hídricas, especialmente nos ottotrechos de primeira ordem (que somam aproximadamente 50% dos trechos nesta UP). Em termos regionais, a vazão do rio principal da região crítica (afluentes do rio Grande), é de cerca de 9 m³/s na sua junção com o rio Negro, frente a uma demanda acumulada de apenas 0,8 m³/s. Esse dado evidencia que grande parte dos trechos críticos se encontram nos afluentes do rio Grande, principalmente nos trechos entre os municípios de Santa Maria Madalena e São Sebastião do Alto.

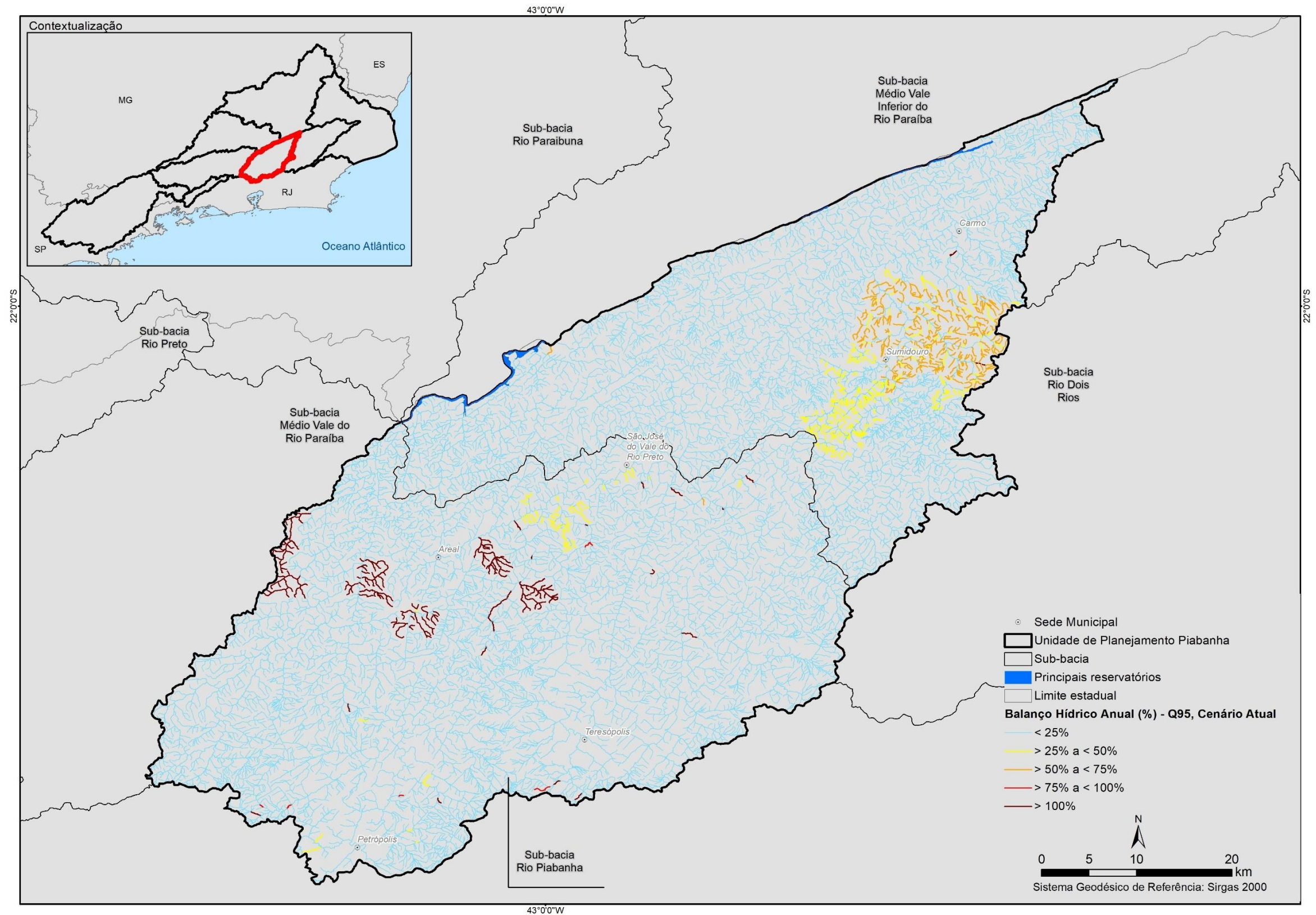
No Baixo Paraíba do Sul (Figura 5-14), por outro lado, há o segundo menor percentual de ottobacias na primeira faixa, 92,3% do total na Q₉₅. As demais estão distribuídas nas faixas intermediárias de criticidade, entre 25% a 75% de comprometimento hídrico, indicando que se medidas de gestão de usos e ocupação não forem tomadas, tais áreas podem sofrer algum tipo de déficit hídrico no futuro. Tais regiões envolvem principalmente o rio Muriaé em sua porção na UP do Baixo Paraíba do Sul, com demandas significativas nos setores de irrigação, abastecimento urbano e dessedentação animal.

Figura 5-11 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, Cena Atual – UP Médio Paraíba do Sul



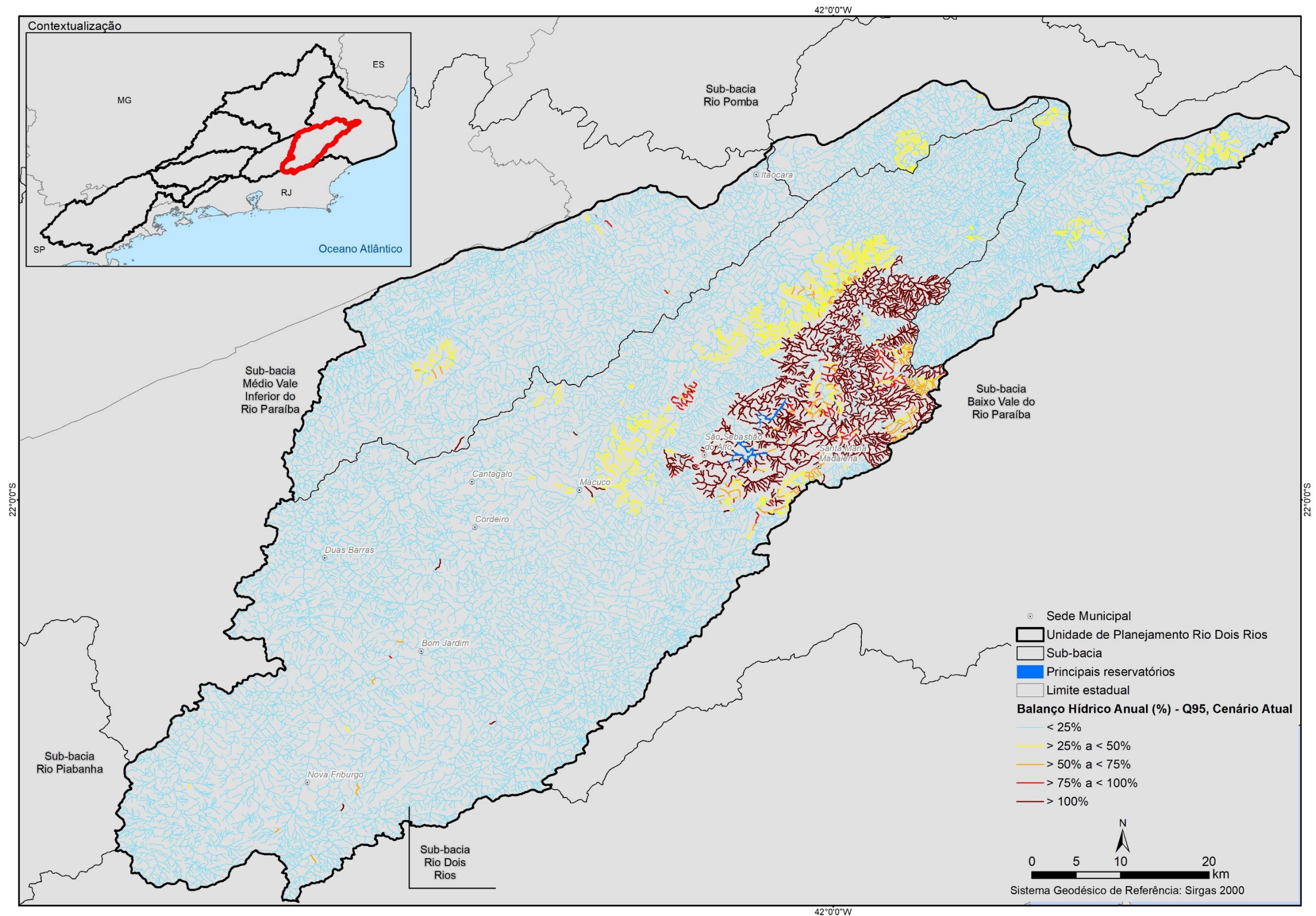
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-12 – Balanço Hídrico Superficial Anual, Cena Atual – Q₉₅– UP Piabanha



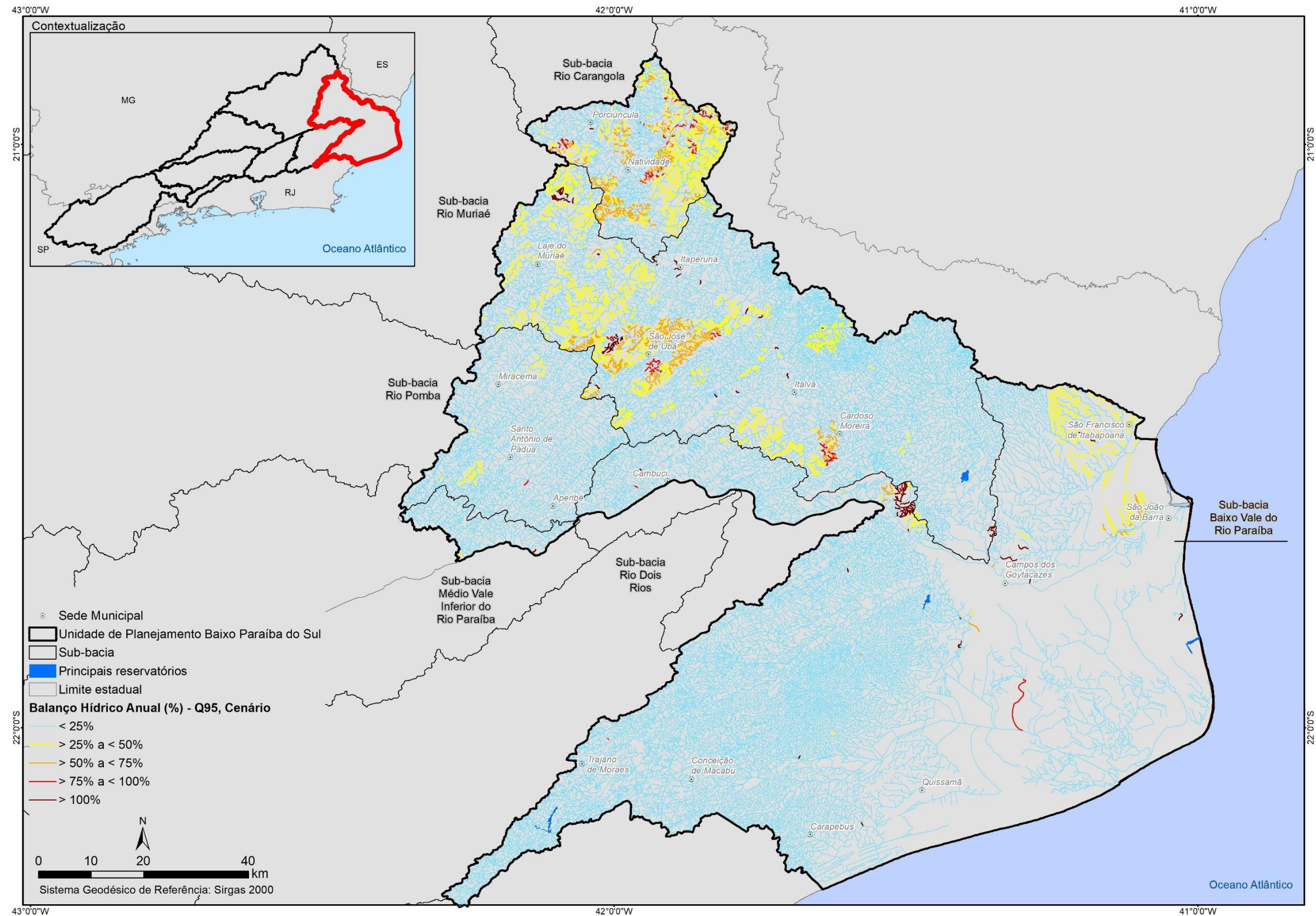
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-13 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, Cena Atual – UP Rio dois Rios



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-14 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, Cena Atual – UP Baixo Paraíba do Sul

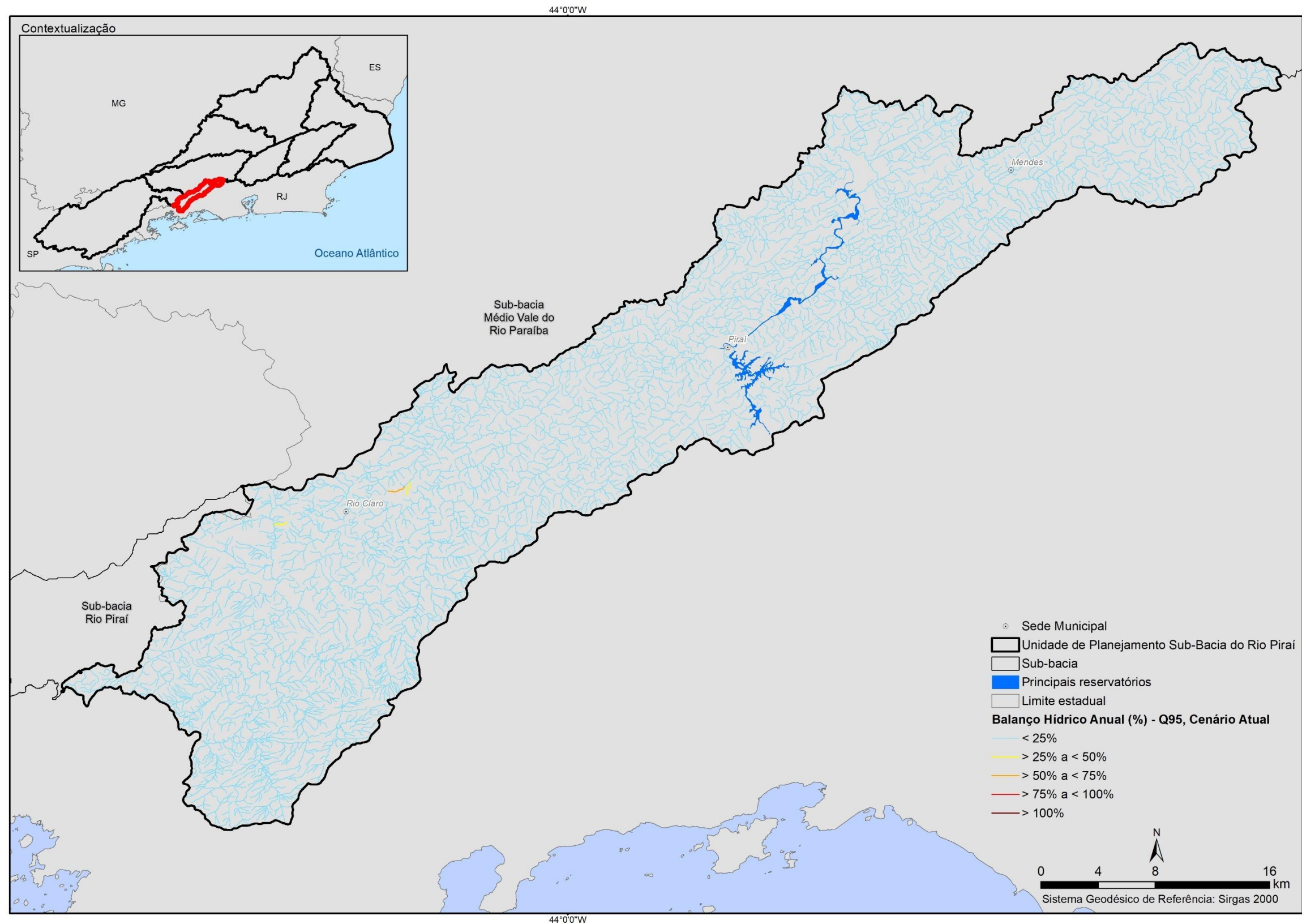


Fonte: elaborado pelo Consórcio

A região da Sub-bacia do Rio Pirai (Figura 5-15) também apresenta baixo nível de comprometimento, com praticamente todas suas sub-bacias no menor nível de criticidade. Tal região exerce papel fundamental na segurança hídrica e atendimento das necessidades da Região Metropolitana do Rio de Janeiro: uma parte significativa de seu abastecimento é proveniente da transposição de águas da bacia do rio Paraíba do Sul para a bacia do rio Guandu, a partir da estação elevatória de Santa Cecília.

Com base nos resultados do Balanço Hídrico Quantitativo, descritos por UP, são apresentadas no Quadro 5-7 (Q_{95} para todas as UPs) e Quadro 5-8 ($Q_{7,10}$, nas UPs que possuem como vazão de referência) a seguir, as peculiaridades das regiões ao longo da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, procurando desta forma sintetizar as informações obtidas.

Figura 5-15 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, Cena Atual – UP Rio Pirai



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 5-7 – Análise de resultados do balanço hídrico superficial da cena atual integrada à disponibilidade hídrica (vazão de referência Q_{95})

Unidades de planejamento	Demandas Superficiais ¹		Trechos principais				Observações
	Total (m³/s)	Preponderantes	Ponto analisado	Área de drenagem do ponto (km²)	Disponibilidade hídrica no trecho para a vazão de referência (m³/s) ²	Vazões remanescentes no trecho (m³/s)	
Alto Paraíba do Sul	20,16	Ab. Urbano: 5,63 m³/s; Irrigação: 4,78 m³/s; Mineração: 3,52 m³/s	Rio Paraíba do Sul, a jusante da UHE Paraibuna	4.279	26,79	26,69	Transposição de 5,13 m³/s para fora da BHPS (bacia do rio Piracicaba); depende de regularização dos reservatórios de Paraibuna, Santa Branca e Jaguari
			Rio Paraíba do Sul próximo à entrada do reservatório Funil	13.023	119,1	108,35	
Rios Preto e Paraibuna	3,88	Ab. Urbano: 1,74 m³/s; Mineração: 1,34 m³/s	Rio Preto na confluência com o rio Paraibuna	3.435	26,91	26,41	
			Rio Paraibuna na entrega ao Paraíba do Sul	8.602	67,05	66,48	
Rios Pomba e Muriaé	5,06	Ab. Urbano: 1,76 m³/s; Irrigação: 1,48 m³/s	Rio Pomba na entrega ao Paraíba do Sul	8.569	35,27	34,86	
			Rio Muriaé na entrega ao Paraíba do Sul	8.152	21,83	19,88	
Médio Paraíba do Sul	9,31	Indústria: 4,57 m³/s; Ab. Urbano: 3,12 m³/s	Rio Paraíba do Sul, no barramento de Santa Cecília	16.601	166,4	159,9	Transposição de 119 m³/s para a sub-bacia do rio Pirai
			Rio Paraíba do Sul, previamente ao encontro com os rios Paraibuna e Piabanha	19.487	71,03	70,21	

Unidades de planejamento	Demandas Superficiais ¹		Trechos principais				Observações
	Total (m³/s)	Preponderantes	Ponto analisado	Área de drenagem do ponto (km²)	Disponibilidade hídrica no trecho para a vazão de referência (m³/s) ²	Vazões remanescentes no trecho (m³/s)	
Piabanha	2,55	Ab. Urbano: 0,99 m³/s; Irrigação: 0,92 m³/s	Rio Piabanha na entrega ao Paraíba do Sul	2.067	12,57	12,50	
			Rio Paquequer na entrega ao Paraíba do Sul	757	4,72	3,88	
Rio Dois Rios	1,77	Ab. Urbano: 0,69 m³/s; Irrigação: 0,43 m³/s; Dessedentação animal: 0,26 m³/s	Rio Dois Rios na entrega ao Paraíba do Sul	3.163	13,8	13,33	
Baixo Paraíba do Sul	6,84	Irrigação: 2,41 m³/s; Ab. Urbano: 2,20 m³/s; Dessedentação: 0,60 m³/s	Rio Paraíba do Sul próximo à divisa dos municípios de Campos dos Goytacazes, São João da Barra e São Francisco de Itabapoana	55.535	240,74	235,02	
Sub-bacia do Rio Pirai	0,5	Ab. Urbano: 0,27 m³/s; Indústria: 0,13 m³/s	Rio Pirai na entrega ao Paraíba do Sul	1.116	10,79	10,75	Recebe 119 m³/s por transposição, que são enviados para fora da BHPS, para a bacia do rio Guandu

¹ Demandas superficiais sem considerar transposições e evaporação líquida

² Disponibilidades hídricas obtidas do EDH-PS

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 5-8 – Análise de resultados do balanço hídrico superficial da cena atual integrada à disponibilidade hídrica (UPs com vazão de referência Q_{7,10})

Unidades de planejamento	Demandas Superficiais ¹		Trechos principais				Observações
	Total (m³/s)	Preponderantes	Ponto analisado	Área de drenagem do ponto (km²)	Disponibilidade hídrica no trecho para a vazão de referência (m³/s) ²	Vazões remanescentes no trecho (m³/s)	
Alto Paraíba do Sul	20,16	Ab. Urbano: 5,63 m³/s; Irrigação: 4,78 m³/s; Mineração: 3,52 m³/s	Rio Paraíba do Sul, a jusante da UHE Paraibuna	4.279	21,12	21,02	Transposição de 5,13 m³/s para fora da BHPS (bacia do rio Piracicaba); depende de regularização dos reservatórios de Paraibuna, Santa Branca e Jaguari
			Rio Paraíba do Sul próximo à entrada do reservatório Funil	13.023	81,46	71,00	
Rios Preto e Paraibuna	3,88	Ab. Urbano: 1,74 m³/s; Mineração: 1,34 m³/s	Rio Preto na confluência com o rio Paraibuna	3.435	20,87	20,42	
			Rio Paraibuna na entrega ao Paraíba do Sul	8.602	52,52	52,01	
Rios Pomba e Muriaé	5,06	Ab. Urbano: 1,76 m³/s; Irrigação: 1,48 m³/s	Rio Pomba na entrega ao Paraíba do Sul	8.569	25,42	25,02	
			Rio Muriaé na entrega ao Paraíba do Sul	8.152	13,31	11,43	

¹ Demandas superficiais sem considerar transposições e evaporação líquida

² Disponibilidades hídricas obtidas do EDH-PS

Fonte: elaborado pelo Consórcio

5.1.3. Resultados do cenário de aplicação dos Critérios de Outorga

Tendo em vista que as simulações utilizando os critérios de outorga envolvem apenas as vazões mínimas Q_{95} e $Q_{7,10}$, serão avaliadas tais vazões em suas sazonalidades anuais. Para a Q_{95} o critério é de 40%, enquanto para a $Q_{7,10}$ é de 50%, conforme o Quadro 4-2 e Quadro 4-3.

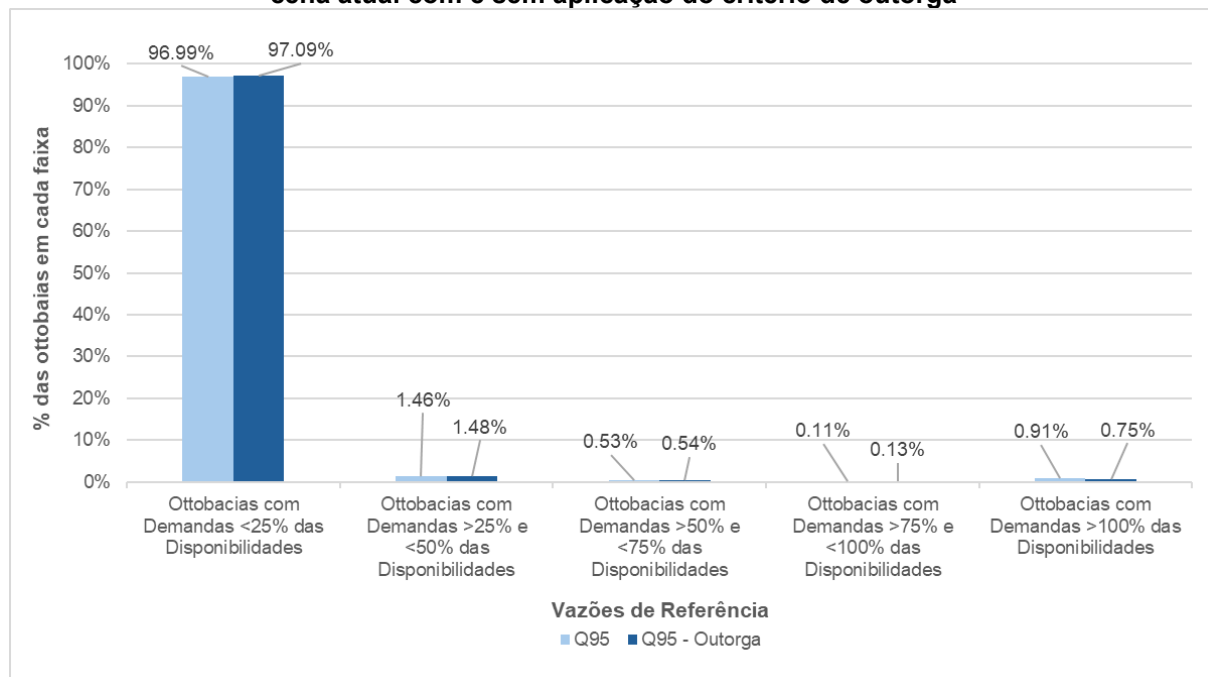
A aplicação dos critérios de outorga trata de um cenário completamente hipotético e influencia o cálculo do balanço hídrico a partir do incremento da disponibilidade ao longo dos trechos. Logo, tendo em vista que o balanço é calculado a partir da relação Demanda/Disponibilidade, a aplicação do critério de outorga influencia a ottobacia alterando o valor da vazão de saída, que será sempre, no mínimo, igual a vazão mínima remanescente. Logo, o balanço hídrico daquela ottobacia não será alterado, e a aplicação do critério de outorga terá efeitos apenas nas ottobacias a jusante, que irão receber a vazão remanescente. Portanto, o critério de outorga afeta as ottobacias que possuem alta criticidade ocasionada por conta dos altos consumos hídricos realizados a montante (comprometimento “em cascata”).

A Figura 5-16 e Figura 5-17 apresentam a distribuição percentual das ottobacias da bacia do rio Paraíba do Sul por faixas de comprometimento hídrico, comparando os cenários de disponibilidade natural e de outorga para as vazões de referência Q_{95} e $Q_{7,10}$.

Em ambos os casos, observa-se a manutenção das faixas de comprometimento menor que 25% em mais de 90% das ottobacias. A aplicação dos critérios de outorga não altera significativamente esse quadro geral. No entanto, há redução nas ottobacias em déficit hídrico, especialmente marcante para a Q_{95} (de 0,91% para 0,75%) e também visível na $Q_{7,10}$ (de 1,71% para 1,36%).

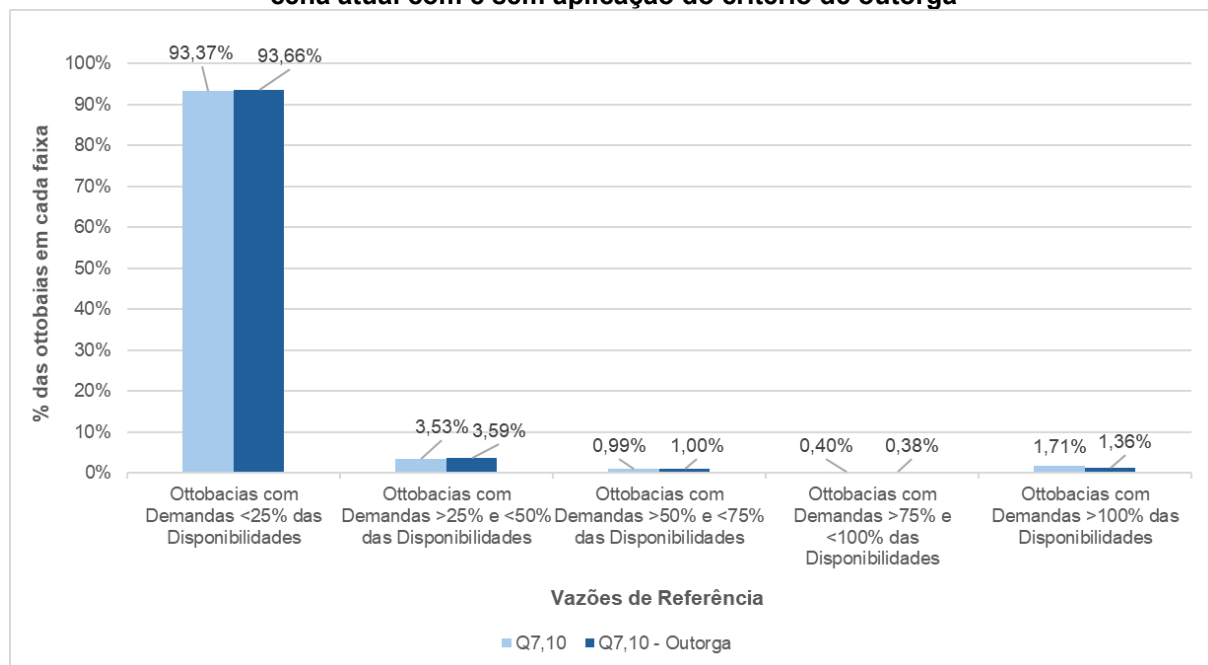
Essa redução permite a diminuição das pressões em regiões já tensionadas. Pequenas variações ascendentes nas faixas intermediárias sugerem redistribuição da pressão hídrica, com um leve aumento nas faixas entre 25% e 75%.

Figura 5-16 – Percentual de ottobacias em cada faixa de balanço hídrico para vazão Q_{95} na cena atual com e sem aplicação do critério de outorga



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-17 – Percentual de ottobacias em cada faixa de balanço hídrico para vazão $Q_{7,10}$ na cena atual com e sem aplicação do critério de outorga



Fonte: elaborado pelo Consórcio

O Quadro 5-9 e o Quadro 5-10 apresentam a comparação entre as cenas atual e de outorga, para as vazões Q_{95} e $Q_{7,10}$, respectivamente. Observa-se que, em grande parte das UPs, a variação entre as duas cenas é sutil, mantendo-se elevados os percentuais de ottobacias com baixa pressão hídrica. Observa-se que nas UPs que não apresentam grandes situações de comprometimento “em cascata”, não há mudanças relevantes na cena de outorgas: UPs Alto Paraíba do Sul, Sub-bacia do Rio Pirai e Rios Preto e Paraibuna. O Médio Paraíba do Sul apresenta alterações mais significativas apenas na $Q_{7,10}$, pois a diminuição de disponibilidade ocasiona o aumento brusco da criticidade em tal UP.

Em contraste, a UP Rio Dois Rios destaca-se por apresentar os maiores percentuais de ottobacias em déficit hídrico: 7,52% com uma redução relevante para 5,80% para a Q_{95} , e uma redução de 9,43% para 8,74% para a $Q_{7,10}$. A UP Rios Pomba e Muriaé também apresenta variações, com redução de déficit, mas redistribuição da pressão para faixas intermediárias.

As UPs Piabanha e Baixo Paraíba do Sul apresentam tendência inversa, com leve aumento no número de ottobacias em déficit hídrico na vazão de referência Q_{95} . Tal fato ocorre pela metodologia de cálculo adotada: ottobacias que anteriormente (sem aplicação do critério de outorga) possuíam vazão disponível igual a 0 também possuíam balanço hídrico igual a 0, pois não é possível uma vazão de saída negativa (retirar mais água do que há disponível). No entanto, ao aplicar o critério de outorga, são repassadas pequenas vazões para essas ottobacias (ocorre uma sobra de vazão que anteriormente não existia), que quando comparadas com as demandas, resultam em déficit.

Quadro 5-9 – Percentual de ottobacias em cada faixa de balanço hídrico – Cena atual com e sem critério de outorga – por unidade de planejamento, vazão de referência Q_{95}

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento															
	Alto Paraíba do Sul		Rios Preto e Paraíbauna		Rios Pomba e Muriaé		Médio Paraíba do Sul		Piabanha		Rio Dois Rios		Baixo Paraíba do Sul		Sub-bacia do Rio Pirai	
	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	99,74%	99,74%	99,90%	99,90%	98,40%	98,49%	99,51%	99,51%	93,45%	93,28%	88,02%	88,94%	92,30%	92,43%	99,94%	99,94%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	0,07%	0,07%	0,05%	0,05%	0,65%	0,67%	0,35%	0,35%	2,45%	2,32%	3,17%	3,56%	3,65%	5,37%	0,04%	0,04%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,05%	0,05%	0,02%	0,02%	0,25%	0,28%	0,02%	0,02%	2,40%	2,34%	0,78%	1,02%	1,11%	1,62%	0,02%	0,02%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,02%	0,02%	0,00%	0,00%	0,08%	0,10%	0,01%	0,01%	0,04%	0,04%	0,51%	0,68%	0,18%	0,27%	0,00%	0,00%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,13%	0,13%	0,03%	0,03%	0,62%	0,46%	0,11%	0,11%	1,65%	2,02%	7,52%	5,80%	0,25%	0,32%	0,00%	0,00%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 5-10 – Percentual de ottobacias em cada faixa de balanço hídrico – Cena atual com e sem critério de outorga – por unidade de planejamento, vazão de referência Q_{7,10}

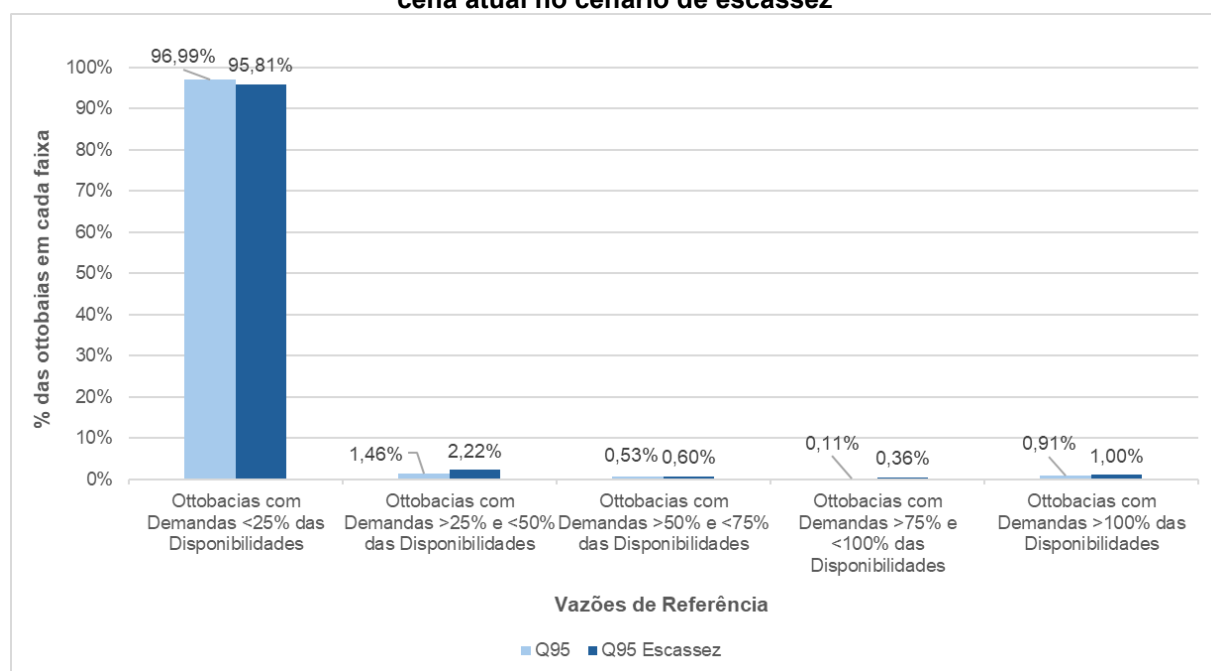
Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento															
	Alto Paraíba do Sul		Rios Preto e Paraíbauna		Rios Pomba e Muriaé		Médio Paraíba do Sul		Piabanha		Rio Dois Rios		Baixo Paraíba do Sul		Sub-bacia do Rio Pirai	
	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga	Cena atual	Outorga
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	99,64%	99,65%	99,90%	99,90%	96,92%	97,07%	90,93%	91,02%	89,08%	90,13%	82,66%	82,90%	81,84%	82,88%	99,90%	99,90%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	0,10%	0,09%	0,03%	0,03%	1,49%	1,56%	6,35%	6,33%	5,98%	6,36%	4,90%	5,14%	11,05%	11,17%	0,06%	0,06%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,06%	0,06%	0,02%	0,02%	0,36%	0,39%	2,06%	2,04%	0,76%	0,92%	1,92%	2,05%	2,92%	2,87%	0,02%	0,02%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,03%	0,03%	0,01%	0,01%	0,20%	0,24%	0,25%	0,24%	0,07%	0,15%	1,08%	1,17%	1,40%	1,21%	0,02%	0,02%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,18%	0,17%	0,04%	0,04%	1,02%	0,75%	0,41%	0,37%	4,11%	2,44%	9,43%	8,74%	2,80%	1,87%	0,00%	0,00%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

5.1.4. Cenário de escassez hídrica e priorização de usos

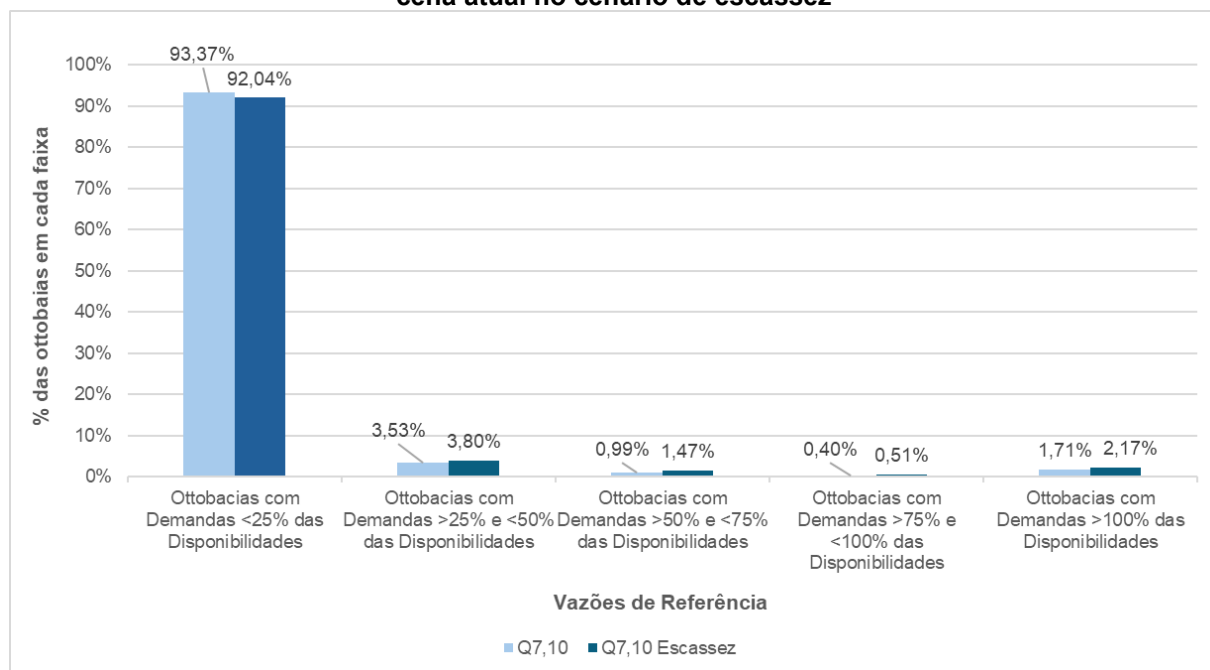
A Figura 5-18 e Figura 5-19 apresentam o comparativo na bacia do Paraíba do Sul entre as vazões Q_{95} e $Q_{7,10}$ anuais e seus respectivos cenários de escassez (que foram considerados com redução em 20% da disponibilidade hídrica normal). Em ambas as vazões de referência é observada uma diminuição, no cenário de escassez, de pouco mais de 1% nas ottobacias em situação confortável (menos de 25% de comprometimento). Tal redução é distribuída de forma distinta nas classes com maior criticidade: para a Q_{95} observa-se um maior incremento na faixa intermediária de 25%-50% de comprometimento, de aproximadamente 0,8%, enquanto para a $Q_{7,10}$ ocorre um incremento de aproximadamente 0,5% nas faixas de 50%-75% e nas ottobacias em déficit hídrico. Apesar de não serem valores significativamente grandes, tais resultados indicam a necessidade do manejo adequado das condições hidrológicas na bacia em períodos de escassez hídrica como o considerado, visando a manutenção do relativo conforto hídrico existente.

Figura 5-18 – Percentual de ottobacias em cada faixa de balanço hídrico para vazão Q_{95} na cena atual no cenário de escassez



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-19 – Percentual de ottobacias em cada faixa de balanço hídrico para vazão Q_{7,10} na cena atual no cenário de escassez



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Para a definição do cenário de priorização de usos, foi realizada uma seleção das ottobacias inseridas nos cenários de escassez hídrica em situação crítica, especificamente aquelas enquadradas nas faixas de comprometimento entre 75% e 100%, bem como aquelas em déficit hídrico (acima de 100%). A partir dessa seleção, foram identificados para cada ottobacia os dois setores com maior contribuição relativa à demanda total (excluindo-se desta análise os setores de abastecimento urbano e rural e a dessedentação animal, já que são setores prioritários em cenários de escassez). É importante destacar que esses setores não correspondem necessariamente aos de maior demanda absoluta dentro da respectiva Unidade de Planejamento, uma vez que uma demanda elevada pode não implicar em estresse hídrico se estiver alocada em um corpo hídrico com alta disponibilidade. Para a simulação do cenário de priorização de usos em um período de escassez hídrica, adotou-se uma hipótese de redução proporcional nas demandas dos dois setores mais representativos, sendo aplicada uma redução de 50% para o setor com maior contribuição e 25% para o segundo setor¹. Os setores escolhidos são apresentados no Quadro 5-11, podendo ser destacado que em algumas ottobacias específicas, foi identificado uso único ou principal para dessedentação animal, por exemplo, o que foi desconsiderado dos resultados ali apresentados, por se tratar

¹ Observou-se que os ganhos ao reduzir 50% em ambos os setores não justificavam o incremento considerável de 25% no segundo setor.

de uso prioritário. Ressalta-se que a UP da sub-bacia do rio Pirai não entrou nas análises, já que praticamente não apresenta ottobacias acima de 75% de comprometimento (nenhuma na Q_{95} e apenas 0,02% na $Q_{7,10}$).

Quadro 5-11 – Setores com reduções de demanda no cenário de priorização, para as vazões Q_{95} e $Q_{7,10}$.

Unidades de Planejamento	Setores usuários	
	Q_{95}	$Q_{7,10}$
Alto Paraíba do Sul	Irrigação, UTE	Irrigação
Rios Preto e Paraibuna	Indústria, UTE	Mineração, Indústria
Rios Pomba e Muriaé	Irrigação	Irrigação
Médio Paraíba do Sul	Mineração	Irrigação
Piabanha	Indústria, irrigação	Irrigação, UTE
Rio Dois Rios	Irrigação	Irrigação
Baixo Paraíba do Sul	Irrigação	Irrigação

Fonte: elaborado pelo Consórcio

A Figura 5-20 e a Figura 5-21 apresentam os resultados para as vazões de referência Q_{95} e $Q_{7,10}$, respectivamente, indicando os efeitos da aplicação de um cenário de priorização de usos. A comparação percentual é apresentada no Quadro 5-12 e no Quadro 5-13.

As Unidades de Planejamento do Alto Paraíba do Sul e dos Rios Preto e Paraibuna, que já apresentavam um número reduzido de ottobacias em condição crítica nos cenários de escassez, demonstraram apenas melhorias pontuais com a aplicação das reduções de demanda. Nesses casos, as pequenas melhorias não justificam a imposição de restrições significativas ao uso da água (como as aplicadas nesta simulação), considerando o baixo grau de comprometimento já identificado inicialmente.

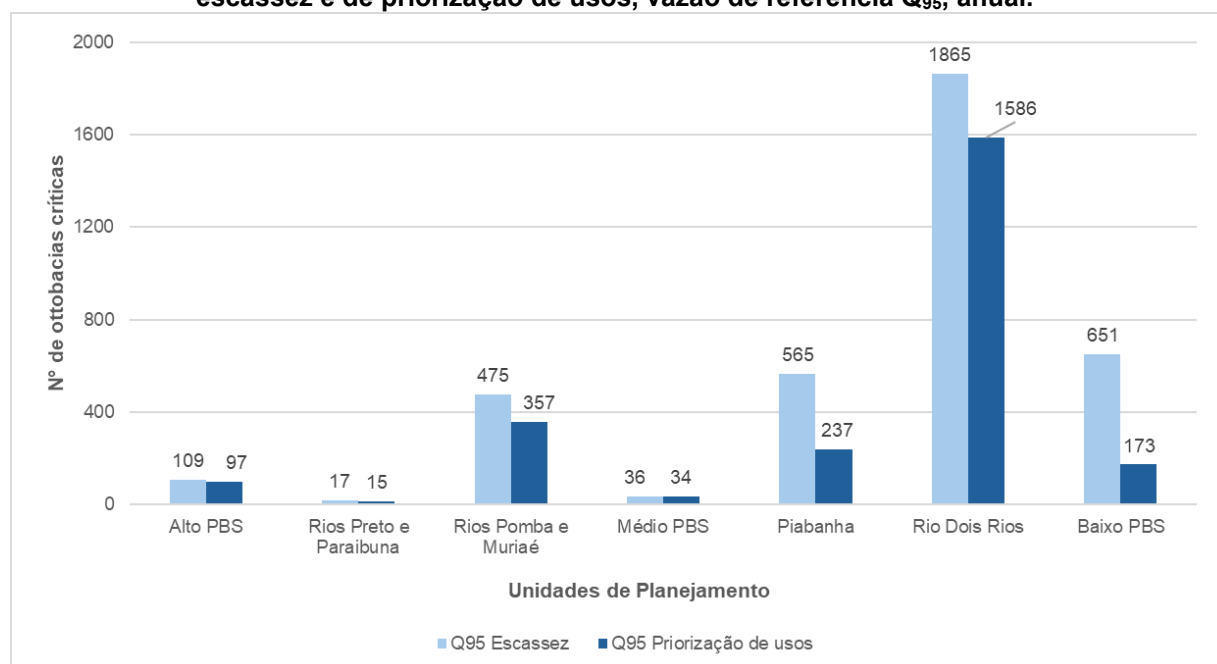
A UP do Médio Paraíba do Sul apresenta um comportamento hidrológico distinto em relação às demais. Enquanto sob a vazão de referência Q_{95} observa-se uma quantidade muito limitada de ottobacias em situação crítica, essa realidade se altera drasticamente sob o regime mais restritivo da $Q_{7,10}$, quando o número de ottobacias críticas se eleva em mais de dez vezes. Tal cenário evidencia a alta sensibilidade da região a variações na disponibilidade hídrica. Com a adoção do cenário de priorização de usos, os resultados indicam uma resposta bastante positiva: a redução das demandas resultou em uma melhoria de aproximadamente 66% no número de ottobacias críticas para o cenário de $Q_{7,10}$.

As UPs do Piabanha e do Baixo Paraíba do Sul se destacam como as mais responsivas às estratégias de priorização, com reduções médias (entre a Q_{95} e $Q_{7,10}$) de criticidade em torno de 57% e 70%. Esses resultados reforçam o potencial de eficiência da gestão da demanda nessas regiões, indicando que medidas voltadas à redistribuição ou racionalização dos usos

em situações de escassez podem contribuir significativamente para a melhoria do balanço hídrico e para o aumento da segurança no atendimento às demandas.

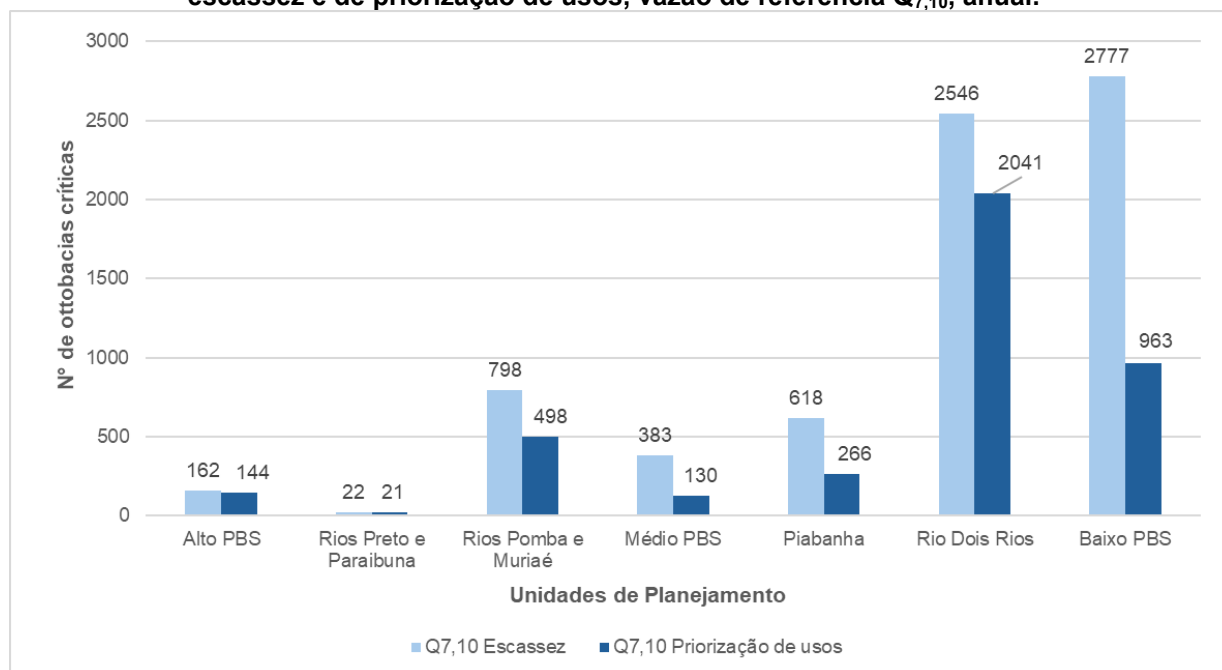
Por outro lado, as UPs dos Rios Pomba e Muriaé e do Rio Dois Rios apresentaram melhorias mais modestas, com reduções de apenas 31% e 17%, respectivamente, mesmo após a aplicação das restrições de usos da água. Esses números indicam que, nessas regiões, o comprometimento hídrico não está fortemente relacionado ao volume demandado, mas sim à baixa disponibilidade hídrica natural dos cursos d'água, limitando a efetividade de ações baseadas exclusivamente na redução de demandas. Assim, nesses casos, soluções complementares podem ser necessárias, como intervenções estruturais, aumento da oferta ou ações integradas de conservação e recarga.

Figura 5-20 – Número de ottobacias acima de 75% de comprometimento nos cenários de escassez e de priorização de usos, vazão de referência Q_{95} , anual.



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-21 – Número de ottobacias acima de 75% de comprometimento nos cenários de escassez e de priorização de usos, vazão de referência $Q_{7,10}$, anual.



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 5-12 – Percentual de ottobacias em cada faixa de balanço hídrico – Cenário de escassez com e sem priorização de usos – por unidade de planejamento, Q₉₅

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento													
	Alto Paraíba do Sul		Rios Preto e Paraibuna		Rios Pomba e Muriaé		Médio Paraíba do Sul		Piabanha		Rio Dois Rios		Baixo Paraíba do Sul	
	Escassez	Priorização	Escassez	Priorização	Escassez	Priorização	Escassez	Priorização	Escassez	Priorização	Escassez	Priorização	Escassez	Priorização
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	99,72%	99,73%	99,87%	99,88%	98,14%	98,62%	97,91%	98,93%	89,92%	94,49%	85,88%	89,47%	88,67%	94,79%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	0,07%	0,07%	0,06%	0,06%	0,71%	0,65%	1,93%	0,92%	5,60%	1,48%	4,09%	2,30%	5,06%	2,90%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,05%	0,05%	0,02%	0,02%	0,29%	0,08%	0,04%	0,03%	0,47%	2,35%	1,32%	0,83%	1,60%	0,36%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,03%	0,03%	0,01%	0,01%	0,16%	0,02%	0,01%	0,00%	2,34%	0,05%	0,62%	0,67%	0,63%	0,07%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,14%	0,12%	0,04%	0,03%	0,70%	0,62%	0,11%	0,11%	1,68%	1,64%	8,09%	6,74%	0,36%	0,19%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 5-13 – Percentual de ottobacias em cada faixa de balanço hídrico – Cenário de escassez com e sem priorização de usos – por unidade de planejamento, Q_{7,10}

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento													
	Alto Paraíba do Sul		Rios Preto e Paraibuna		Rios Pomba e Muriaé		Médio Paraíba do Sul		Piabanha		Rio Dois Rios		Baixo Paraíba do Sul	
	Escassez	Priorização	Escassez	Priorização	Escassez	Priorização	Escassez	Priorização	Escassez	Priorização	Escassez	Priorização	Escassez	Priorização
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	99,54%	99,62%	99,87%	99,88%	95,79%	97,96%	89,69%	93,10%	87,54%	93,84%	79,99%	84,60%	77,87%	86,39%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	0,16%	0,11%	0,06%	0,04%	2,33%	0,85%	4,90%	5,92%	6,46%	3,26%	5,83%	4,12%	11,89%	9,23%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,06%	0,06%	0,01%	0,01%	0,44%	0,29%	4,11%	0,54%	1,61%	1,00%	2,29%	1,75%	4,03%	2,22%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,04%	0,04%	0,01%	0,01%	0,19%	0,13%	0,66%	0,07%	0,22%	1,72%	1,27%	0,21%	1,70%	1,10%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,21%	0,18%	0,05%	0,05%	1,25%	0,77%	0,64%	0,37%	4,17%	0,17%	10,62%	9,32%	4,51%	1,05%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

5.2. CENA FUTURA DE MAIOR PRESSÃO (2045)

A seguir, a Figura 5-22, Figura 5-23 e a Figura 5-24 apresentam uma comparação do balanço hídrico na bacia (vazões anuais) entre a cena atual e a cena futura, considerando o cenário mais crítico estudado no Produto 03 – cenário de maior pressão no ano de 2045, nas vazões Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$, respectivamente. Destaca-se que as demandas para o cenário de maior pressão são maiores quando comparadas à cena atual, tanto pelo aumento no consumo de água na bacia pelos diferentes setores usuários, quanto pela previsão de novos reservatórios (que geram demanda de evaporação líquida). Tendo em vista que na cena atual as dinâmicas de reservatórios já foram consideradas no EDH-PS (estudo de disponibilidades hídricas), são aplicados como novas demandas de evaporação líquida apenas os valores que excedem aqueles da cena atual, ou seja, os que são correspondentes aos novos reservatórios. Em relação a principal transposição da bacia, localizada no barramento de Santa Cecília, foi considerada a manutenção do valor atual de $119 \text{ m}^3/\text{s}$ para as cenas futuras. O valor máximo possível da transposição (de $160 \text{ m}^3/\text{s}$) é indicado para situação de condições hidrológicas favoráveis na bacia, o que não é o caso das vazões mínimas de referência. Já em relação à transposição do Jaquari, foi considerado um aumento da vazão de transposição, a qual que passa de $5,15 \text{ m}^3/\text{s}$ para $8,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

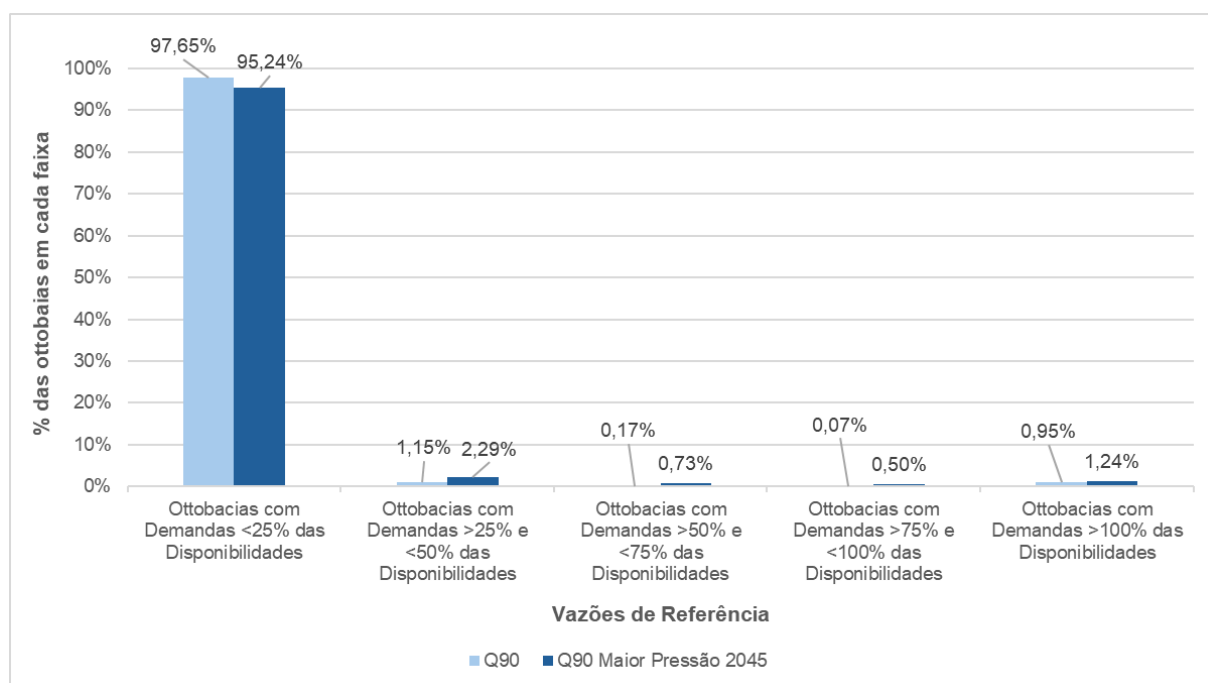
Os resultados evidenciam uma tendência de aumento na criticidade do balanço hídrico da bacia. Nota-se para as vazões Q_{90} e Q_{95} uma queda do percentual de ottobacias na faixa com menos de 25% de comprometimento, porém mantendo-se acima dos 90% na cena futura projetada, indicando a manutenção do relativo conforto hídrico na maior parte da bacia. Para a $Q_{7,10}$, a redução denota uma situação na qual mais de 10% da bacia encontra-se em faixas maiores que os 25% de comprometimento. Essa queda indica um deslocamento progressivo de parte das ottobacias para faixas com maior pressão sobre os recursos hídricos. Ao mesmo tempo, há um crescimento constante da pressão hídrica para as faixas intermediárias, denotando ottobacias que no cenário atual não possuíam comprometimento, e que passam a ter suas vazões afetadas.

Em todas as vazões de referência analisadas, observa-se um aumento nas faixas críticas de comprometimento, variando a intensidade do aumento conforme a escassez denotada por cada vazão de referência. A porcentagem de ottobacias em déficit hídrico – demandas maiores que disponibilidades – possui um leve aumento para a Q_{90} , enquanto mais que dobra nos cenários restantes: na Q_{95} , passa de 0,91% para 1,95%, e na $Q_{7,10}$, de 1,71% para 3,55%. Esses valores revelam um potencial crescimento de áreas com risco de escassez e

de conflitos pelo uso da água, sobretudo sob condições hidrológicas mais restritivas representadas pelas vazões de referência.

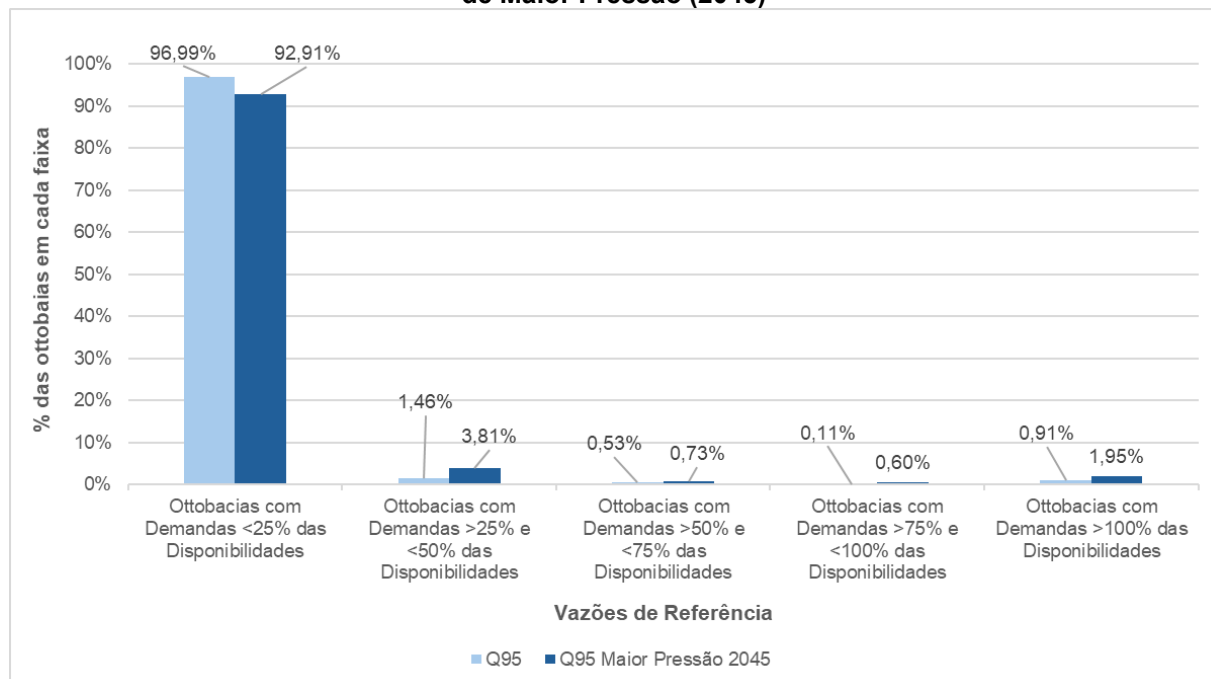
Esses resultados reforçam a necessidade de fortalecimento dos instrumentos de planejamento e regulação, como os critérios de outorga, o enquadramento dos corpos d'água e os planos diretores de recursos hídricos. A adoção de políticas de uso racional da água, incremento na eficiência hídrica setorial e estratégias de conservação de mananciais serão fundamentais para garantir a sustentabilidade hídrica da bacia frente aos desafios projetados para as próximas décadas.

Figura 5-22 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, Q₉₀ – Cenário Atual e de Maior Pressão (2045)



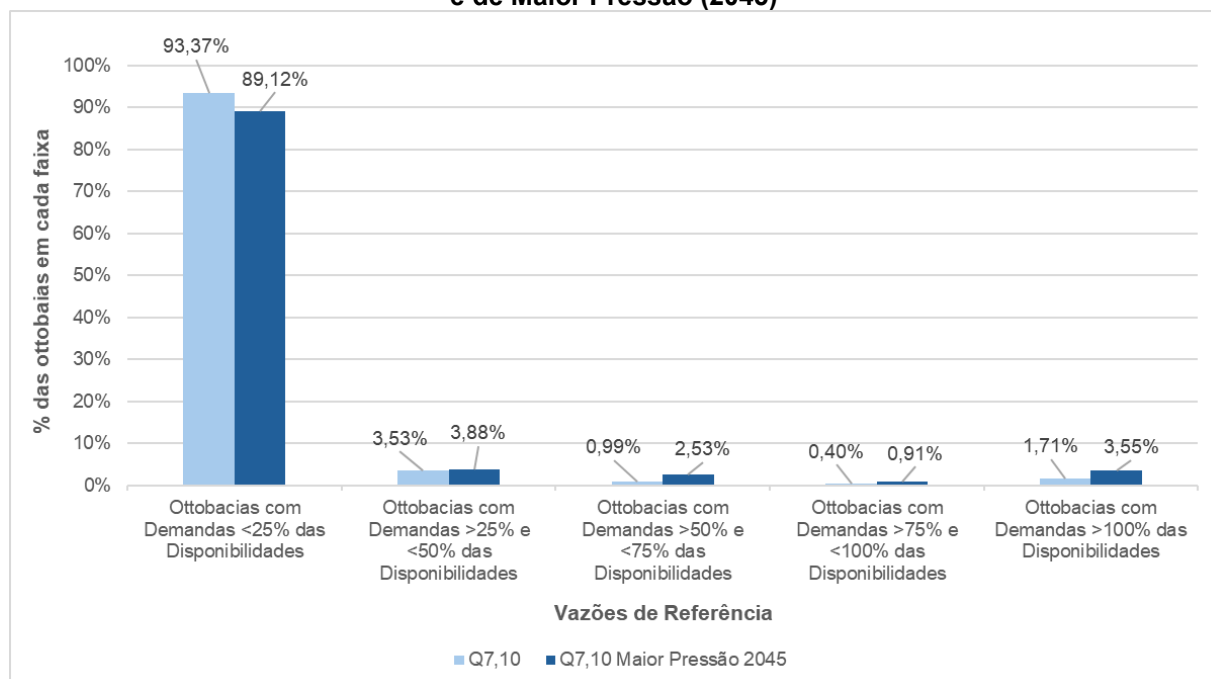
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-23 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, Q₉₅ – Cenário Atual e de Maior Pressão (2045)



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-24 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, Q_{7,10} – Cenário Atual e de Maior Pressão (2045)



Fonte: elaborado pelo Consórcio

O Quadro 5-14 e o Quadro 5-15 apresentam a comparação do balanço hídrico entre o cenário atual e o cenário de maior pressão no ano de 2045 para a Q_{95} e $Q_{7,10}$, respectivamente, em cada uma das Unidades de Planejamento, permitindo uma análise regional dos resultados.

As Unidades de Planejamento do Alto Paraíba do Sul, Rios Preto e Paraibuna e Sub-bacia do Rio Pirai mantiveram estabilidade nas faixas superiores de comprometimento hídrico mesmo sob o cenário de maior pressão. As mudanças e aumentos percentuais foram extremamente baixos, indicando uma resiliência relativa dessas regiões frente ao crescimento projetado da demanda. Apesar de variações nas faixas intermediárias, esses resultados sugerem que as pressões futuras tendem a ser melhor absorvidas nessas regiões, ao menos sob os parâmetros atuais de disponibilidade.

A Unidade de Planejamento do Médio Paraíba do Sul não apresenta uma variação significativa para a Q_{95} nas faixas mais críticas, de 50%-100% de comprometimento. Sua principal alteração ocorre nas faixas iniciais, com aumento expressivo de 0,35% para 3,79% na faixa de comprometimento entre 25% e 50%. Ao analisar a $Q_{7,10}$, nota-se um aumento mais significativo, principalmente nas faixas entre 50% e 100% de criticidade, com apenas uma leve diminuição na faixa inicial. Tais aumentos indicam que as demandas atuais possuem pouca pressão sob os recursos hídricos (estão concentradas na faixa menos crítica), e tendem a subir, porém de forma estável e linear.

As Unidades de Planejamento Baixo Paraíba do Sul, Piabanha, Rio Dois Rios e Rios Pomba e Muriaé destacam-se no cenário de maior pressão para 2045, apresentando um agravamento significativo nas faixas de maior comprometimento hídrico. O Baixo Paraíba do Sul foi a UP com maior redução no conforto hídrico, com queda de aproximadamente 12% das otobacias com demandas inferiores a 25% das disponibilidades, além de um salto expressivo na faixa de déficit (>100%), aumento aproximado de 3,6%. Já ao observar os resultados da $Q_{7,10}$, o aumento da criticidade é mais vertiginoso, passando a ter o segundo maior índice de otobacias em déficit em toda a bacia do Paraíba do Sul. Tais resultados expressivos, principalmente para uma vazão mais restritiva como a $Q_{7,10}$ indicam que tal UP apresenta tendências de suscetibilidade à cenários de aumento de demandas e/ou diminuição das disponibilidades. De modo semelhante, a UP Piabanha apresentou crescimento nas faixas mais críticas, com aumentos de 3,9% (Q_{95}) e 1,22% ($Q_{7,10}$) na condição de déficit e crescimento expressivo nas faixas intermediárias. Rio Dois Rios, já anteriormente em condição crítica, apresentou um aumento distribuído em suas classes, o que, embora menos acentuado, reflete uma pressão estrutural persistente que indica a intensificação dos efeitos já observados na cena atual. Por fim, a UP Rios Pomba e Muriaé experimentaram um

crescimento expressivo e proporcional em todas as faixas superiores, com destaque para o déficit hídrico, que quase triplica para a $Q_{7,10}$ (de 1,02% para 2,97%). Esses resultados indicam que essas quatro UPs devem ser prioritárias em ações de gestão, revisão de outorgas e investimentos em infraestrutura hídrica e conservação, de forma a mitigar os efeitos esperados do crescimento das demandas hídricas nos cenários futuros.

Quadro 5-14 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, Q₉₅ - Cenário Atual e de Maior Pressão (2045) – por unidade de planejamento

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento															
	Alto Paraíba do Sul		Rios Preto e Paraibuna		Rios Pomba e Muriaé		Médio Paraíba do Sul		Piabanha		Rio Dois Rios		Baixo Paraíba do Sul		Sub-bacia do Rio Pirai	
	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	99,74%	99,68%	99,90%	99,87%	98,40%	93,93%	99,51%	96,05%	93,45%	85,70%	88,02%	83,73%	92,30%	79,83%	99,94%	99,94%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	0,07%	0,10%	0,05%	0,04%	0,65%	3,18%	0,35%	3,79%	2,45%	8,23%	3,17%	5,34%	3,65%	11,43%	0,04%	0,02%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,05%	0,06%	0,02%	0,02%	0,25%	0,65%	0,02%	0,04%	2,40%	0,41%	0,78%	1,84%	1,11%	2,46%	0,02%	0,04%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,02%	0,03%	0,00%	0,02%	0,08%	0,70%	0,01%	0,02%	0,04%	0,08%	0,51%	0,49%	0,18%	2,45%	0,00%	0,00%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,13%	0,14%	0,03%	0,04%	0,62%	1,53%	0,11%	0,11%	1,65%	5,58%	7,52%	8,59%	0,25%	3,83%	0,00%	0,00%

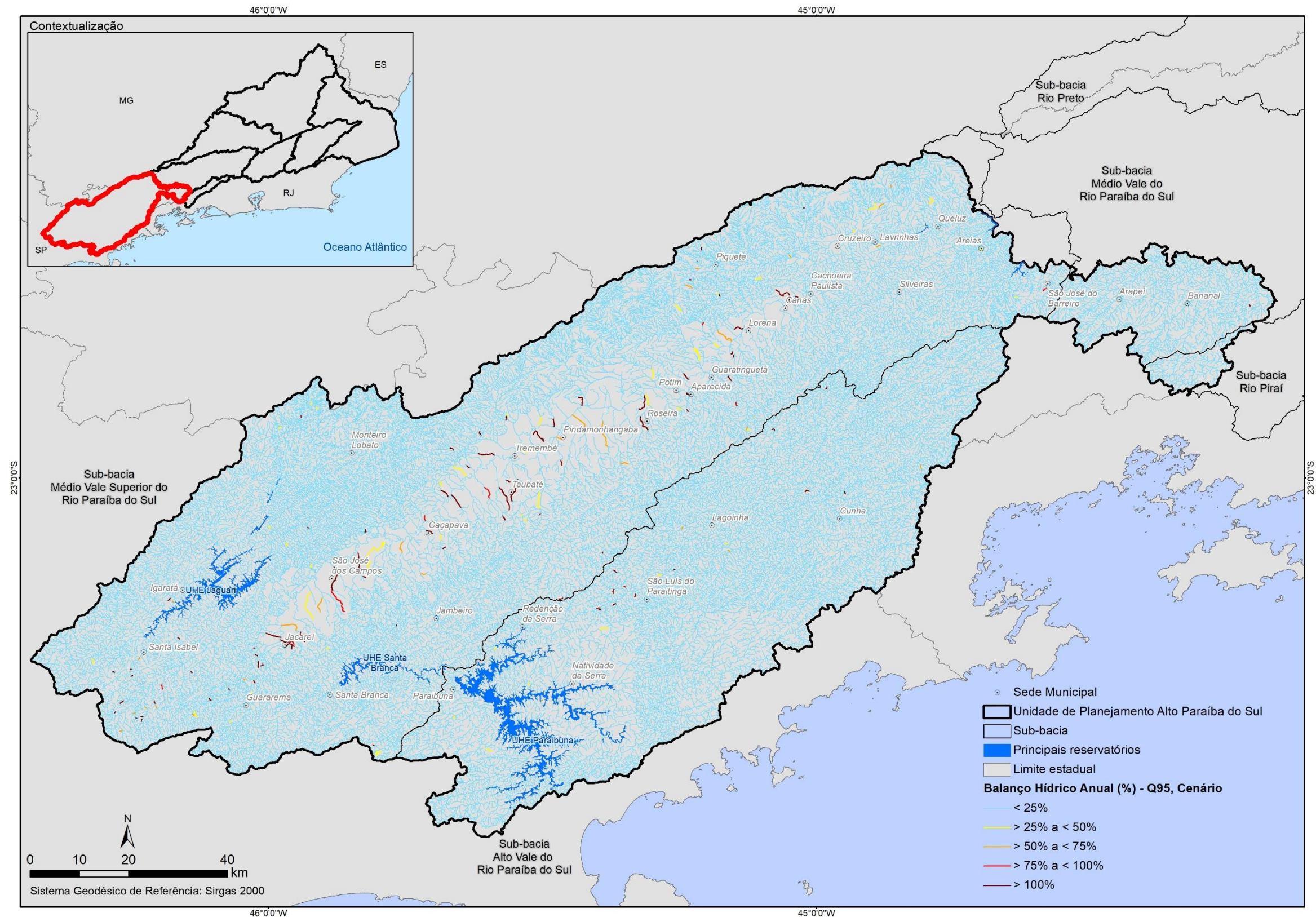
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 5-15 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, Q_{7,10} - Cenário Atual e de Maior Pressão (2045) – por unidade de planejamento

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento															
	Alto Paraíba do Sul		Rios Preto e Paraibuna		Rios Pomba e Muriaé		Médio Paraíba do Sul		Piabanha		Rio Dois Rios		Baixo Paraíba do Sul		Sub-bacia do Rio Pirai	
	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045	Cena atual	Maior Pressão - 2045
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	99,64%	99,43%	99,90%	99,37%	96,92%	89,90%	90,93%	88,53%	89,08%	84,16%	82,66%	76,28%	81,84%	71,62%	99,90%	99,48%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	0,10%	0,24%	0,03%	0,56%	1,49%	4,42%	6,35%	4,34%	5,98%	5,43%	4,90%	7,55%	11,05%	9,15%	0,06%	0,46%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,06%	0,06%	0,02%	0,01%	0,36%	1,82%	2,06%	4,49%	0,76%	4,57%	1,92%	2,68%	2,92%	7,34%	0,02%	0,02%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,03%	0,04%	0,01%	0,01%	0,20%	0,89%	0,25%	1,60%	0,07%	0,51%	1,08%	1,69%	1,40%	2,35%	0,02%	0,04%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,18%	0,23%	0,04%	0,05%	1,02%	2,97%	0,41%	1,04%	4,11%	5,33%	9,43%	11,81%	2,80%	9,53%	0,00%	0,00%

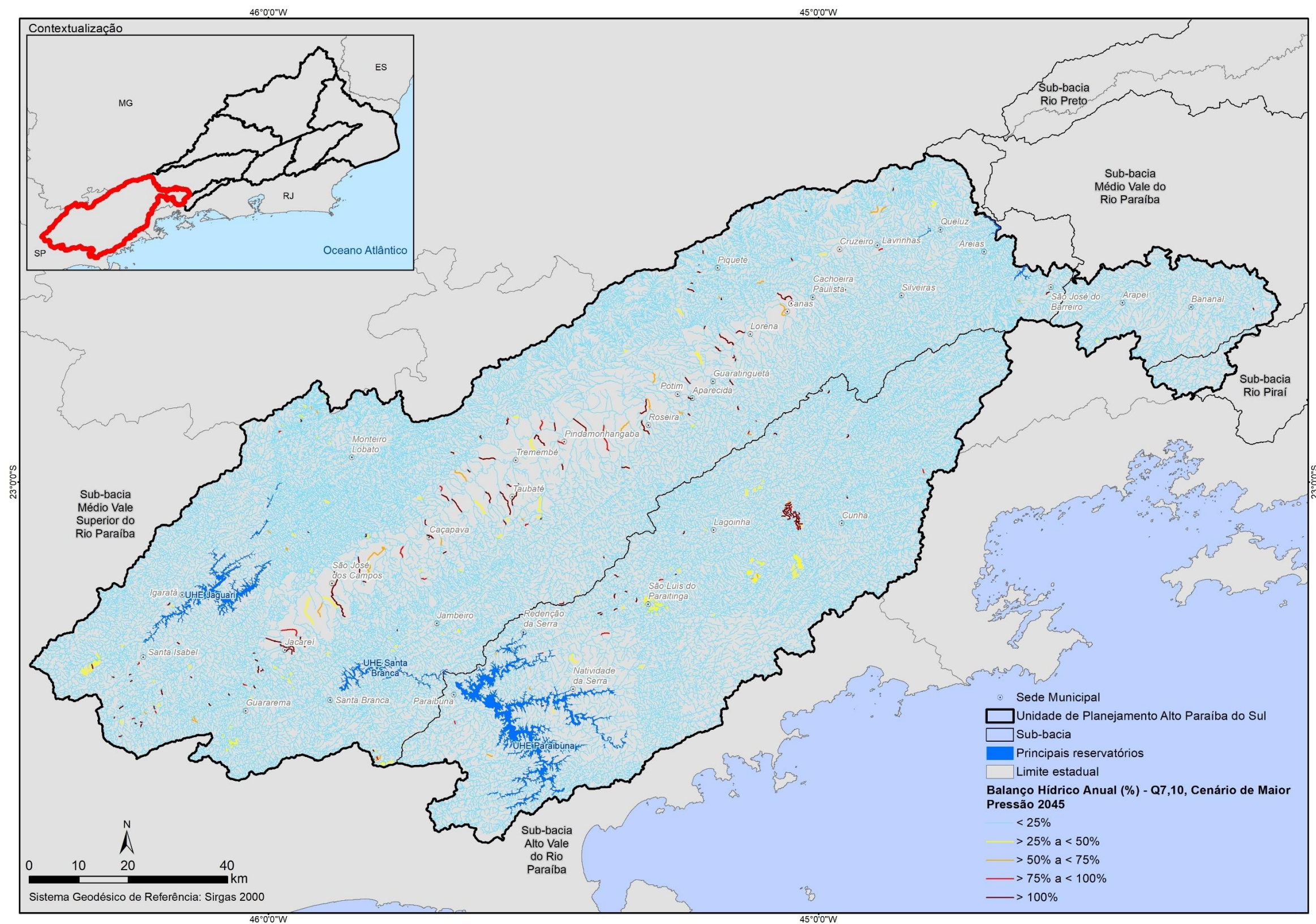
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-25 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, Cenário de Maior Pressão (2045) – UP Alto Paraíba do Sul



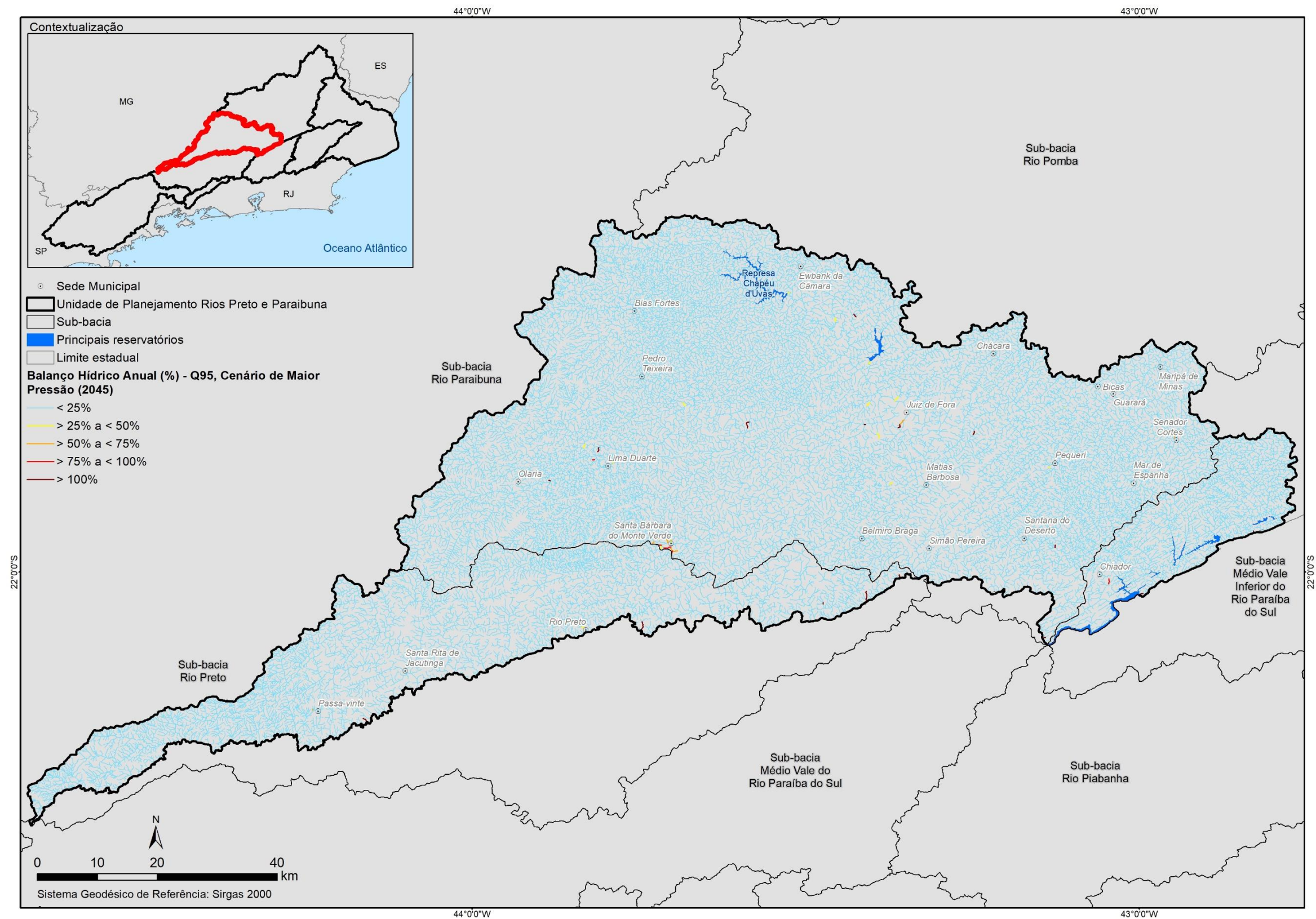
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-26 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q_{7,10}, Cenário de Maior Pressão (2045) – UP Alto Paraíba do Sul



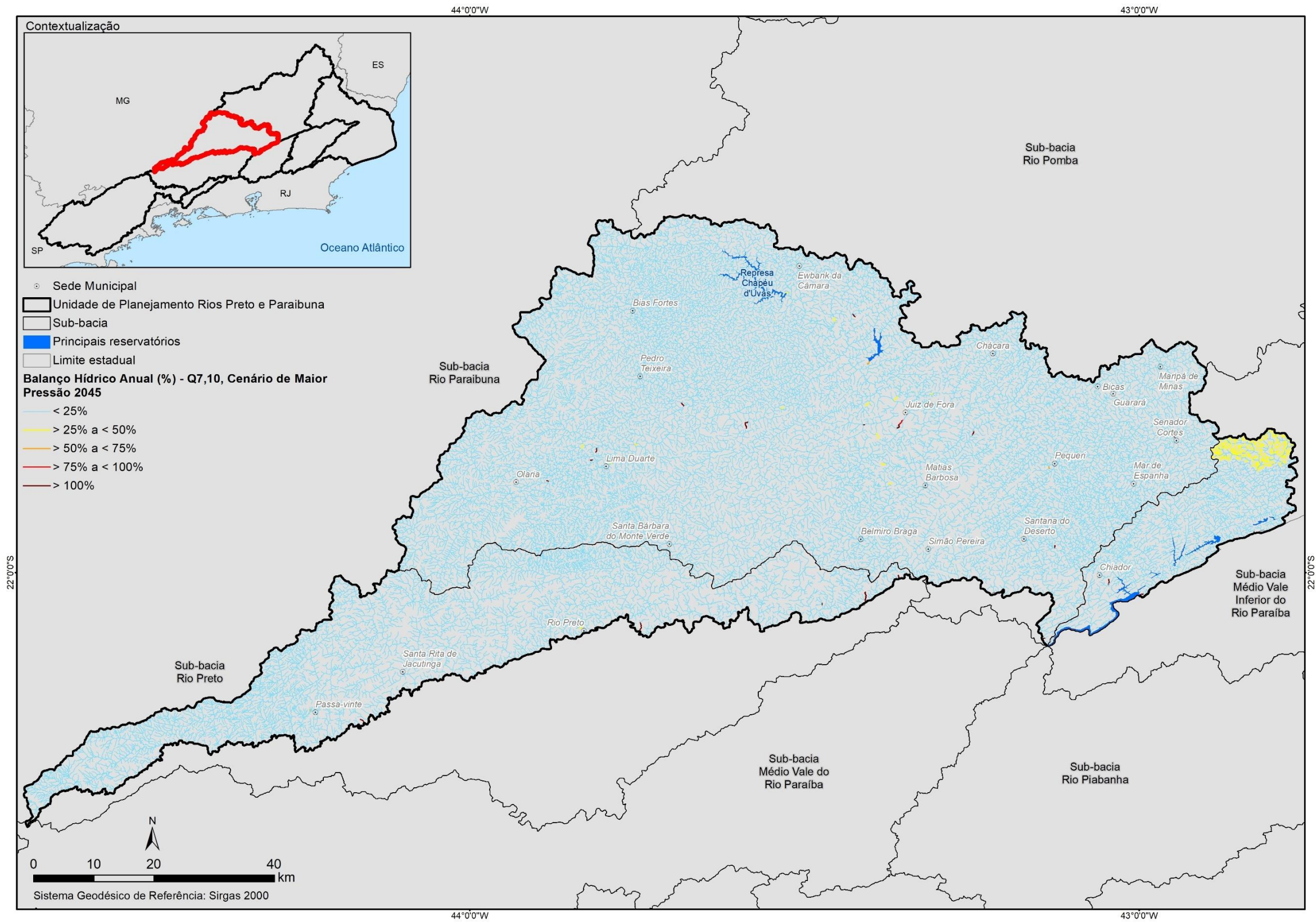
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-27 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, Cenário de Maior Pressão (2045) – UP Preto e Paraibuna



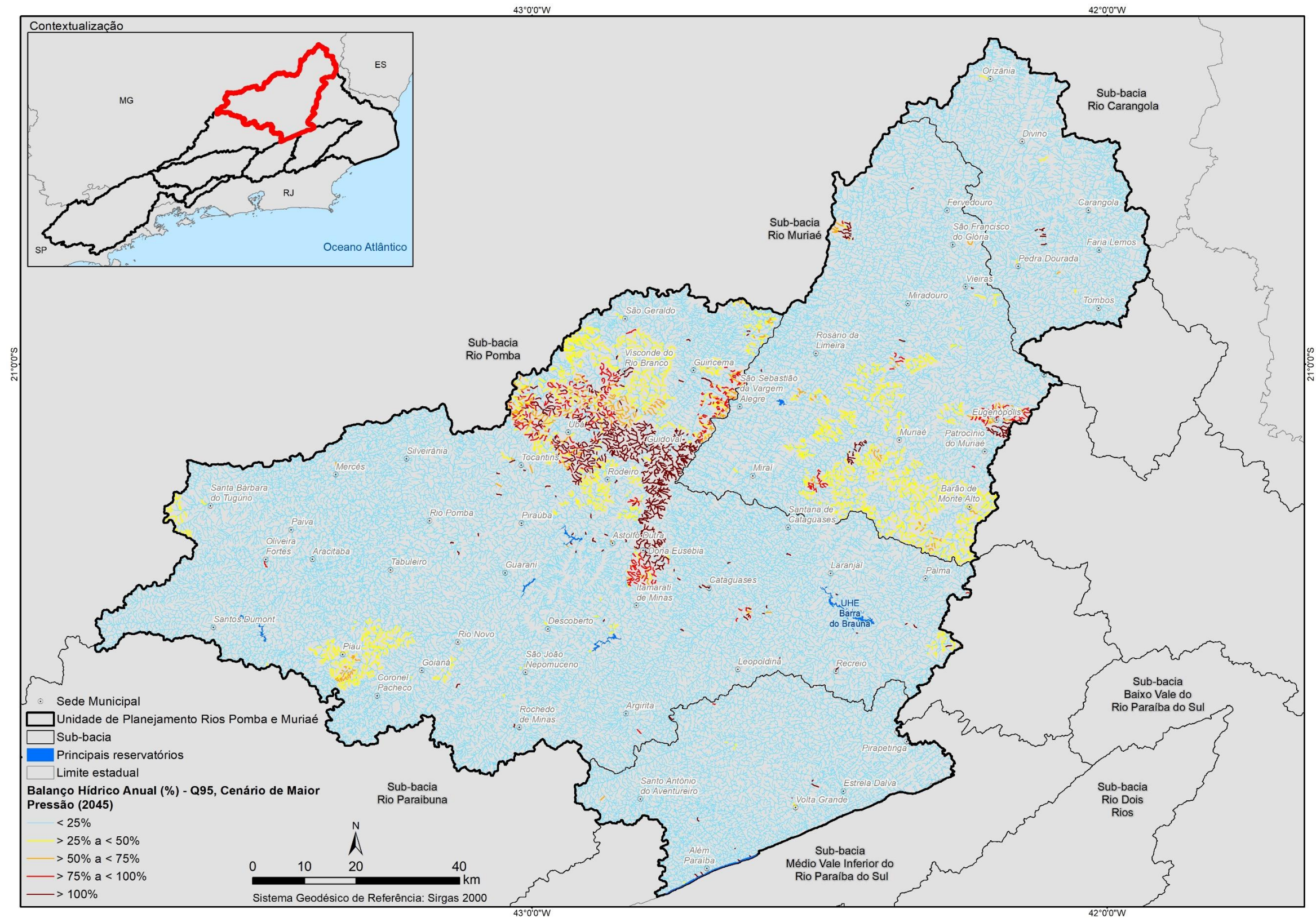
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-28 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q_{7,10}, Cenário de Maior Pressão (2045) – UP Preto e Paraibuna



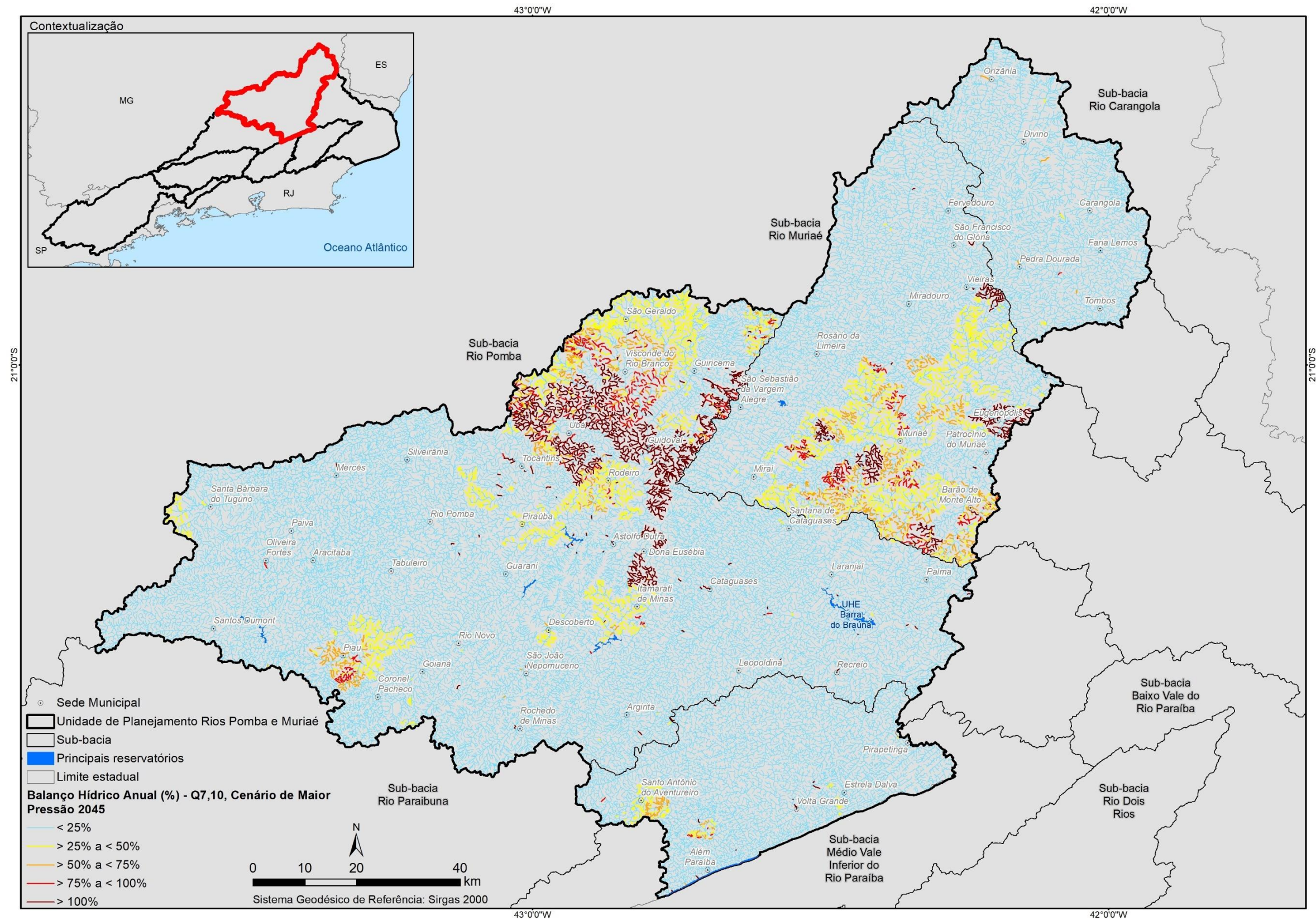
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-29 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, Cenário de Maior Pressão (2045) – UP Pomba e Muriaé



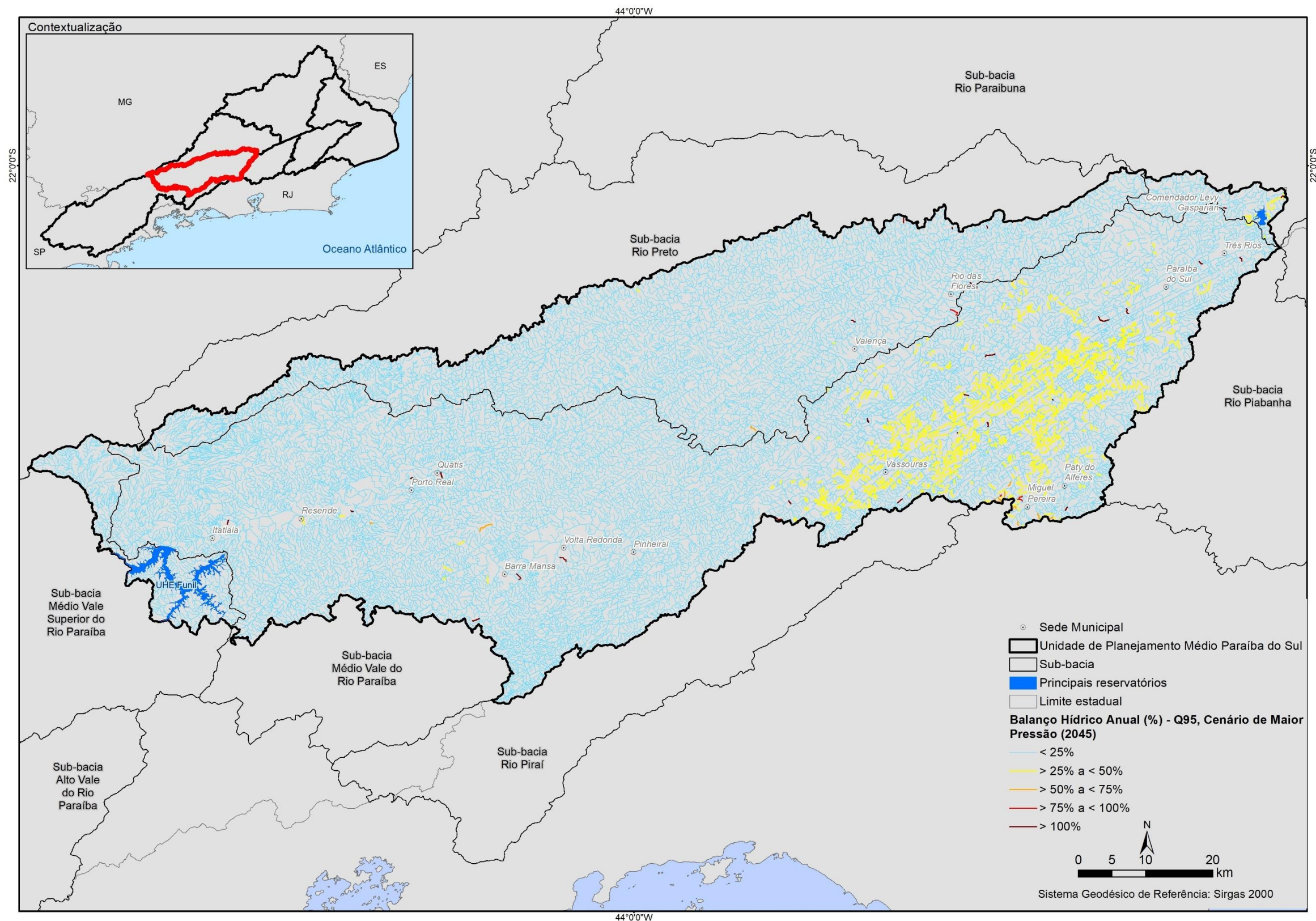
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-30 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q_{7,10}, Cenário de Maior Pressão (2045) – UP Pomba e Muriaé



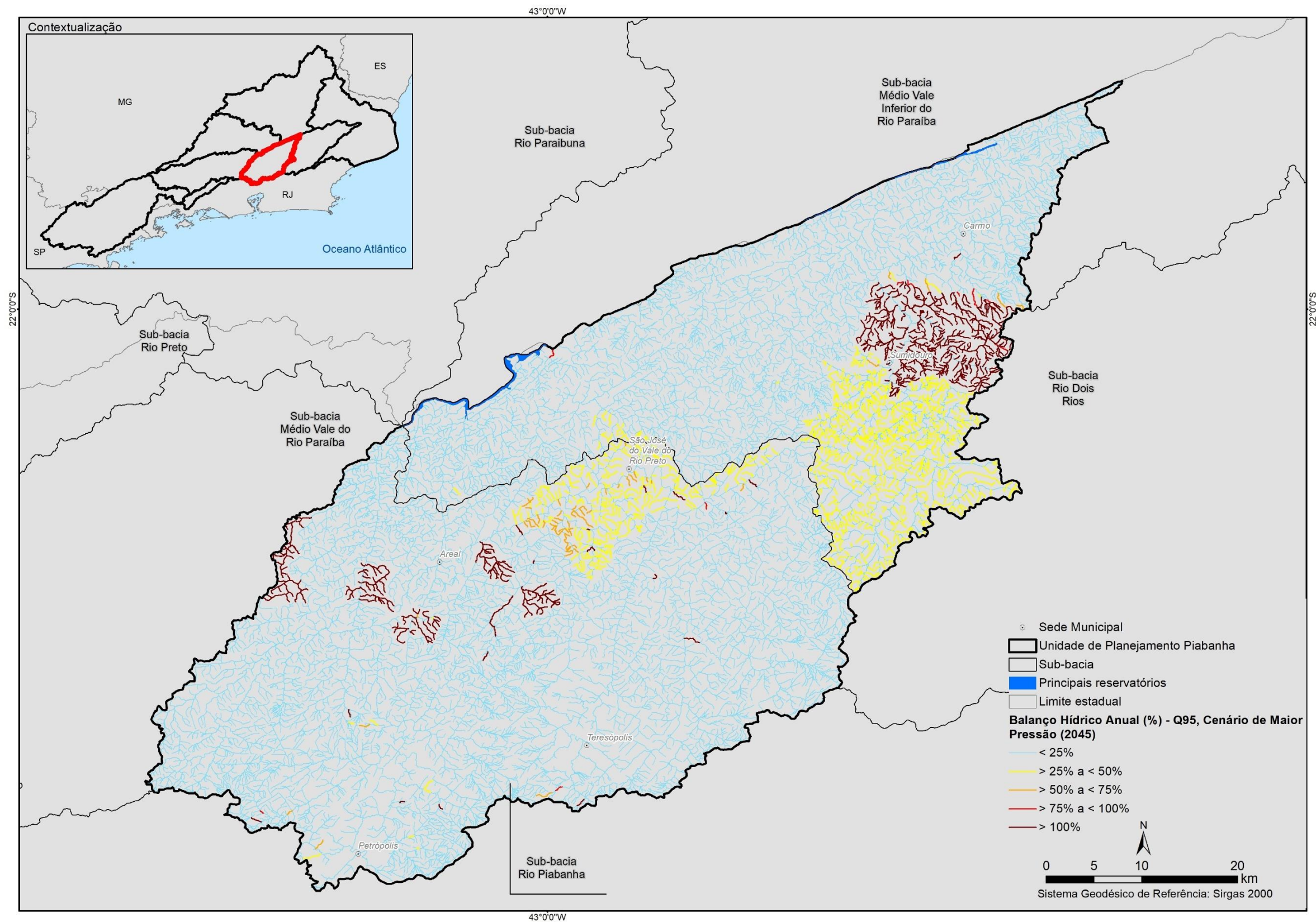
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-31 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q95, Cenário de Maior Pressão (2045) – UP Médio Paraíba do Sul



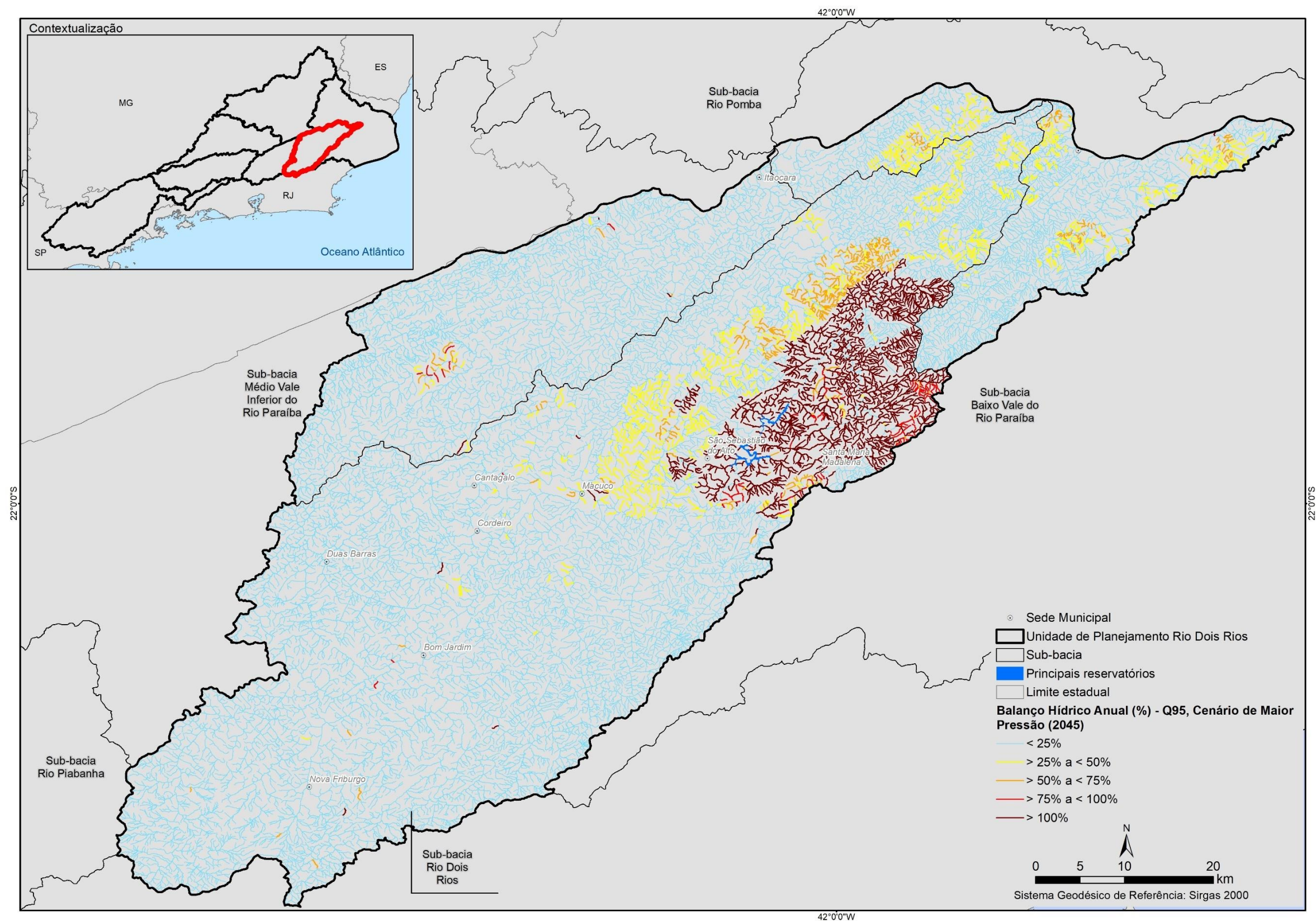
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-32 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q95, Cenário de Maior Pressão (2045) – UP Piabanha



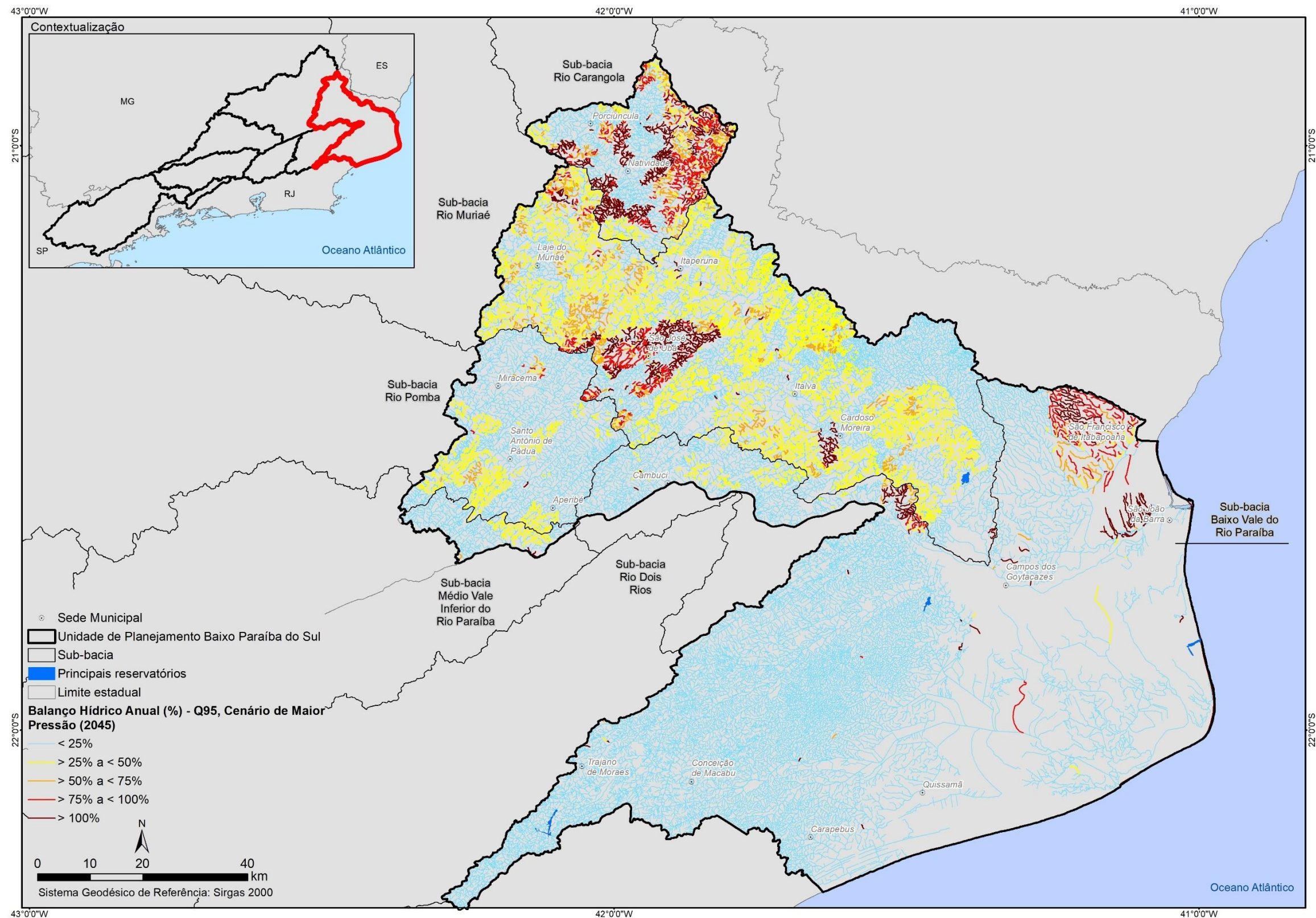
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-33 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q95, Cenário de Maior Pressão (2045) – UP Rio dois Rios



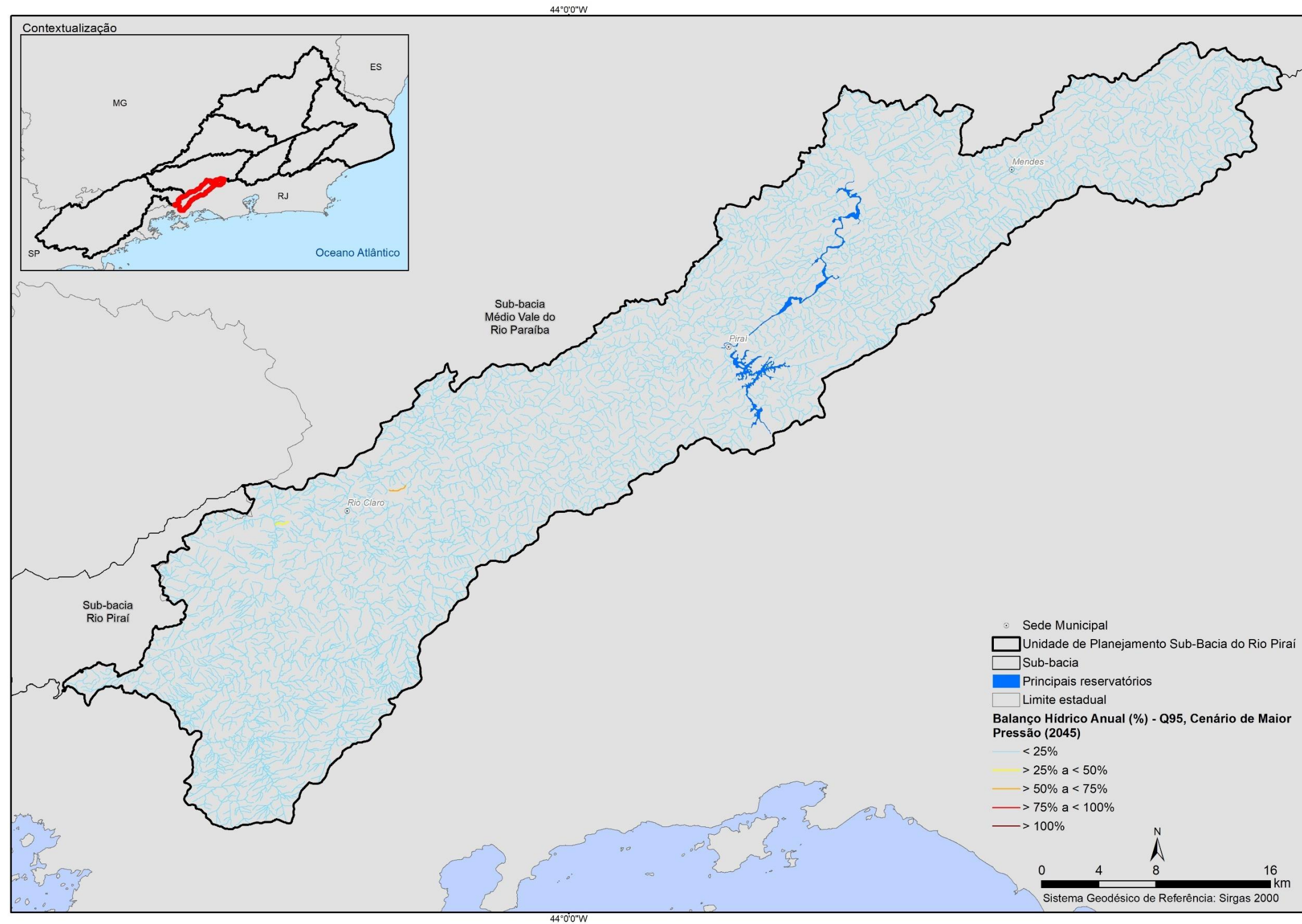
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-34 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q95, Cenário de Maior Pressão (2045) – UP Baixo Paraíba do Sul



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 5-35 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q95, Cenário de Maior Pressão (2045) – UP Rio Pirai



Fonte: elaborado pelo Consórcio

O Quadro 5-16 (Q_{95} , para todas as UPs) e o Quadro 5-17 ($Q_{7,10}$, para as UPs que a possuem como vazão de referência) apresentam uma síntese dos resultados de balanço hídrico no cenário de maior pressão (2045) por Unidades de Planejamento, apresentados em pontos chave da bacia e contrastados com as demandas superficiais.

Em relação às demandas, nota-se uma redução geral dos valores de abastecimento urbano humano, em função das dinâmicas projetadas para as décadas futuras na bacia, tanto populacionais quanto de índices de perdas. Por outro lado, os demais setores apresentam aumentos significativos de demandas, principalmente nos setores de irrigação e mineração. Além disso, são adicionadas demandas hídricas provenientes de novos reservatórios projetados na bacia, assim como aumentos nos volumes transpostos.

No Alto Paraíba do Sul, há um incremento de aproximadamente $7 \text{ m}^3/\text{s}$ nas demandas, com destaque para o setor de irrigação, que passa a ser o maior contribuinte, assim como o aumento projetado da vazão de transposição Jaguari – Atibainha que passa de $5,15 \text{ m}^3/\text{s}$ para $8,5 \text{ m}^3/\text{s}$). Apesar de tais aumentos, há uma manutenção dos balanços em relação ao cenário atual, indicando que grande parte dos pontos em que há aumento das demandas possuem disponibilidade para supri-las.

O Médio Paraíba do Sul possui notáveis demandas de cunho industrial, que sofrem incremento no cenário de maior pressão. As maiores mudanças podem ser observadas em alguns trechos afluentes do Paraíba do Sul após o local da transposição de Santa Cecília (entre os municípios de Barra do Piraí e Paraíba do Sul), que passam para a classe de 25%-50% de comprometimento hídrico.

A UP dos Rios Preto e Paraibuna mantém o padrão do cenário atual, com pouco comprometimento de suas disponibilidades e alta produção hídrica, que é distribuída no rio Paraíba do Sul. A UP da Sub-bacia do rio Piraí também mantém o comportamento do cenário atual, tendo como destaque a vazão recebida pela transposição, que é direcionada para o abastecimento da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

A UP Piabanha possui um dos maiores aumentos nas faixas críticas de balanço hídrico, porém concentrados próximos das regiões já com algum percentual de déficit no cenário atual. As otobacias em faixas intermediárias passam a ocupar as faixas mais críticas, assim como há o surgimento áreas com algum percentual de comprometimento. Tais aumentos são ocasionados principalmente pelo aumento da demanda no setor de irrigação. O aumento nas demandas de irrigação pode ser observado com clareza também na UP dos Rios Pomba e Muriaé (demandas mais do que o dobro das observadas no cenário atual): na região do rio

Xopotó e seus afluentes, há um incremento brusco nas faixas mais críticas de balanço hídrico. Além disso, cita-se também a criação de novos reservatórios nesta UP.

A UP Rio Dois Rios concentra uma das situações mais críticas da bacia, porém a diferença mais acentuada em relação ao cenário atual está nas faixas intermediárias de balanço hídrico, indicando que otobacias anteriormente sem comprometimento no cenário de maior pressão acabam sendo afetadas. Tal UP destaca-se nos cenários futuros pela criação de novos reservatórios para geração de energia (conforme apresentado no Produto 3) chegando a representar cerca de 30% de toda a demanda.

No Baixo Paraíba do Sul, em seu cenário atual há uma grande concentração nas faixas intermediárias de criticidade, entre 25% a 75% de comprometimento hídrico. No cenário futuro, há um aumento expressivo nessas otobacias, indicando demandas incipientes que não existiam no cenário atual. Isso pode ser observado na alteração das principais demandas na UP: irrigação aproximadamente dobra suas pressões, enquanto a evaporação de reservatórios ($2,7 \text{ m}^3/\text{s}$) e a demanda de usinas termoeletricas ($1,8 \text{ m}^3/\text{s}$) passam a ter alta relevância. Além disso, observa-se também o agravamento das regiões intermediárias no cenário atual, passando para índices críticos de balanço hídrico, e em alguns casos, déficit (principalmente na porção do rio Muriaé localizada na UP, assim como no rio Carangola e seus afluentes).

Quadro 5-16 – Análise de resultados do balanço hídrico superficial integrada à disponibilidade hídrica, para o cenário de maior pressão 2045 (vazão de referência Q_{95}).

Unidades de planejamento	Demandas Superficiais		Trechos principais				Observações
	Total (m³/s)	Preponderantes	Ponto analisado	Área de drenagem do ponto (km²)	Disponibilidade hídrica no trecho para a vazão de referência (m³/s) ¹	Vazões remanescentes no trecho (m³/s)	
Alto Paraíba do Sul	27,53	Aumento da transposição em 3,37 m³/s; Irrigação: 7,7 m³/s; Ab. Urbano: 4,8 m³/s; Mineração: 4,4 m³/s Indústria: 3,61 m³/s	Rio Paraíba do Sul, a jusante da UHE Paraibuna	4.279	26,79	26,33	Transposição de 8,5 m³/s para fora da BHPS (bacia do rio Piracicaba); Depende de regularização dos reservatórios de Paraibuna, Santa Branca e Jaguari
			Rio Paraíba do Sul próximo à entrada do reservatório Funil	13.023	119,1	107,28	
Rios Preto e Paraibuna	5,00	Mineração: 1,6 m³/s Ab. Urbano: 1,5 m³/s; Evaporação de reservatórios: 0,8 m³/s	Rio Preto na confluência com o rio Paraibuna	3.435	26,91	26,27	
			Rio Paraibuna na entrega ao Paraíba do Sul	8.602	67,05	66,23	
Rios Pomba e Muriaé	9,35	Irrigação: 4,1 m³/s; Ab, Urbano: 1,78 m³/s; Evaporação de reservatórios: 0,9 m³/s	Rio Pomba na entrega ao Paraíba do Sul	8.569	35,27	34,67	
			Rio Muriaé na entrega ao Paraíba do Sul	8.152	21,83	17,52	
Médio Paraíba do Sul	9,72	Indústria: 5,3 m³/s; Ab. Urbano: 2,1 m³/s	Rio Paraíba do Sul, no barramento de Santa Cecília	16.601	166,4	159,89	Transposição de 119 m³/s para a sub-bacia do rio Pirai
			Rio Paraíba do Sul, previamente ao encontro com os rios Paraibuna e Piabanha	19.487	71,03	70,13	
Piabanha	3,42	Irrigação: 1,7 m³/s; Ab Urbano: 0,8 m³/s;	Rio Piabanha na entrega ao Paraíba do Sul	2.067	12,57	12,39	

Unidades de planejamento	Demandas Superficiais		Trechos principais				Observações
	Total (m³/s)	Preponderantes	Ponto analisado	Área de drenagem do ponto (km²)	Disponibilidade hídrica no trecho para a vazão de referência (m³/s) ¹	Vazões remanescentes no trecho (m³/s)	
			Rio Paquerer na entrega ao Paraíba do Sul	757	4,72	3,34	
Rio Dois Rios	3,11	Evaporação de reservatórios: 1,1 m³/s; Ab, Urbano: 0,6 m³/s; Irrigação: 0,7 m³/s;	Rio Dois Rios na entrega ao Paraíba do Sul	3.163	13,8	13,02	
Baixo Paraíba do Sul	13,59	Irrigação: 5,2 m³/s; Evaporação de reservatórios 2,7 m³/s Termoeletricidade: 1,8 m³/s;	Rio Paraíba do Sul próximo à divisa dos municípios de Campos dos Goytacazes, São João da Barra e São Francisco de Itabapoana	55.535	240,74	230,34	
Sub-bacia do Rio Pirai	0,48	Ab, Urbano: 0,26 m³/s; Industria: 0,17 m³/s;	Rio Pirai na entrega ao Paraíba do Sul	1.116	10,79	10,76	Recebe 119 m³/s por transposição, que são enviados para fora da BHPS, para a bacia do rio Guandu

¹ Disponibilidades hídricas obtidas do EDH-PS

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 5-17 – Análise de resultados do balanço hídrico superficial integrada à disponibilidade hídrica, para o cenário de maior pressão 2045 (UPs com vazão de referência $Q_{7,10}$).

Unidades de planejamento	Demandas Superficiais		Trechos principais				Observações
	Total (m³/s)	Preponderantes	Ponto analisado	Área de drenagem do ponto (km²)	Disponibilidade hídrica no trecho para a vazão de referência (m³/s) ¹	Vazões remanescentes no trecho (m³/s)	
Alto Paraíba do Sul	27,53	Aumento da transposição em 3,37 m³/s; Irrigação: 7,7 m³/s; Ab. Urbano: 4,8 m³/s; Mineração: 4,4 m³/s Indústria: 3,61 m³/s	Rio Paraíba do Sul, a jusante da UHE Paraibuna	4.279	21,12	21	Transposição de 8,5 m³/s para fora da BHPS (bacia do rio Piracicaba); Depende de regularização dos reservatórios de Paraibuna, Santa Branca e Jaguari
			Rio Paraíba do Sul próximo à entrada do reservatório Funil	13.023	81,46	67,23	
Rios Preto e Paraibuna	5,00	Mineração: 1,6 m³/s Ab. Urbano: 1,5 m³/s; Evaporação de reservatórios: 0,8 m³/s	Rio Preto na confluência com o rio Paraibuna	3.435	20,87	20,24	
			Rio Paraibuna na entrega ao Paraíba do Sul	8.602	52,52	51,73	
Rios Pomba e Muriaé	9,35	Irrigação: 4,1 m³/s; Ab. Urbano: 1,78 m³/s; Evaporação de reservatórios: 0,9 m³/s	Rio Pomba na entrega ao Paraíba do Sul	8.569	25,42	24,85	
			Rio Muriaé na entrega ao Paraíba do Sul	8.152	13,31	9,21	

¹ Disponibilidades hídricas obtidas do EDH-PS

Fonte: elaborado pelo Consórcio

6. BALANÇO HÍDRICO SUBTERRÂNEO

Este item apresenta os resultados do balanço hídrico subterrâneo da BHPS. Inicialmente é apresentada uma caracterização da hidrogeologia da bacia (Item 6.1) e, em seguida, são apresentados os resultados para o balanço hídrico (Item 6.2).

6.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA HIDROGEOLOGIA DA BACIA

A hidrogeologia compreende os recursos hídricos subterrâneos encontrados entre formações rochosas abaixo da superfície, sendo fortemente influenciada pelo tipo de rocha presente, sua porosidade, permeabilidade, transmissividade e arranjo estrutural. Na bacia do rio Paraíba do Sul, essas características geológicas são fundamentais para o entendimento do comportamento dos aquíferos, que se dividem em dois tipos: os aquíferos fraturados, associados às formações cristalinas, e os aquíferos porosos, relacionados às formações sedimentares (PIRH, 2021). Esses dois tipos de aquíferos apresentam diferentes capacidades de armazenamento e qualidade da água. Os aquíferos fraturados cobrem cerca de 93% da área da bacia e caracterizam-se por baixa porosidade e permeabilidade, onde a água se acumula em fraturas heterogêneas. A vazão dos poços nesses aquíferos depende fortemente da localização, interligação e tamanho das fraturas, resultando geralmente em vazões reduzidas. Por outro lado, os aquíferos porosos ocupam apenas 7% da área e estão localizados na Unidade de Planejamento do Baixo Paraíba do Sul, na Bacia Sedimentar de Campos, nas formações aluvionares de Taubaté, Resende, Volta Redonda e no trecho paulista da bacia, apresentando elevada porosidade e permeabilidade, o que proporciona vazões mais significativas nos poços (PIRH, 2021).

Na região Noroeste do Rio de Janeiro, as águas subterrâneas captadas provêm, principalmente, de aquíferos fraturados. A depender da localização hidrogeológica, especialmente em zonas de descontinuidade, é possível obter vazões elevadas. Entretanto, é comum encontrar teores elevados de ferro na água desses poços, enquanto águas carbogasosas são mais presentes em poços superficiais. Os municípios dessa região incluem Aperibé, Cambuci, Varre-Sai, São José de Ubá, Santo Antônio de Pádua, Miracema, Natividade, Porciúncula, Italva, Itaocara, Itaperuna e Laje do Muriaé (PIRH, 2021). Já na região Norte do estado, que abrange Campos dos Goytacazes, São Francisco de Itabapoana, São João da Barra, São Fidélis e Cardoso Moreira, observa-se boa qualidade da água e alto potencial de vazão, embora possam ocorrer concentrações elevadas de ferro e, ocasionalmente, cloretos, dependendo da profundidade dos poços (PIRH, 2021).

Na região Serrana, as características hidrogeológicas não apresentam grandes destaques, excetuando-se um poço com valores elevados de vazão e capacidade. Essa área inclui municípios como Bom Jardim, Cantagalo, São José do Vale do Rio Preto, Teresópolis, Petrópolis, Carmo, Cordeiro, Duas Barras, Macuco, Nova Friburgo, Santa Maria Madalena, São Sebastião do Alto, Sumidouro e Trajano de Moraes (PIRH, 2021). No Médio Paraíba do Sul, os aquíferos porosos se destacam pelo alto potencial de vazão e pela ausência de risco associado a altos teores de ferro na água. Essa região inclui os municípios de Barra Mansa, Rio das Flores, Resende, Porto Real, Itatiaia, Quatis, Rio Claro, Piraí, Valença e Volta Redonda (PIRH, 2021). A região Centro Sul apresenta potencial variável nos poços, abrangendo os municípios de Vassouras, Três Rios, Miguel Pereira, Paraíba do Sul, Areal, Comendador Levy Gasparian, Engenheiro Paulo de Frontin, Mendes, Paty do Alferes e Sapucaia (PIRH, 2021).

Na porção mineira da bacia, devido ao relevo acidentado e montanhoso, a infiltração das águas é limitada. A pluviosidade anual varia entre 1.000 e 1.500 mm, sendo que a parte sul da região apresenta índices superiores a 1.500 mm (PIRH, 2021).

O principal manancial subterrâneo da bacia é o aquífero da Bacia Sedimentar de Taubaté, localizado no Médio Paraíba do Sul. Com 170 km de extensão e largura média de 15 km, esse aquífero possui um ambiente deposicional fluvio-lagunar composto por conglomerados de arenitos, siltitos e argilitos, estando presente nas regiões de Resende, Tremembé, São Paulo e Pindamonhangaba. Apesar de sua importância, foi constatado que em vários pontos os níveis de ferro na água extraída estão acima dos limites permitidos, o que representa riscos à saúde (PIRH, 2021; CEIVAP, 2025).

Conforme mencionado pelo estudo de Água e Solo (2024), exceto pela ocorrência das bacias sedimentares ao longo do vale e na região da desembocadura, grande parte do território da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul apresenta como substrato rochas do embasamento cristalino, as quais formam aquíferos do tipo fissural, que tem como característica a elevada heterogeneidade e baixa produtividade, embora, em função de condições locais favoráveis, possam produzir boas vazões.

Para a caracterização das Unidades Hidroestratigráficas da BHPS em termos de produtividade hídrica, a Figura 6-1 apresenta a distribuição espacial em 6 classes de produtividade. Verifica-se que as classes (4) Fr e (5) Fr correspondem às maiores extensões dentro da área da BHPS, abrangendo um total de 49.034 km², o que representa 79,6% da bacia. Essas classes estão associadas a aquíferos do tipo fissural, caracterizados por uma

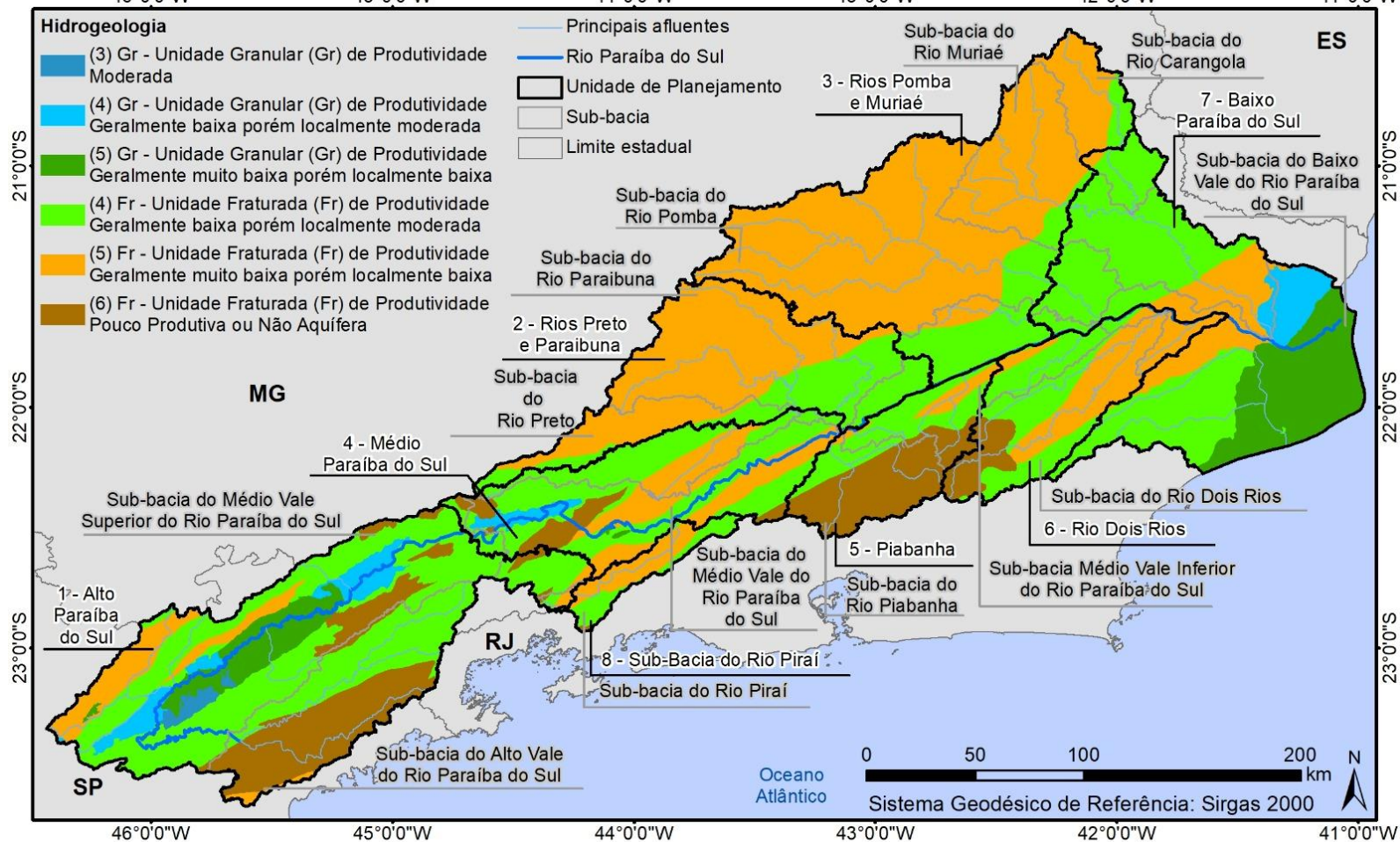
produtividade predominantemente baixa a muito baixa, podendo apresentar, em determinadas localidades, produtividade moderada a baixa.

No que diz respeito ao sistema fraturado, a classe (4) Fr, embora geralmente associada a baixos níveis de produtividade, pode apresentar condições localmente mais favoráveis (produtividade moderada). Essa condição é verificada ao longo do vale principal do rio Paraíba do Sul, em áreas de menor relevo, especialmente nas UPs Alto Paraíba do Sul, Médio Paraíba do Sul e Baixo Paraíba do Sul, representando mais de 50% da área destas UPs. Por outro lado, as zonas com menor potencial de exploração hídrica situam-se, de modo geral, nas bordas da bacia, em terrenos mais elevados, nas proximidades das nascentes e divisores de água.

A Classe (5) Fr aparece de forma mais pronunciada nas UPs Rios Preto e Paraibuna, Rios Pomba e Muriaé e Sub-bacia do Rio Pirai, indicando que essas regiões se caracterizam por uma produtividade baixa. Na UP Piabanha ocorre o predomínio da unidade hidroestratigráfica (6) Fr, que é caracterizada como pouco produtiva ou não aquífera.

A classe (3) Gr, representativa de unidades aquíferas granulares com produtividade moderada, apresenta o maior potencial hídrico e está localizada em uma pequena porção (1,6%) da UP Alto Paraíba do Sul, no estado de São Paulo, em áreas vinculadas à Bacia Sedimentar de Taubaté.

46°0'0"W 45°0'0"W 44°0'0"W 43°0'0"W 42°0'0"W 41°0'0"W



Fonte: Água e Solo (2024)

6.2. RESULTADOS PARA A CENA ATUAL E CENA FUTURA

As demandas hídricas subterrâneas consideradas foram obtidas do Estudo de Demandas da Bacia Hidrográfica – *EDBH-PS*, Produto 3 (item 4.2.1), sendo que a demanda subterrânea total corresponde à soma das demandas para todos os tipos de uso. Para contextualizar as demandas subterrâneas obtidas no produto anterior o Quadro 5-16 apresenta os resultados, por unidade de planejamento e setor usuário, considerando a cena atual e o cenário de maior pressão (cena futura com horizonte de 20 anos – 2045).

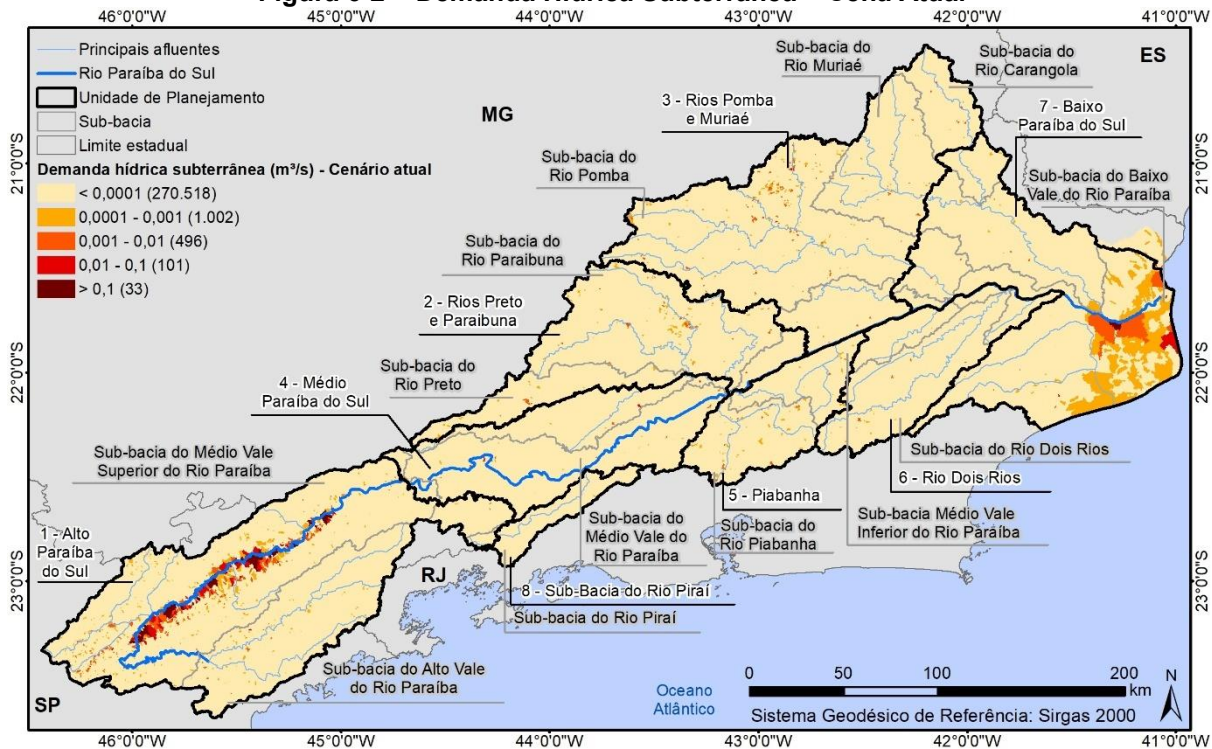
A análise das demandas hídricas subterrâneas revela um aumento expressivo no consumo projetado até o cenário de maior pressão em 2045, comparado à cena atual. O uso total passa de 13,01 m³/s para 16,31 m³/s, representando um acréscimo de aproximadamente 25%. A UP Alto Paraíba do Sul é a mais demandante, com elevação de 10,35 m³/s para 12,70 m³/s, impulsionada, principalmente, pelos setores de mineração (de 6,11 m³/s para 7,67 m³/s) e indústria (de 3,00 m³/s para 3,57 m³/s). Observa-se, também, crescimento relevante nas demandas para dessedentação animal, que praticamente dobram no total (de 0,95 m³/s para 1,71 m³/s). A Figura 6-2 e Figura 6-3 apresentam, respectivamente, a espacialização das demandas totais subterrâneas na BHPS para a cena atual e cenário futuro de maior pressão (2045).

Quadro 6-1 – Resumo das demandas hídricas subterrâneas, por unidade de planejamento, na bacia do rio Paraíba do Sul considerando a cena atual e o cenário de Maior Pressão (2045).

UP	Demandas Hídricas Subterrâneas (m³/s) – Cena atual						
	Abastecimento Urbano	Abastecimento Rural	Dessedentação Animal	Irrigação	Indústria	Mineração	Total
1 - Alto Paraíba do Sul	0,81	0,23	0,17	0,05	3,00	6,11	10,35
2 - Rios Preto e Paraibuna	0,09	0,06	0,25	0,00	0,03	0,00	0,45
3 - Rios Pomba e Muriaé	0,25	0,21	0,26	0,08	0,18	0,00	0,98
4 - Médio Paraíba do Sul	0,02	0,04	0,00	0,00	0,11	0,00	0,17
5 - Piabanha	0,05	0,09	0,06	0,00	0,18	0,00	0,39
6 - Rio Dois Rios	0,01	0,03	0,00	0,03	0,03	0,00	0,09
7 - Baixo Paraíba do Sul	0,17	0,09	0,21	0,03	0,06	0,00	0,57
8 - Sub-bacia do Rio Piraí	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Total	1,41	0,76	0,95	0,19	3,58	6,12	13,01
UP	Demandas Hídricas Subterrâneas (m³/s) – Cenário Maior Pressão, 2045						
	Abastecimento Urbano	Abastecimento Rural	Dessedentação Animal	Irrigação	Indústria	Mineração	Total
1 - Alto Paraíba do Sul	0,79	0,30	0,3	0,07	3,57	7,67	12,70
2 - Rios Preto e Paraibuna	0,10	0,04	0,46	0,01	0,04	0,00	0,65
3 - Rios Pomba e Muriaé	0,27	0,17	0,54	0,21	0,22	0,00	1,41
4 - Médio Paraíba do Sul	0,02	0,04	0,00	0,00	0,16	0,00	0,22
5 - Piabanha	0,04	0,13	0,10	0,00	0,23	0,01	0,51
6 - Rio Dois Rios	0,01	0,04	0,00	0,05	0,03	0,00	0,13
7 - Baixo Paraíba do Sul	0,12	0,11	0,31	0,07	0,07	0,00	0,68
8 - Sub-bacia do Rio Piraí	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Total	1,36	0,83	1,71	0,42	4,32	7,68	16,31

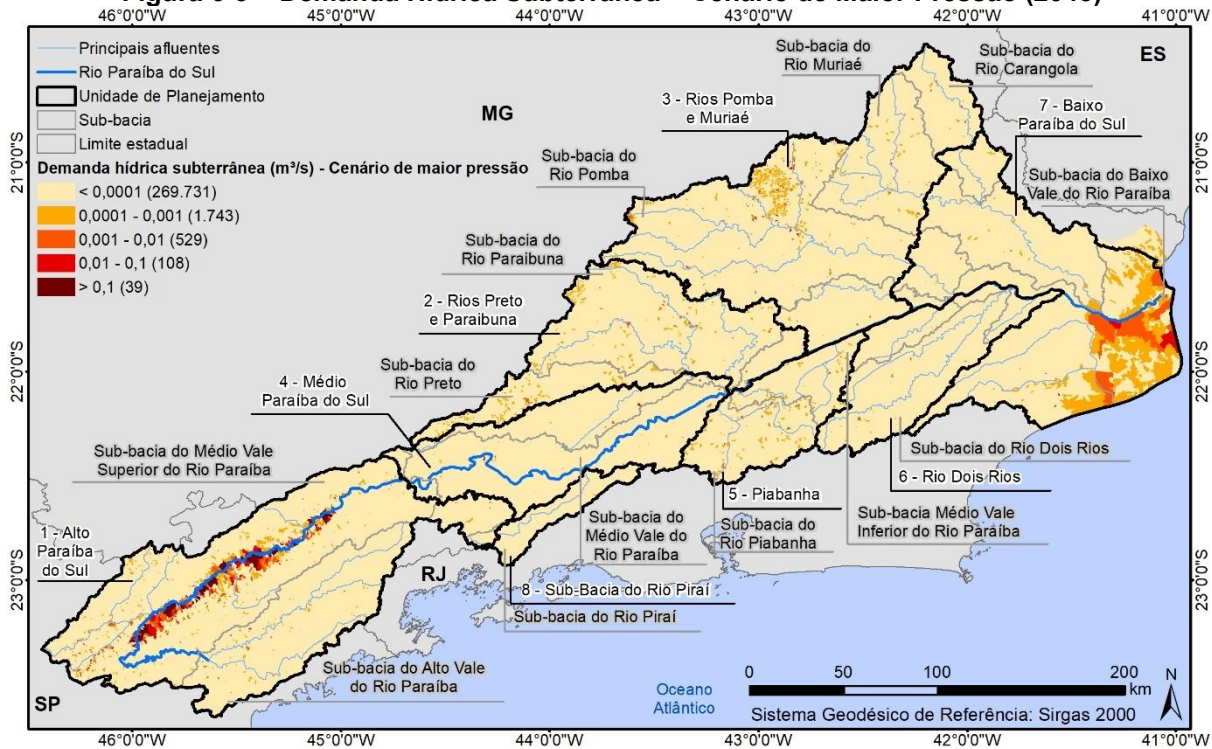
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 6-2 – Demanda Hídrica Subterrânea – Cena Atual



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 6-3 – Demanda Hídrica Subterrânea – Cenário de Maior Pressão (2045)



Fonte: elaborado pelo Consórcio

A partir da metodologia descrita no Item 4.3.5, foram estimadas as reservas exploráveis da bacia e estas foram comparadas às demandas subterrâneas para determinar o grau de comprometimento. O Quadro 6-2 apresenta uma síntese dos resultados de balanço hídrico subterrâneo na cena atual e o Quadro 6-3 no cenário de maior pressão (2045) em pontos chave da bacia (foram considerados os exutórios de cada sub-bacia) e contrastados com as demandas de águas subterrâneas.

Ressalta-se que, embora existam incertezas inerentes à metodologia utilizada para estimar a reserva explotável, os resultados obtidos neste estudo estão em consonância com a ordem de grandeza de estudos anteriores realizados na bacia. No Plano Estadual de Recursos Hídricos de São Paulo (PERH-SP), a UGRH II – correspondente à Unidade de Planejamento Alto Paraíba do Sul – apresenta uma reserva explotável estimada em 21 m³/s. Já o presente estudo estimou esse valor em 37 m³/s. Apesar da diferença significativa, é importante destacar que os dados do PERH-SP foram obtidos com base em equações de regionalização de vazões desenvolvidas em 1987 pelo DAEE, enquanto o presente estudo se baseia em dados mais recentes de disponibilidade hídrica, conforme o Estudo das Disponibilidades Hídricas do Paraíba do Sul (EDH-PS – Profill, 2024).

Adicionalmente, segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2023), a bacia do rio Paraíba do Sul como um todo possui uma vazão de recarga potencial direta estimada em 108,6 m³/s e uma vazão de recarga potencial explotável de 41,27 m³/s. No exutório da bacia, o valor de reserva explotável obtido neste estudo foi de 54,9 m³/s, indicando boa coerência com as estimativas de abrangência regional.

Quadro 6-2 – Demandas subterrâneas em relação às reservas explotáveis – Cena Atual

Sub-bacia*	Demandas subterrâneas		Reserva Explotável (m³/s)	Balanço Hídrico (%)
	Total (m³/s)	Preponderantes		
Alto Vale do Rio Paraíba do Sul	0,12	Ab. Rural: 0,04 m³/s Dessedentação: 0,06 m³/s	5,7	2,2%
Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul	10,2	Ab. Urbano: 0,81 m³/s Indústria: 3,0 m³/s Mineração: 6,11 m³/s	37,6	27,2%
Rio Preto	0,11	Ab. Urbano: 0,03 m³/s Ab. Rural: 0,02 m³/s Dessedentação: 0,05 m³/s	6,0	1,8%
Rio Paraibuna	0,36	Ab. Urbano: 0,07 m³/s Dessedentação: 0,18 m³/s	14,5	2,5%
Rio Pomba	0,74	Ab. Urbano: 0,19 m³/s Dessedentação: 0,18 m³/s	9,9	7,4%
Rio Carangola	0,08	Ab. Rural: 0,03 m³/s Dessedentação: 0,04 m³/s	1,5	5,6%
Rio Muriaé	0,26	Ab. Rural: 0,06 m³/s Dessedentação: 0,13 m³/s	8,5	3,1%
Médio Vale do Rio Paraíba do Sul*	0,16	Ab. Rural: 0,04 m³/s Indústria: 0,1 m³/s	16,7	1,0%

Sub-bacia*	Demandas subterrâneas		Reserva Explotável (m³/s)	Balanço Hídrico (%)
	Total (m³/s)	Preponderantes		
Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul	0,17	Ab. Urbano: 0,03 m³/s Ab. Rural: 0,03 m³/s Dessedentação: 0,09 m³/s	32,3	0,5%
Rio Piabanha	0,33	Ab. Rural: 0,08 m³/s Indústria: 0,18 m³/s	3,1	10,5%
Rio Dois Rios	0,09	Ab. Rural: 0,03 m³/s Indústria: 0,03 m³/s	3,8	2,3%
Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul	0,42	Ab. Urbano: 0,17 m³/s Dessedentação: 0,09 m³/s	54,9	0,8%
Rio Pirai	0,01	-	3,3	0,3%
Total	13,01	-	-	-

*Todos os resultados foram gerados no exutório de cada sub-bacia, com exceção da sub-bacia Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, onde a disponibilidade hídrica subterrânea apresentada é a montante da transposição do barramento de Santa Cecília devido à influência da transposição nos resultados a jusante.

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 6-3 – Demandas subterrâneas em relação às reservas explotáveis – Cenário futuro de Maior Pressão (2025)

Sub-bacia	Demandas subterrâneas		Reserva Explorável (m³/s)	Balanço Hídrico (%)
	Total (m³/s)	Preponderantes		
Alto Vale do Rio Paraíba do Sul	0,19	Ab. Rural: 0,06 m³/s Dessedentação: 0,1 m³/s	5,7	3,4%
Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul	12,5	Ab. Urbano: 0,79 m³/s Indústria: 3,5 m³/s Mineração: 7,67 m³/s	37,6	33,2%
Rio Preto	0,16	Ab. Urbano: 0,03 m³/s Ab. Rural: 0,02 m³/s Dessedentação: 0,1 m³/s	6,0	2,6%
Rio Paraíba	0,53	Ab. Urbano: 0,08 m³/s Dessedentação: 0,34 m³/s	14,5	3,6%
Rio Pomba	1,08	Ab. Urbano: 0,21 m³/s Dessedentação: 0,4 m³/s	9,9	10,9%
Rio Carangola	0,12	Ab. Rural: 0,04 m³/s Dessedentação: 0,06 m³/s	1,5	8,0%
Rio Muriaé	0,38	Ab. Rural: 0,08 m³/s Dessedentação: 0,22 m³/s	8,5	4,4%
Médio Vale do Rio Paraíba do Sul*	0,21	Ab. Rural: 0,04 m³/s Indústria: 0,14 m³/s	16,7	1,3%
Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul	0,24	Ab. Urbano: 0,03 m³/s Ab. Rural: 0,03 m³/s Dessedentação: 0,15 m³/s	32,3	0,8%
Rio Piabanha	0,41	Ab. Rural: 0,11 m³/s Indústria: 0,22 m³/s	3,1	13,1%
Rio Dois Rios	0,11	Ab. Rural: 0,04 m³/s Indústria: 0,03 m³/s	3,8	3,0%
Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul	0,47	Ab. Urbano: 0,12 m³/s Dessedentação: 0,13 m³/s	54,9	0,8%
Rio Pirai	0,01	-	3,3	0,2%
Total	16,31	-	-	-

*Todos os resultados foram gerados no exutório de cada sub-bacia, com exceção da sub-bacia Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, onde a disponibilidade hídrica subterrânea apresentada é a montante da transposição do barramento de Santa Cecília devido à influência da transposição nos resultados a jusante.

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Os resultados do balanço hídrico subterrâneo (apresentados no Quadro 6-2 e no Quadro 6-3), mostram que, apesar do crescimento projetado da demanda até 2045, nenhuma das sub-bacias avaliadas atinge condição de escassez crítica ou muito crítica, conforme os critérios da Deliberação CRH nº 146/2012 (CRH, 2020). Mesmo no cenário de maior pressão os valores de comprometimento se mantêm abaixo de 50% da reserva explorável em todas as sub-bacias. Contudo, algumas áreas já apresentam percentuais de comprometimento relevantes e merecem atenção, destacando-se:

- **Sub-bacia Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul (UP Alto Paraíba do Sul):** apresenta o maior grau de comprometimento nos dois cenários – 27,1% na cena atual (situação potencialmente preocupante) e 33,2% em 2045 (situação preocupante) –, refletindo a forte concentração de demandas industriais, do setor minerário e de abastecimento urbano;
- **Sub-bacias dos rios Pomba, Muriaé e Carangola:** estão na faixa considerada como situação potencialmente preocupante (comprometimento de 5 a 30%) nos dois cenários avaliados. Juntas possuem uma demanda subterrânea no cenário de maior pressão (2045) de 1,57 m³/s frente a uma reserva explorável de 19,8 m³/s. Esse comprometimento também pode ser relacionado à hidrogeologia da região. Conforme indicado no mapa da Figura 6-1, estas bacias ficam situadas em uma unidade hidrogeológica fraturada de produtividade muito baixa;
- **Sub-bacia do rio Piabanha (UP Piabanha):** salta de 10,5% para 13,1% no cenário de maior pressão (2045), tornando-se uma sub-bacia que merece acompanhamento por apresentar crescimento proporcional expressivo em relação a sua disponibilidade. Apesar das demandas subterrâneas nesta sub-bacia não serem elevadas (0,41 m³/s no cenário de maior pressão), as reservas exploráveis são baixas (3,1 m³/s), o que justifica o comprometimento hídrico apresentado. Isso vem ao encontro do observado na hidrogeologia local. A Figura 6-1 apresentada anteriormente indica que a UP Piabanha tem sua maior porção localizada em uma unidade aquífera fraturada com pouca produtividade.

Por outro lado, sub-bacias como o **Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul, Rio Pirai, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul e Rio Dois Rios** permanecem com baixos índices de comprometimento (<5%), o que sugere maior resiliência quanto ao uso dos recursos subterrâneos.

7. IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS COM MAIOR ÍNDICE DE COMPROMETIMENTO HÍDRICO

7.1. ÁGUAS SUPERFICIAIS

As Unidades de Planejamento da Bacia do Rio Paraíba do Sul podem ser agrupadas em dois perfis: aquelas que em algum momento irão apresentar alta criticidade hídrica (seja na cena atual ou por meio de um agravamento no cenário de maior pressão projetado para 2045) e as que apresentam baixa criticidade, porém ainda demandam atenção.

As UPs do Alto e Médio Paraíba do Sul apesar de apresentarem um balanço hídrico menos comprometido, possuem suas particularidades que devem ser levadas em consideração. Ambas apresentam um aumento significativo das suas demandas características: mineração, irrigação e uso industrial no Alto Paraíba do Sul e uso industrial no Médio Paraíba do Sul. Além disso, ambas apresentam projeções de aumento nas vazões transpostas para cenários futuros, ocasionando a diminuição de suas disponibilidades hídricas. Especificamente no Alto Paraíba do Sul, há uma concentração de trechos em situações críticas nos afluentes diretos do rio Paraíba do Sul.

O Alto Paraíba do Sul, apesar de ser detentor das maiores demandas da bacia, é um grande produtor de água, atendendo em termos gerais suas demandas. Porém, apresenta trechos com elevado comprometimento hídrico em locais específicos nos afluentes do rio Paraíba do Sul, ocasionados por demandas localizadas, demandando foco em tais otobacias. Além disso, a manutenção da disponibilidade hídrica nesta UP é essencial para o restante da bacia, tendo em vista que se trata da região mais a montante e realiza a regularização das vazões em seus reservatórios, afetando diretamente todo o trecho do Paraíba do Sul a jusante.

O Médio Paraíba do Sul é determinante não só para a gestão das águas na bacia do rio Paraíba do Sul, mas também na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, tendo em vista que fornece água a partir da transposição no barramento de Santa Cecília. Dessa forma, a manutenção da capacidade de produção nesta UP e na UP do Alto Paraíba do Sul (diretamente a montante) é essencial para a segurança hídrica, tanto para as regiões à jusante quanto para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Nota-se que na região a montante da transposição, existem pontos de comprometimento hídrico localizados (já na cena atual) que demandam atenção específica, ocasionados principalmente pelo uso industrial, preponderante na UP. Na região a jusante da transposição, há um índice de comprometimento intermediário nos afluentes do Paraíba do Sul, entre os municípios de Barra do Piraí e Paraíba

do Sul. Tal comprometimento é esparso na cena atual, porém concretiza-se no cenário futuro, indicando a possibilidade da tomada de medidas para evitá-lo.

Entre as UPs com elevada criticidade na cena atual, destacam-se Rio Dois Rios e Piabanha. A UP Rio Dois Rios concentra o maior percentual de ottobacias em déficit hídrico da bacia, sobretudo nos afluentes do rio Grande. O agravamento desse quadro em cenários futuros, somado ao avanço das faixas intermediárias, sinaliza as tendências futuras na UP. Já a UP Piabanha apresenta o maior incremento absoluto de ottobacias críticas, influenciado principalmente pela duplicação das demandas de irrigação. A elevada proporção de ottobacias em faixas intermediárias já na cena atual evidencia que, na ausência de intervenções, a pressão hídrica se intensificará rapidamente.

Por outro lado, as UPs Rios Pomba e Muriaé e Baixo Paraíba do Sul, atualmente em situação com certo conforto hídrico (apresentam, respectivamente, 1,02 % e 2,8 % de ottobacias em situação muito crítica), mostram forte tendência de agravamento no cenário futuro de maior pressão. Na primeira, as demandas aumentam de 5,06 m³/s para 9,35 m³/s, destacando-se os usos agrícolas e as perdas por evaporação, especialmente nas porções superiores da UP, como os afluentes Xopotó e Muriaé. No Baixo Paraíba do Sul, observa-se a maior mudança percentual da bacia, com redução de 92% para 80% das ottobacias em situação confortável. O salto da demanda de águas superficiais para 13,6 m³/s, impulsionado pela irrigação, novos reservatórios e termoeletricas, afeta, não apenas áreas com histórico de pressão, como os rios Muriaé e Carangola, mas também regiões anteriormente estáveis.

Diante desse panorama, é essencial a implementação de um conjunto de ações estratégicas integradas, com foco nas seguintes diretrizes:

- **Gestão da demanda agrícola:** implantação de tecnologias de irrigação eficiente, reúso de água e zoneamento de áreas críticas para cultivo irrigado.
- **Gestão adaptativa de outorgas:** estabelecimento de limites condicionais para novas outorgas em áreas de risco e revisão periódica com base em balanços qualitativos atualizados.
- **Proteção de áreas de recarga e manutenção de vazões ambientais:** ampliação de ações de restauração florestal e conservação do solo em UPs sensíveis.
- **Integração setorial e fortalecimento institucional:** articulação entre os setores agrícola, energético e urbano com os comitês de bacia, garantindo ações coordenadas frente ao crescimento da demanda.

O cenário futuro aponta para o incremento expressivo das demandas hídricas em todos os setores, com exceção do abastecimento urbano, que tende a se reduzir, em função da

diminuição das perdas na rede e da tendência de redução demográfica. Nesse contexto, o sucesso na preservação das reservas hídricas da bacia dependerá da capacidade de alinhar o desenvolvimento econômico à gestão sustentável da água, por meio de planejamento preventivo, controle de pressões emergentes e investimentos direcionados nas UPs mais vulneráveis.

7.2. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A identificação de regiões críticas no balanço hídrico subterrâneo é fundamental para a priorização de ações de gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos. A partir da análise comparativa entre as demandas projetadas e as reservas exploráveis estimadas para cada sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHPS), foi possível destacar áreas que já demonstram comprometimento relevante dos recursos subterrâneos, mesmo antes de atingirem os limiares de escassez definidos pela Deliberação CRH nº 146/2012.

- **Sub-bacia Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul (UP Alto Paraíba do Sul):** essa sub-bacia apresenta os maiores índices de comprometimento hídrico da BHPS, com valores de 27,1% na cena atual e 33,2% no cenário de maior pressão (2045). Esse grau de comprometimento, classificado como "preocupante", decorre da intensa concentração de atividades industriais, de mineração e de abastecimento urbano, que somam demandas superiores a 12 m³/s em 2045. Essa condição torna a UP Alto Paraíba do Sul uma região crítica prioritária para ações de controle e gestão da demanda;
- **Sub-bacias dos rios Pomba, Muriaé e Carangola:** estas sub-bacias se encontram na faixa de situação potencialmente preocupante, com comprometimentos variando entre 5% e 11% da reserva explorável. Juntas, suas demandas no cenário de maior pressão atingem 1,57 m³/s, frente a uma reserva disponível de 19,8 m³/s. Embora os volumes absolutos não sejam elevados, a hidrogeologia local – dominada por aquíferos fraturados de baixa produtividade – acentua a sensibilidade da região ao uso intensivo. A conjugação de limitações naturais com o crescimento da demanda justifica a necessidade de monitoramento contínuo;
- **Sub-bacia do rio Piabanha (UP Piabanha):** apesar de representar uma das menores demandas da bacia (0,41 m³/s em 2045), a baixa reserva explorável da sub-bacia (3,1 m³/s) resulta em um índice de comprometimento de 13,1%, em ascensão em relação à cena atual (10,5%). Essa sub-bacia encontra-se integralmente inserida em um domínio hidrogeológico de muito baixa produtividade, conforme mapeamento geológico. O aumento proporcional da demanda representa uma pressão significativa

sobre os aquíferos locais, justificando seu enquadramento como uma região crítica emergente.

7.3. ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEO

A análise integrada do balanço hídrico é fundamental para identificar áreas críticas conjuntas e estabelecer metas de gerenciamento. No Quadro 7-1 são apresentados os índices que foram adotados para a análise do Índice de Criticidade Hídrica – ICH, superficial e subterrâneo. Destaca-se que o ICH superficial e subterrâneo emprega a mesma lógica de comparar demanda com disponibilidade, mas as faixas de alerta são mais restritivas para águas subterrâneas especialmente devido ao tempo de renovação dos aquíferos. Nos sistemas superficiais se admite comprometimento de até 25 % como “boa condição”; já nos aquíferos a recarga é lenta, por isso um uso de apenas 5 % já exige atenção. À medida que o índice cresce, a mesma denominação (“potencialmente preocupante”, “crítica” etc.) é acionada mais cedo para o meio subterrâneo — por exemplo, a classe “crítica” começa com 50 % de comprometimento no aquífero, enquanto só é atingida a partir de 75 % na água superficial.

O balanço hídrico superficial foi elaborado na escala de ottobacias, enquanto o balanço hídrico subterrâneo foi obtido de forma agregada por sub-bacias. Em relação a esse aspecto, vale destacar que a disponibilidade hídrica de águas subterrâneas não pode ser distribuída diretamente por ottobacia, o que faz com que seus valores sejam obtidos apenas no nível de sub-bacia. Naturalmente, pode haver trechos específicos de menor disponibilidade específica de águas subterrâneas, mas a análise local não é motivo do presente estudo, sendo necessárias avaliações locais, inclusive por meio de perfuração de poços e realização de testes de bombeamentos.

Com isso, de forma a permitir a realização do balanço hídrico integrado, foi utilizada a escala possível para as águas superficiais e subterrâneas, que se refere às sub-bacias. Assim, para garantir a comparabilidade entre os dois balanços, este capítulo analisa, para o balanço hídrico superficial, a vazão remanescente nos exutórios de cada sub-bacia — os mesmos pontos utilizados na avaliação do balanço hídrico subterrâneo. Estas análises foram realizadas considerando a cena atual.

Quadro 7-1 – Índices utilizados para a análise de balanço hídrico superficial e de balanço hídrico subterrâneo

I _{CH} – Índice de Comprometimento Hídrico		Classificação
Superficial	Subterrâneo	
< 25%	< 5%	Boa condição de disponibilidade; pouca atividade de gerenciamento é necessária.
25 a 50%	5 a 30%	Situação potencialmente preocupante, devendo ser desenvolvidas ações de gerenciamento para solução de problemas locais.
50 a 75%	30 a 50%	Situação preocupante; a atividade de gerenciamento é indispensável, exigindo a realização de investimentos médios.
75% a 100%	50 a 100%	Situação crítica, exigindo intensa atividade de gerenciamento e grandes investimentos.
> 100%	> 100%	Situação muito crítica, em que atividades de gerenciamento e de investimentos e realocação de demandas são necessárias de forma urgente.

Fonte: elaborado pelo Consórcio

O Quadro 7-2 apresenta os resultados da análise integrada, sendo apresentados os resultados dos índices médios de comprometimento hídrico por sub-bacia. De maneira geral, quando analisada de forma unificada o balanço hídrico superficial por sub-bacia, considerando a relação entre vazão remanescente e vazão disponível, nenhuma delas se encontra em faixa preocupante, crítica ou muito crítica. Isto é reflexo do que foi identificado no balanço hídrico superficial por ottobacias, onde se percebeu uma pequena faixa de ottobacias em situação crítica. Percebe-se, neste caso, que o balanço hídrico superficial apresenta trechos localizados de criticidade, mas que em uma análise mais ampla as sub-bacias se apresentam pouco comprometidas.

Adicionalmente, o Quadro 7-3 faz uma análise cruzada do que foi apresentado das áreas críticas de balanço hídrico superficial apresentada no Item 7.1 e das áreas críticas de balanço hídrico subterrâneo apresentadas no Item 7.2. Em síntese, os pontos onde a gestão deve atuar de forma integrada concentram-se no Alto Paraíba do Sul/Médio Vale Superior e na UP Piabanha. O conjunto Pomba–Muriaé–Carangola merece monitoramento continuado, pois os dois balanços já indicam tendência de deterioração, ainda que em estágios diferentes.

Quadro 7-2 – Análise integrada dos resultados de balanço hídrico superficial e de balanço hídrico subterrâneo, considerando a Cena Atual, por sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul

Sub-bacia*	Balanço Hídrico Superficial						Balanço Hídrico Subterrâneo	
	Disponibilidade Hídrica Superficial (m³/s)		Vazão Remanescente (m³/s)		Índice de criticidade Hídrica Superficial média da sub-bacia (%)		Reserva Explotável (m³/s)	Índice de criticidade Hídrica Subterrâneo geral da sub-bacia (%)
	Q95	Q7,10	Q95	Q7,10	Q95	Q7,10		
Alto Vale do Rio Paraíba do Sul	26,79	21,12	26,69	21,02	0,37%	0,47%	5,7	4,50%
Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul	119,10	81,46	108,35	71,00	9,03%	12,84%	37,6	27,10%
Rio Preto	26,91	20,86	26,41	20,42	1,86%	2,11%	6,0	1,80%
Rio Paraibuna	67,05	52,52	66,48	52,01	0,85%	0,97%	14,5	3,90%
Rio Pomba	35,27	25,42	34,86	25,02	1,16%	1,57%	9,9	7,50%
Rio Carangola	3,58	2,12	3,30	1,85	7,82%	12,74%	1,5	5,80%
Rio Muriaé	21,83	13,31	19,88	11,43	8,93%	14,12%	8,5	3,00%
Médio Vale do Rio Paraíba do Sul*	166,40	150,29	159,90	143,95	3,91%	4,22%	16,7	1,00%
Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul	168,98	136,72	168,25	136,08	0,43%	0,47%	32,3	0,50%
Rio Piabanha	12,57	9,50	12,50	9,46	0,56%	0,42%	3,1	10,50%
Rio Dois Rios	13,80	9,98	13,33	9,59	3,41%	3,91%	3,8	2,30%
Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul	240,74	185,95	235,02	180,51	2,38%	2,93%	54,9	0,80%
Rio Pirai	10,79	7,49	10,75	7,46	0,37%	0,40%	3,3	0,30%

*Todos os resultados foram gerados no exutório de cada sub-bacia (ou seja, na sua entrega à outros rios principais), com exceção da sub-bacia Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, onde a disponibilidade hídrica subterrânea apresentada é a montante da transposição do barramento de Santa Cecília devido à influência da transposição nos resultados a jusante.

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 7-3 – Análise integrada dos resultados de balanço hídrico superficial e de balanço hídrico subterrâneo na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul

Região / Sub-bacia	Situação em águas superficiais	Situação em águas subterrâneas	Coincidência de alerta (Superficial/Subterrâneo)
Alto Paraíba do Sul (inclui o Médio Vale Superior a jusante)	Trechos de afluentes já apresentam compromissos elevados e alta pressão futura (mineração, irrigação, uso industrial).	Maior índice de comprometimento da bacia ($\approx 27\%$ atual $\rightarrow 33\%$ em 2045), classe preocupante	Sim – região prioritária para gestão integrada
Piabanha	Maior incremento absoluto de ottobacias críticas (duplicação da irrigação); elevada proporção já em faixas intermediárias	Comprometimento em ascensão ($\approx 10,5\% \rightarrow 13\%$) sobre aquíferos de muito baixa produtividade	Sim – região prioritária para gestão integrada
Pomba – Muriaé – Carangola	Hoje confortáveis, mas tendência clara de agravamento futuro (demanda agrícola, reservatórios).	5 – 11 % da reserva explotável – faixa potencialmente preocupante em aquíferos fraturados sensíveis	Parcial – sinais de risco em ambos os meios, ainda que em estágios diferentes
Rio Dois Rios	Alta criticidade já na cena atual; maior percentual de ottobacias em déficit	Sem alerta relevante no aquífero	Apenas Superficial
Médio Paraíba do Sul	Pontos críticos superficiais (principalmente a jusante da transposição de Santa Cecília)	Baixa pressão subterrânea atual	Apenas Superficial
Baixo Paraíba do Sul	Perspectiva de escassez futura (demanda salta para $13,6 \text{ m}^3/\text{s}$, irrigação e termoeletricas).	Aquífero pouco explorado; comprometimento mínimo	Apenas Superficial

Fonte: elaborado pelo Consórcio

7.4. INDICAÇÃO DE PROPOSTAS DE SOLUÇÕES PARA OS PROBLEMAS NAS ÁREAS PRIORITÁRIAS

A partir do balanço hídrico realizado, foram identificadas áreas consideradas críticas ou muito críticas, com balanços hídricos com alto índice de comprometimento das vazões disponíveis. Para essas áreas, é importante que os entes do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH se mobilizem para auxiliar no desenvolvimento de ações que levem ao incremento das ofertas hídricas ou redução das demandas, o que leva à melhoria do balanço hídrico e minimização de riscos de conflitos.

Vale inicialmente lembrar os principais entes do SINGREH que têm atuação na bacia e que naturalmente terão responsabilidade de execução das ações propostas: Órgãos Gestores de Recursos Hídricos – OGRHs (ANA, IGAM, INEA e SP Águas); Comitês de Bacias Hidrográficas – CBHs (CEIVAP e comitês de bacias estaduais afluentes); Entidade Delegatária (AGEVAP); Conselhos de Recursos Hídricos (Nacional e estaduais).

Na sequência, serão indicadas algumas propostas de ações possíveis de ser implementadas, para possível avaliação futura sobre as melhores para cada região específica. Importante destacar que não é motivo do presente estudo detalhar ações a serem executadas, uma vez que tal demanda cabe ao Plano Integrado de Recursos Hídricos – PIRH Paraíba do Sul e os Planos de Ações de Recursos Hídricos – PARHs das bacias afluentes. Assim, ao final do presente estudo, com base nos resultados deste trabalho e de outros realizados anteriormente (EDH) ou em paralelo (Enquadramento), deverá ser realizada a revisão dos planos de ações do PIRH e dos PARHs de forma a incorporar novas ações voltadas à melhoria do balanço hídrico da bacia do rio Paraíba do Sul. Não há a necessidade de revisar os planos de forma completa, mas apenas os respectivos planos de ações, verificando o que já foi implementado ou vem sendo executado até o momento e detalhando novas ações de forma específica para a melhoria do balanço hídrico.

Importante lembrar que o monitoramento das ações implementadas já vem sendo realizado periodicamente pela AGEVAP, verificando por meio de indicadores o nível de implementação das ações do PIRH constantes no PAP – Plano de Aplicação Plurianual e POA – Plano de Execução Orçamentária Anual. Tais informações são apresentadas de forma atualizada no Sistema de Informações Geográficas e Ambientais da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – SIGA CEIVAP².

² <https://sigaceivap.org.br/projetos>

Outro aspecto relevante do processo trata dos percentuais de redução de demandas por bacia, sub-bacia e por setor usuário. Nesse caso, é importante que, ao definir e detalhar as propostas para cada plano de ações de cada bacia afluyente, seja revisitado o percentual outorgável de cada OGRH e, com isso, será possível identificar os valores de demandas que deverão ser otimizados por setor usuário, de forma que todas as bacias estejam com comprometimento hídrico adequado, dentro dos limites legais.

Assim, na sequência são indicadas algumas possíveis ações a serem avaliadas no contexto dos respectivos planos de ações, para possível detalhamento em cada bacia.

Incentivo à implementação de barragens ou ações de reservação de água

Um dos fatores do balanço hídrico trata da oferta ou disponibilidade hídrica de determinada bacia hidrográfica. Sendo assim, naturalmente que para a melhoria do índice de comprometimento hídrico de uma bacia hidrográfica, é possível estudar ações de incremento dessa oferta por meio da reservação de água ou regularização de vazões. O PIRH-PS possui como ação prevista do Programa 2.1.1 – Equacionamento de Problemas de Balanço Hídrico Quali-Quantitativo o estudo de alternativas para melhoria do balanço hídrico da bacia, a partir de novos barramentos, realocação de pontos de captação e lançamento e transposições interna. Em consonância com tal ação, podem ser citadas algumas ações possíveis de ser avaliadas de forma específica por bacia afluyente:

- Construção de barragens de maior porte para regularização de vazões para grandes usos. Tais barragens podem ser pensadas nos casos em que há a necessidade de grande incremento de vazões em determinada bacia, com mais alto índice de comprometimento;
- Estímulo à construção de barragens de regularização de vazões em nível de propriedade. Essa ação pode ser indicada de forma específica para pequenas bacias em que um ou poucos usuários são responsáveis pelo alto índice de comprometimento hídrico. Sendo assim, o incremento da oferta apenas para esses usuários já deve resolver o problema da sub-bacia;
- Estímulo à construção de reservatórios *off-stream*. Esses reservatórios fora de cursos de água são relevantes em situações específicas de reservação de água do período chuvoso para a época de estiagem. Nesse sentido, tratam de situações em que os usuários podem captar maiores vazões no período chuvoso e reservar para uso na época seca de cada ano. Apesar da relevância e possibilidade de uso, devem ser específicos para situações de pequenas demandas, considerando que grandes vazões demandariam naturalmente reservatórios de maior porte, ocupando maiores

áreas dos terrenos e com grande índice de evaporação, levando a incremento de perdas;

- Barragens de acumulação de água de chuva. Essas barragens têm funções semelhantes às dos reservatórios *off-stream*, no sentido de reservar vazões do período chuvoso para a época seca. Da mesma forma, devem ser utilizadas de forma específica para pequenas vazões de incremento hídrico, considerando o porte e perdas por evaporação. Destaca-se que essas barragens são também utilizadas com a finalidade de estímulo à infiltração de água e manutenção de nascentes a jusante, sendo também um benefício positivo para as vazões mínimas do período de estiagem nas respectivas bacias.

Harmonização ou unificação dos critérios de outorga

Trata-se de uma ação que não incrementa a vazão escoada em um curso de água, mas que pode aumentar as disponibilidades hídricas para outorga. Essa ação pode ser estudada pelos OGRHs como forma de que todos utilizem a mesma vazão de referência de outorgas, de forma que a bacia possa ter uma base única de disponibilidade utilizada por todos. Os termos harmonização ou unificação são propostos, uma vez que podem ser considerados percentuais diferentes de vazões outorgáveis no caso da primeira ou o mesmo percentual para toda a bacia, no caso da segunda.

Como exposto acima, não incrementa a vazão escoada, mas caso se defina por uma vazão superior à utilizada atualmente pelos OGRHs ou por percentuais maiores de vazão outorgável, naturalmente que a disponibilidade para outorgas passa a ser superior.

Estímulo a ações de recirculação ou reúso de água

Tratam-se de ações voltadas à redução das demandas, por meio da melhoria da eficiência do uso da água, usualmente aplicadas para indústrias e mineração. Essas ações devem ser avaliadas de forma específica pelos usuários desses setores, mas podem ser estimuladas pelos OGRHs por meio do estabelecimento de índices de uso racional restritivos para análise e emissão de novas outorgas ou revisão das atuais nas bacias críticas.

Redução de perdas nos sistemas de abastecimento público

Atualmente, os sistemas de abastecimento público no Brasil ainda apresentam altos índices de perdas ou consumos de água elevados pelos usuários, podendo ser desenvolvidas ações que fomentem melhorias nesses valores, o que levará à redução das demandas. Assim, podem ser formalmente estabelecidos pelos OGRHs índices de perdas máximos a serem

aceitáveis para os sistemas municipais quando da obtenção ou renovação de outorgas, especialmente em bacias mais críticas.

Otimização dos sistemas de irrigação

Trata-se de outra ação possível de ser implementada para redução das demandas, especificamente para o setor agrícola, que tem demandas representativas em algumas porções da bacia. Nesse caso, devem ser indicados de forma específica os melhores métodos de irrigação adaptados para cada cultura e região, bem como podem ser estabelecidos os índices de uso racional mais restritivos em porções mais críticas da bacia. Esses índices podem ser formalizados em portarias ou resoluções de critérios de outorga, definidos de forma mais restritivas para bacias com maior comprometimento hídrico na condição atual.

Assim como proposto para o caso de indústrias e mineração, podem também ser estabelecidos selos de eficiência a serem formalizados para os usuários que tiverem usos mais adequados ou com melhores índices de uso da água por produção ou métodos mais eficientes.

Estímulo a ações de conservação das bacias hidrográficas

Outro grupo de ações que pode ser desenvolvido na bacia trata da conservação dos recursos hídricos que pode levar a uma melhoria do regime de escoamento anual de vazões nos cursos de água recuperados. Nesse sentido, as ações de recuperação de bacias hidrográficas (como o Programa Mananciais do CEIVAP) podem dar suporte ao incremento das vazões mínimas dos cursos de água no período de estiagem, servindo como um processo de regulação das descargas ao longo do ano. Ressalta-se que no PIRH-PS são previstas diferentes ações de conservação de bacias, como o já citado Programa Mananciais, projetos de conservação e reabilitação, mobilização e parcerias com proprietários de terras e ações de educação e gestão participativa.

Essas ações de conservação podem ser previstas de diversas formas, podendo ser destacadas as de recuperação ou preservação de nascentes e de matas ciliares ao longo dos cursos de água da bacia. Ações de conservação de água e solo também podem ser previstas nesse contexto, sendo também úteis à melhoria no regime de escoamento dos cursos de água.

7.5. AÇÕES EM EXECUÇÃO PELO PAP E POA

De forma complementar à indicação de possíveis ações, foi realizada análise do que é previsto e vem sendo implementado no contexto do PAP e POA, tratando da execução do PIRH. Para isso, foram analisadas as informações constantes nas últimas atualizações de tais

documentos, constantes das resoluções CEIVAP n° 346/2024 (atualização do PAP) e 347/2024 (POA para o ano de 2025).

Nesse sentido, no contexto dos programas e ações previstos no PAP e no POA, é possível destacar algumas ações relevantes e que podem levar a melhoria no balanço hídrico da bacia:

- Programa de enquadramento dos corpos de água em classes, com ações voltadas ao desenvolvimento dos estudos ora em curso, que deverão concluir com o programa de efetivação do enquadramento e ações para melhoria da qualidade das águas;
- Programa monitoramento hidrometeorológico, com ações voltadas ao aperfeiçoamento do monitoramento de qualidade e quantidade das águas, o que leva a um melhor conhecimento e acompanhamento da disponibilidade hídrica da bacia;
- Programa Protratar CEIVAP e elaboração de projetos básicos e executivos de sistemas de esgotamento sanitário, o que vai levar a ações voltadas à melhoria da qualidade das águas na bacia;
- Programa de gerenciamento de perdas em sistemas de distribuição de água, o que levará a otimização das demandas e melhoria no balanço hídrico da bacia;
- Programa de investimento em serviços ambientais para conservação e recuperação de manutenção de mananciais, que deve levar a melhoria no regime hídrico dos corpos hídricos utilizados para sistemas de abastecimento de água;
- Projetos voltados a pagamento por serviços ambientais, também úteis para a melhoria do regime hídrico dos corpos hídricos da bacia.

De forma complementar, vale destacar a recomendação de revisão do plano de ações do PIRH após a conclusão dos estudos em curso, inclusive o de enquadramento, para que possam ser ajustadas as ações a serem executadas, principalmente no que se refere à sua espacialização, indicando de forma específica para as áreas com maior criticidade hídrica.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este documento trata do quinto produto de um total de oito previstos para a avaliação das demandas hídricas da bacia do rio Paraíba do Sul e revisão do balanço hídrico. Nesse contexto, considerando o processo evolutivo do estudo, trata da apresentação do balanço hídrico propriamente dito, envolvendo a cena atual e cenas futuras, de acordo com o previsto no termo de referência do estudo. A seguir são apresentadas as principais considerações referentes aos resultados de balanço hídrico superficial (Item 8.1) e balanço hídrico subterrâneo (Item 8.2). Com isso, entende-se que os objetivos esperados para esta etapa de trabalho foram atingidos, com a apresentação do quadro de demandas atual e futuro da bacia, dando subsídios para a continuidade dos estudos.

8.1. BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL

O cálculo do balanço hídrico é dependente de seus principais dados de entrada, a saber: demandas e disponibilidades hídricas. Tendo em vista o alto grau de discretização (uso da base BHO 6 com 272.149 trechos), há uma incerteza inerente à determinação de tais dados de entrada. Em relação a disponibilidade, a incerteza é maior para os trechos com as menores áreas de drenagem, fora dos cursos principais, pois os resultados de disponibilidade foram simulados para os trechos principais da bacia (trechos com monitoramento) e convertidos para os demais a partir das respectivas áreas de drenagem. A base de disponibilidade hídrica foi considerada a partir do estudo EDH-PS contratado pelo CEIVAP para a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul.

Em relação às demandas, tais valores foram gerados originalmente na base BHO 6 completa. Essas demandas foram calculadas nas etapas anteriores do presente estudo, tendo, naturalmente, incertezas relacionadas à precisão das bases de outorga (tanto em valores, localização e setor) e na espacialização dos pontos de uso da água. De toda forma, destaca-se o denso trabalho realizado de consistência e consolidação dos resultados realizado no contexto do presente estudo.

Os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo de balanço hídrico superficial permitiram uma avaliação abrangente do grau de comprometimento hídrico na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHPS), tanto na cena atual quanto em um cenário futuro de maior pressão (ano de referência: 2045). A partir dessa análise, que foi conduzida a partir de uma base espacial altamente detalhada (272.149 ottobacias), foi possível identificar não apenas o estado atual de disponibilidade em relação à demanda, mas também as tendências de agravamento e os pontos críticos para a gestão dos recursos hídricos.

Na cena atual, a maior parte das ottobacias apresenta baixo comprometimento hídrico. Em todos os cenários avaliados com vazões anuais de referência (Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$), mais de 90% das ottobacias permanecem abaixo do limite de 25% de comprometimento, o que indica uma situação global de conforto hídrico na bacia. No entanto, essa condição média esconde situações pontuais relevantes, como:

- Déficits localizados em afluentes dos rios Preto, Xopotó, Muriaé, Carangola, Grande e Paquequer, além de balanços progressivamente críticos em trechos intermediários do rio Paraíba do Sul (como entre os municípios de Barra do Piraí e Paraíba do Sul);
- Unidades de Planejamento (UPs) como Rio Dois Rios e Piabanha já apresentam, mesmo na cena atual, os maiores percentuais de ottobacias em faixas críticas (>75% de comprometimento), chegando a ultrapassar 7% em déficit hídrico na UP Rio Dois Rios.

A avaliação regional demonstrou que o comprometimento hídrico é mais sensível nas UPs com baixa disponibilidade natural e sem capacidade significativa de regulação hídrica por reservatórios.

O cenário de maior pressão, que considera o crescimento das demandas hídricas setoriais, implantação de novos reservatórios e aumento nas transposições, aponta para uma tendência clara de agravamento do comprometimento hídrico em diversas regiões da bacia:

A simulação de cenários com aplicação dos critérios de outorga estaduais e federais demonstrou reduções modestas no número de ottobacias em déficit hídrico, porém, com efeitos relevantes em trechos a jusante, especialmente onde há efeito cascata da pressão de usos a montante. Essa abordagem revela o potencial dos critérios de outorga como instrumento de mitigação de comprometimento hídrico, embora sua eficácia dependa de uma implementação estratégica, aliada a fiscalização e reavaliação contínua dos usos autorizados.

Por fim, destaca-se que a ferramenta de balanço hídrico desenvolvida servirá como apoio às ações de gestão dos recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul, fornecendo em cada “ottobacia”, que é a menor célula do sistema, dados sobre disponibilidade hídrica, demandas de água para atendimento a usos implantados na bacia, áreas de drenagem e Balanço Hídrico com determinação das vazões remanescentes em cada trecho de rio estudado.

8.2. BALANÇO HÍDRICO SUBTERRÂNEO

A análise integrada dos domínios hidrogeológicos com os resultados de balanço hídrico permitiu uma compreensão mais robusta da relação entre oferta, demanda e potencial de exploração dos recursos subterrâneos na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHPS).

O presente estudo apresentou uma avaliação da disponibilidade e demanda de águas subterrâneas na BHPS com base na metodologia adotada pela deliberação CRH-SP nº 146/2012, amplamente utilizada em estudos hidrogeológicos de disponibilidade para efeito de planejamento de recursos hídricos. A abordagem consistiu na estimativa das reservas exploráveis a partir da diferença entre a vazão Q_{95} e a vazão $Q_{7,10}$ e sua comparação com os volumes demandados por diferentes setores de uso, sob dois horizontes temporais: a cena atual e o cenário de maior pressão projetado para 2045.

Os resultados indicam que, de maneira geral, a BHPS apresenta uma situação de disponibilidade subterrânea satisfatória, com todas as sub-bacias mantendo seus índices de comprometimento hídrico abaixo de 50% da reserva explorável. Isso representa uma condição fora da faixa crítica de escassez, mesmo no cenário mais pressionado.

Entretanto, algumas sub-bacias já demonstram sinais de pressão crescente, destacando-se a UP Alto Paraíba do Sul, cuja demanda elevada dos setores de mineração, indústria e abastecimento urbano projeta um comprometimento de 33,2% em 2045, configurando uma situação preocupante. Da mesma forma, as sub-bacias dos rios Pomba, Muriaé, Carangola e Piabanha, embora com menores volumes absolutos, enfrentam desafios específicos associados à baixa produtividade aquífera de suas formações geológicas fraturadas. Tais aspectos evidenciam a importância de se considerar a heterogeneidade hidrogeológica na gestão dos recursos subterrâneos.

Cabe destacar que o estudo utilizou estimativas simplificadas e dados secundários de disponibilidade hídrica, não contemplando medições diretas de recarga, transmissividade ou armazenamento específico dos aquíferos, o que não era escopo do trabalho. De toda forma, os resultados mostram-se coerentes com estudos anteriores e estimativas de abrangência nacional, como as fornecidas pela ANA (2023).

9. REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Disponibilidade Hídrica Subterrânea por UGRH. (2020). Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/8e1ea4da-bdc1-4614-8182-2d53af90cc72>. Acesso em: 14 maio 2025.
- Água e Solo (2024). Etapa técnico-propositiva do enquadramento das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Diagnóstico (P02). Arquivo 23003_AGEVAP_DIAG01_R03.
- Água e Solo (2025). Etapa técnico-propositiva do enquadramento das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Modelagem de Qualidade da Água na Situação Atual (P03). Arquivo 23003_AGEVAP_MOD01_R00, de 06/05/2025.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA); Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE); Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM); Instituto Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro (INEA). Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1.382, de 7 de dezembro de 2015. Estabelece diretrizes para a operação do Sistema Equivalente da Bacia do Rio Paraíba do Sul. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 238, p. 151–153, 15 dez. 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2015/1382>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- CEIVAP - Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. (2025). Instrumentos de Gestão – Enquadramento. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/instrumentos-de-gestao/enquadramento>. Acesso em: 14 maio 2025.
- Comitê das Bacias PCJ (2015). Relatório de Situação dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí – 2015. Campinas: Agência das Bacias PCJ, 2015. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/docs/relatorios/relatorio-situacao-2015.pdf>. Acesso em: 14 maio 2025.
- CRH (2020). Deliberação CRH nº 146 de 2012. Relatório de situação dos recursos hídricos da bacia hidrográfica. Roteiro para elaboração e fichas técnicas dos parâmetros. Disponível em: https://agencia.baciaspcj.org.br/wp-content/uploads/Roteiro_RS_ab2019.pdf. Acesso em: 14 maio 2025.
- MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. (2019). Portaria IGAM nº 48. de 4 de outubro de 2019. Estabelece normas suplementares para a regularização dos

recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Diário do Executivo – Minas Gerais, 5 out. 2019. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=49719>. Acesso em: 14 maio 2025.

- PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (PERH 2024 – 2027). Relatório. Volume 1 - Diagnóstico Síntese Tomo I - Caracterização e Situação dos Recursos Hídricos.
- PIRH-PS. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul. Resumo Executivo do PIRH Paraíba do Sul. 2021. Disponível em https://sigaceivap.org.br/publicacoesArquivos/ceivap/arq_pubMidia_Processo_030-2018_PF02.pdf. Acesso em dezembro de 2024.
- PROFILL ENGENHARIA E AMBIENTE S.A. (2024). Contratação de empresa especializada para realização do estudo das disponibilidades hídricas na bacia hidrográfica do Rio Paraíba Do Sul (EDH-PS). Produto 4 – Estimativas das disponibilidades hídricas na bacia hidrográfica do Rio Paraíba Do Sul. Relatório Técnico. Cód. do Documento: AGVP_PARAIBA_EHID_Produto4_Disponibilidade_R03
- RIO DE JANEIRO (Estado). Instituto Estadual do Ambiente. (2018). Resolução INEA nº 162. Estabelece critério para a determinação da vazão de referência para fins do cálculo de disponibilidade hídrica para outorga de direito de uso de recursos hídricos e usos considerados insignificantes de domínio do Estado do Rio de Janeiro e revoga o art. 10 e altera o art. 18 da Portaria SERLA nº 567. de 07 de maio de 2007.
- SÃO PAULO (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica. (2017). Portaria DAEE nº 1.630. Dispõe sobre procedimentos de natureza técnica e administrativa para obtenção de manifestação e outorga de direito de uso e de interferência em recursos hídricos de domínio do Estado de São Paulo.

APÊNDICE A. BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL – CENA ATUAL

Quadro 9-1 – Listagem dos mapas com resultados do balanço hídrico superficial na cena atual

Código do arquivo	Descrição
P4_BALANCO_ANUAL_Q90_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Anual por ottobacia, considerando a vazão de referência Q90 no cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_ANUAL_Q95_OUTORGA40%_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Anual por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 com critério de outorga de 40% da Q95, considerando o cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_ANUAL_Q95_ESCASSEZ_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Anual por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 em cenário de escassez, considerando o cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_ANUAL_Q95_ESCASSEZ_PRIORIDADE_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Anual por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 em cenário de escassez, considerando o cenário atual de demanda hídrica com priorização de usos
P4_BALANCO_ANUAL_Q95_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Anual por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_DEZEMBRO_Q95_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Mensal de Dezembro por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_JANEIRO_Q95_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Mensal de Janeiro por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_FEVEREIRO_Q95_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Mensal de Fevereiro por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_MARCO_Q95_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Mensal de Março por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_ABRIL_Q95_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Mensal de Abril por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_MAIO_Q95_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Mensal de Maio por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_JUNHO_Q95_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Mensal de Junho por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_JULHO_Q95_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Mensal de Julho por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_AGOSTO_Q95_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Mensal de Agosto por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_SETEMBRO_Q95_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Mensal de Setembro por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_OUTUBRO_Q95_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Mensal de Outubro por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_NOVEMBRO_Q95_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Mensal de Novembro por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário atual de demanda hídrica

Código do arquivo	Descrição
P4_BALANCO_ANUAL_Q7_10_OUTORGA50%_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Anual por ottobacia, considerando a vazão de referência Q7,10 com critério de outorga de 50% da Q7,10, considerando o cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_ANUAL_Q7_10_ESCASSEZ_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Anual por ottobacia, considerando a vazão de referência Q7,10 em cenário de escassez, considerando o cenário atual de demanda hídrica
P4_BALANCO_ANUAL_Q7_10_ESCASSEZ_PRIORIDADE_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Anual por ottobacia, considerando a vazão de referência Q7,10 em cenário de escassez, considerando o cenário atual de demanda hídrica com priorização de usos
P4_BALANCO_ANUAL_Q7_10_CENARIO_ATUAL	Balanço hídrico Anual por ottobacia, considerando a vazão de referência Q7,10 no cenário atual de demanda hídrica

APÊNDICE B. BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL – CENA FUTURA DE MAIOR PRESSÃO (2045)

Quadro 9-2 – Listagem dos mapas com resultados do balanço hídrico superficial na cena futura

Código do arquivo	Descrição
P4_BALANCO_ANUAL_Q90_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Anual por ottobacia, considerando a vazão de referência Q90 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_ANUAL_Q95_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Anual por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_JANEIRO_Q95_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Mensal de Janeiro por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_FEVEREIRO_Q95_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Mensal de Fevereiro por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_MARCO_Q95_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Mensal de Março por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_ABRIL_Q95_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Mensal de Abril por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_MAIO_Q95_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Mensal de Maio por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_JUNHO_Q95_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Mensal de Junho por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_JULHO_Q95_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Mensal de Julho por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_AGOSTO_Q95_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Mensal de Agosto por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_SETEMBRO_Q95_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Mensal de Setembro por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_OUTUBRO_Q95_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Mensal de Outubro por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_NOVEMBRO_Q95_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Mensal de Novembro por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_DEZEMBRO_Q95_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Mensal de Dezembro por ottobacia, considerando a vazão de referência Q95 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica
P4_BALANCO_ANUAL_Q7_10_CENARIO_MAIOR_PRESSAO	Balanço hídrico Anual por ottobacia, considerando a vazão de referência Q7,10 no cenário de maior pressão (2045) de demanda hídrica

Fonte: elaborado pelo Consórcio