



PRH-RPB

PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA

RP-04 | Diagnóstico da Bacia
Tomo II - Revisão Final

Março 2025


| | | | | | | |
|----------------|-------------|-----------------------------------|------------|---------------|---------------|-----------------|
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Final | 11/03/2025 | Diagnóstico da Bacia – Tomo II | | | | |
| 1 | 10/02/2025 | Diagnóstico da Bacia – Tomo II | | | | |
| 0 | 29/11/2024 | Diagnóstico da Bacia – Tomo II | | | | |
| Revisão | Data | Descrição Breve | Por | Verif. | Aprov. | Autoriz. |

**Revisão e Atualização do Plano de Recursos Hídricos da Bacia
Hidrográfica do Rio Paraíba**

RP-04 – DIAGNÓSTICO DA BACIA – TOMO II

| | |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Elaborado por: Equipe técnica da COBRAPE | Supervisionado por: José Antônio Oliveira de Jesus |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|

| | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------|------------|------------|
| Aprovado por: | Revisão | Finalidade | Data |
| José Antônio Oliveira de Jesus | 1 | 3 | 11/03/2025 |
| Legenda Finalidade: [1] Para Informação [2] Para Comentário [3] Para Aprovação | | | |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>COBRAPE Rua Av. São José, 618 – 10º andar CEP 80050-350 Tel (41) 3094-2424</p> |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|

1 APRESENTAÇÃO

O presente documento corresponde a Fase A: Relatório da Coleta e da Análise dos Dados para a elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba (PRH – RPB) relativo ao Contrato nº 1-008/2023 celebrado entre o Estado da Paraíba, através da Secretaria de Estado da Infraestrutura e dos Recursos Hídricos (SEIRH), e a Cia. Brasileira de Projetos e Empreendimentos (COBRAPE).

O Termo de Referência (TdR), parte integrante do contrato, estabelece as seguintes fases componentes do PRH-RPB:

- *Fase Preliminar: Relatório de Planejamento de Ações e Mobilização e Metodologia;*
 - RP-01: Plataforma virtual e Relatório de Planejamento das ações e mobilização;
- *Fase A: Diagnóstico dos Recursos Hídricos da Bacia;*
 - RP-02: Relatório da Coleta e da Análise dos Dados;
 - RP-03: Estudo Hidrológico da Bacia: Potencialidades e Disponibilidades Hídricas;
 - RP-04: Diagnóstico da Bacia;
- *Fase B: Cenarização, compatibilização e articulação para o Plano de Recursos Hídricos;*
 - RP-05: Cenários possíveis para os Recursos Hídricos da Bacia nos Horizontes de Planejamento Considerados;
- *Fase C: Plano de Recursos Hídricos da Bacia;*
 - RP-06: Metas, programas, medidas emergenciais e Programa de Investimentos do PRH-RPB;
 - RP-07: Diretrizes para Implementação de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba (Manual operativo);
 - RF-01: Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba – Produto Final.

A Fase A tem o objetivo de levantar os dados, estudos e informações necessárias para que seja realizada a caracterização da bacia quanto aos seus aspectos físicos, ambientais e socioeconômicos, bem como diagnosticar as disponibilidades e demandas hídricas a serem utilizadas na elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba (PRH–RPB).

Como este relatório engloba um grande volume de temas e uma densa quantidade de informações, ele foi dividido visando facilitar a leitura e o entendimento dos dados, além de permitir uma organização mais clara e segmentada do conteúdo, tornando a consulta mais prática e ágil. Portanto, tomando como base o roteiro proposto no TdR, tem-se a seguinte divisão dos temas e seus respectivos capítulos neste documento (Tomo II):

- **Tomo I:**
 - Coleta e análise de dados
 - Caracterização Geral da Bacia e das infraestruturas hídricas;
 - Caracterização físico-biótica;
 - Caracterização socioeconômica e cultural:
 - Histórico do desenvolvimento da região – destacando conflitos sobre uso dos Recursos Hídricos;
 - Atividades econômicas e polarização regional;
 - Aspectos demográficos;
 - Economia;
 - Uso e Ocupação do solo;
 - Política Urbana;
 - Atores da Bacia – identificação, interesses e posicionamentos;
 - Planos e programas existentes;
 - Aspectos institucionais e legais da gestão dos recursos hídricos na Bacia;
- **Tomo II:**
 - Situação dos Recursos Hídricos – Disponibilidade Hídrica (Cap. 4):
 - Base de dados de Monitoramento Hidrológico (Cap. 4.1);
 - Modelagem Hidrológica (Cap. 4.2);
 - Caracterização dos Reservatórios (Cap. 4.3);
 - Estimativa da Disponibilidade Hídrica nos Açudes Estratégicos do PRH-RPB (Cap. 4.4);
 - Estimativa da Disponibilidade Hídrica Subterrânea (Cap. 4.5);
 - Análise da Qualidade das Águas Superficiais e Subterrâneas (Cap. 4.6);
- **Tomo III:**
 - Projeto de Integração do Rio São Francisco – PISF;
 - Situação dos Recursos Hídricos – Demanda Hídrica;
 - Diagnóstico das Demandas Hídricas;
 - Espacialização das Demandas;
 - Fontes e cargas de poluição;
 - Balanço Hídrico Qualitativo;
 - Balanço Hídrico Quantitativo;
 - Usos múltiplos e conflitos;
 - Caracterização do Saneamento e Saúde Pública;
 - Áreas protegidas por lei;
 - Áreas degradadas, situações emergenciais e conflitos existentes.

Por fim, compõe também esse Relatório, o documento “Anexo I”, que tratam das contribuições recebidas nos eventos e os registros audiovisuais das Consultas Públicas realizadas no âmbito da Fase A.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1 | APRESENTAÇÃO..... | 2 |
| 2 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 3 | OBJETIVO | 16 |
| 4 | SITUAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS – DISPONIBILIDADE HÍDRICA | 17 |
| 4.1 | BASE DE DADOS DE MONITORAMENTO HIDROLÓGICO..... | 17 |
| 4.1.1 | <i>Rede de monitoramento hidrometeorológico existente</i> | <i>17</i> |
| 4.1.2 | <i>Dados meteorológicos</i> | <i>26</i> |
| 4.1.3 | <i>Dados de Evapotranspiração</i> | <i>31</i> |
| 4.1.4 | <i>Dados Pluviométricos</i> | <i>42</i> |
| 4.1.5 | <i>Dados Fluviométricos</i> | <i>45</i> |
| 4.1.6 | <i>Diagnóstico da rede hidrometeorológica existente e proposição de melhorias no monitoramento</i> | <i>57</i> |
| 4.2 | MODELAGEM HIDROLÓGICA | 69 |
| 4.2.1 | <i>Escolha do modelo hidrológico para o PRH-RPB.....</i> | <i>69</i> |
| 4.2.2 | <i>Modelo de Grandes Bacias (MGB)</i> | <i>72</i> |
| 4.2.3 | <i>Aplicações do MGB no Semiárido.....</i> | <i>74</i> |
| 4.2.4 | <i>MGB para o PRH-RPB</i> | <i>75</i> |
| 4.3 | CARACTERIZAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS..... | 86 |
| 4.3.1 | <i>Inventário dos Reservatórios do PERH-PB</i> | <i>86</i> |
| 4.3.2 | <i>Reservatórios Monitorados pela AESA</i> | <i>89</i> |
| 4.3.3 | <i>Reservatórios Estratégicos para o PRH-RPB.....</i> | <i>90</i> |
| 4.4 | DISPONIBILIDADE HÍDRICA NOS AÇUDES ESTRATÉGICOS DO PRH-RPB | 97 |
| 4.4.1 | <i>Análise das aflúncias simuladas e dos volumes registrados</i> | <i>97</i> |
| 4.4.2 | <i>Análise da Permanência dos Volumes Observados</i> | <i>99</i> |
| 4.4.3 | <i>Estudo de Regularização de vazões para os Açudes Estratégicos.....</i> | <i>99</i> |
| 4.4.4 | <i>Síntese da Estimativa da Disponibilidade Hídrica Superficial.....</i> | <i>107</i> |
| 4.5 | ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA | 108 |
| 4.5.1 | <i>Introdução metodológica.....</i> | <i>108</i> |
| 4.5.2 | <i>Caracterização dos Sistemas Aquíferos</i> | <i>109</i> |
| 4.5.3 | <i>Dados Hidrogeológicos de Vazão</i> | <i>136</i> |
| 4.5.4 | <i>Perfil Construtivo</i> | <i>144</i> |
| 4.5.5 | <i>Dados Hidrogeológicos de Uso das Águas Subterrâneas.....</i> | <i>148</i> |
| 4.5.6 | <i>Cálculo da Disponibilidade Hídrica Subterrânea</i> | <i>151</i> |
| 4.5.7 | <i>Resultados Calculados</i> | <i>158</i> |
| 4.5.8 | <i>Mapa de Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas.....</i> | <i>161</i> |
| 4.5.9 | <i>Modelo de Circulação das Águas Subterrâneas</i> | <i>165</i> |
| 4.5.10 | <i>Síntese da Estimativa da Disponibilidade Hídrica Subterrânea.....</i> | <i>168</i> |
| 4.6 | ANÁLISE DA QUALIDADE DAS ÁGUAS..... | 169 |
| 4.6.1 | <i>Qualidade das águas superficiais</i> | <i>169</i> |

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------|------------|
| 4.6.2 | <i>Análise da qualidade das águas</i> | 203 |
| 4.6.3 | <i>Qualidade das águas subterrâneas</i> | 207 |
| 4.6.4 | <i>Síntese da análise da qualidade das águas</i> | 224 |
| 4.7 | AVALIAÇÃO INTEGRADA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA..... | 225 |
| 5 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 244 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.1 - Análise de Suficiência da Rede Monitoramento Fluviométrica | 19 |
| Figura 4.2 - Análise de Suficiência da Rede de Monitoramento Pluviométrica | 21 |
| Figura 4.3 - Análise de Suficiência da Rede Monitoramento Meteorológica INMET e AESA-PB | 25 |
| Figura 4.4 - Localização das Estações Meteorológicas do INMET e AESA-PB na Bacia do Rio Paraíba | 26 |
| Figura 4.5 - Insolação total registrada por mês nas estações convencionais | 27 |
| Figura 4.6 - Umidade relativa do ar registrada nas estações convencionais | 27 |
| Figura 4.7 - Velocidade média do vento registrada nas estações convencionais | 28 |
| Figura 4.8 - Velocidade média do vento registrado nas estações automáticas..... | 28 |
| Figura 4.9 - Temperatura média mensal registrada nas estações convencionais..... | 29 |
| Figura 4.10 - Temperatura média mensal registrada nas estações automáticas | 30 |
| Figura 4.11 - Pressão atmosférica média mensal registrada nas estações convencionais | 30 |
| Figura 4.12 - Pressão atmosférica média mensal registrada nas estações automáticas..... | 31 |
| Figura 4.13 - Evapotranspiração potencial mensal na região do PRH-RPB segundo as normais climatológicas do Inmet..... | 32 |
| Figura 4.14 - Evapotranspiração potencial da bacia hidrográfica do Rio Paraíba segundo Francisco & Santos (2017) | 34 |
| Figura 4.15 - Evapotranspiração potencial estimada para os açudes de Acauã e Epitácio Pessoa | 35 |
| Figura 4.16 - Evapotranspiração real mensal na região do PRH-RPB segundo o Inmet | 36 |
| Figura 4.17 - Evapotranspiração real da bacia hidrográfica do Rio Paraíba segundo Francisco & Santos (2017)..... | 37 |
| Figura 4.18 - Evapotranspiração real da bacia hidrográfica do Rio Paraíba calculada com o modelo hidrológico MGB..... | 38 |
| Figura 4.19 - Taxa de evaporação líquida dos açudes estratégicos do PRH-RPB segundo ANA | 40 |
| Figura 4.20 - Vazão de evaporação líquida mensal dos açudes estratégicos do PRH-RPB segundo ANA | 41 |
| Figura 4.21 - Localização das Estações Pluviométricas inventariadas na região da Bacia do Rio Paraíba | 42 |
| Figura 4.22 - Mapa pluviométrico médio anual da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba | 43 |
| Figura 4.23 - Curva duplo-acumulativa para a estação 00634002 (Baixo Curso do Rio Paraíba) | 44 |
| Figura 4.24 - Localização das estações fluviométricas inventariadas na região da Bacia do Rio Paraíba | 45 |
| Figura 4.25 - Fluviogramas simultâneos de vazões médias mensais no período de 1970 a 2022 | 47 |
| Figura 4.26 - Variação sazonal das vazões médias mensais..... | 48 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.27 - Curvas de permanência para as Estações Fluviométricas na Bacia do Rio Paraíba | 49 |
| Figura 4.28 - Curva de permanência para as vazões específicas das estações fluviométricas na Bacia do Rio Paraíba | 50 |
| Figura 4.29 - Ajuste das distribuições de Gumbel e Exponencial para a estação 38830000 ... | 52 |
| Figura 4.30 - Ajuste das distribuições de Gumbel e Exponencial para a estação 38850000 ... | 53 |
| Figura 4.31 - Ajuste das distribuições de Gumbel e Exponencial para a estação 38860000 ... | 53 |
| Figura 4.32 - Ajuste das distribuições de Gumbel e Exponencial para a estação 38880000 ... | 54 |
| Figura 4.33 - Ajuste das distribuições de Gumbel e Exponencial para a estação 38895000 ... | 54 |
| Figura 4.34 - Vazões máximas específicas (L/s.km ²) - média dos ajustes | 56 |
| Figura 4.35 - Vazões máximas (m ³ /s) - média dos ajustes | 56 |
| Figura 4.36 - Estações Pluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento do Alto Paraíba | 60 |
| Figura 4.37 - Estações Pluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento do Médio Paraíba..... | 61 |
| Figura 4.38 - Estações Pluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento do Baixo Paraíba..... | 62 |
| Figura 4.39 - Estações Pluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento da sub-bacia do Taperoá..... | 63 |
| Figura 4.40 - Estações Fluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento do Alto Paraíba | 65 |
| Figura 4.41 - Estações Fluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento do Médio Paraíba..... | 66 |
| Figura 4.42 - Estações Fluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento do Baixo Paraíba..... | 67 |
| Figura 4.43 - Estações Fluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento da sub-bacia do Taperoá..... | 68 |
| Figura 4.44 - Esquema do MGB..... | 73 |
| Figura 4.45 - Regiões com características uniformes da Bacia do Rio Paraíba | 75 |
| Figura 4.46 - Estações fluviométricas, pluviométricas e meteorológicas selecionadas para a modelagem hidrológica no PRH-RPB..... | 77 |
| Figura 4.47 - Destaque do hidrograma da estação 38895000, com comportamento de regularização de vazão (m ³ /s)..... | 79 |
| Figura 4.48 - Vazões específicas com 30% de permanência simuladas para o PRH-RPB | 80 |
| Figura 4.49 - Vazões específicas com 50% de permanência simuladas para o PRH-RPB | 81 |
| Figura 4.50 - Vazões específicas com 90% de permanência simuladas para o PRH-RPB | 82 |
| Figura 4.51 - Superfície de vazões específicas e isolinhas com 30% de permanência simuladas para o PRH-RPB..... | 83 |
| Figura 4.52 - Superfície de vazões específicas e isolinhas com 50% de permanência simuladas para o PRH-RPB..... | 84 |
| Figura 4.53 - Superfície de vazões específicas e isolinhas com 90% de permanência simuladas para o PRH-RPB..... | 85 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.54 - Açudes estratégicos e interanuais de acordo com o PERH-PB | 88 |
| Figura 4.55 - Localização dos açudes monitorados pela AESA..... | 90 |
| Figura 4.56 - Localização dos açudes estratégicos considerados no PRH-RPB | 91 |
| Figura 4.57 - Série histórica de volume dos reservatórios estratégicos do Alto Paraíba | 94 |
| Figura 4.58 - Série histórica de volume dos reservatórios estratégicos do Médio Paraíba em hm ³ | 95 |
| Figura 4.59 - Série histórica de volume dos reservatórios estratégicos do Baixo Paraíba em hm ³ | 95 |
| Figura 4.60 - Série histórica de volume dos reservatórios estratégicos da sub-bacia Taperoá em hm ³ | 96 |
| Figura 4.61 - Volumes observados e vazões afluentes simuladas..... | 98 |
| Figura 4.62- Volumes observados e vazões afluentes simuladas - Açude Epitácio Pessoa ... | 99 |
| Figura 4.63 - Curva de Regularização do Açude Epitácio Pessoa | 102 |
| Figura 4.64 - Curvas de Regularização Adimensionais | 103 |
| Figura 4.65 - Províncias Estruturais existentes na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba | 110 |
| Figura 4.66 - Litologias existentes na região de estudos..... | 112 |
| Figura 4.67 - Litotipos agrupados na região de estudos..... | 113 |
| Figura 4.68 - Sistemas Aquíferos existentes na região de estudos..... | 114 |
| Figura 4.69 - Mapa potenciométrico das cargas hidráulicas para o sistema aquífero Fraturado Semiárido..... | 117 |
| Figura 4.70 - Mapa potenciométrico das cargas hidráulicas para o sistema aquífero Fraturado Centro-Sul..... | 118 |
| Figura 4.71 - Mapa potenciométrico das cargas hidráulicas para o sistema aquífero Barreiras | 119 |
| Figura 4.72 - Mapa potenciométrico das cargas hidráulicas para o sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste..... | 120 |
| Figura 4.73 - Formação Beberibe | 124 |
| Figura 4.74 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Estáticos dos poços tubulares do sistema aquífero Fraturado Semiárido, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba | 128 |
| Figura 4.75 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Estáticos dos poços tubulares do sistema aquífero Fraturado Centro-Sul, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba | 129 |
| Figura 4.76 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Estáticos dos poços tubulares do sistema aquífero Barreiras, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba..... | 130 |
| Figura 4.77 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Estáticos dos poços tubulares do sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba..... | 131 |
| Figura 4.78 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Dinâmicos dos poços tubulares do sistema aquífero Fraturado Semiárido, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba | 132 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.79 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Dinâmicos dos poços tubulares do sistema aquífero Fraturado Centro-Sul, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba | 133 |
| Figura 4.80 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Dinâmicos dos poços tubulares do sistema aquífero Barreiras, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba..... | 134 |
| Figura 4.81 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Dinâmicos dos poços tubulares do sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba | 135 |
| Figura 4.82 - Vazões de Estabilização (m ³ /h) na bacia hidrográfica do Rio Paraíba..... | 138 |
| Figura 4.83 - Vazões de Estabilização (m ³ /h) dos poços tubulares na região de João Pessoa..... | 139 |
| Figura 4.84 - Vazões Específicas (m ³ /h/m) na bacia hidrográfica do Rio Paraíba..... | 140 |
| Figura 4.85 - Vazões Específicas (m ³ /h/m) dos poços tubulares na região de João Pessoa..... | 141 |
| Figura 4.86 – Histograma log normal da vazão média horária para os poços do Sistema Aquífero Barreiras..... | 142 |
| Figura 4.87 - Histograma log normal da vazão média horária para os poços do Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul | 142 |
| Figura 4.88 - Histograma log normal da vazão média horária para os poços do Sistema Aquífero Fraturado Semiárido | 143 |
| Figura 4.89 - Histograma log normal da vazão média horária para os poços do Sistema Aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste | 144 |
| Figura 4.90 - Tipo de material e profundidade dos poços da região do PRH-RPB..... | 147 |
| Figura 4.91 - Percentual por tipo de uso em toda a Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba..... | 148 |
| Figura 4.92 - Percentual por tipo de uso, individualizados por Sistema Aquífero - Barreiras | 149 |
| Figura 4.93 - Percentual por tipo de uso, individualizados por Sistema Aquífero - Fraturado Centro-Sul..... | 150 |
| Figura 4.94 - Percentual por tipo de uso, individualizados por Sistema Aquífero - Fraturado Semiárido..... | 150 |
| Figura 4.95 - Percentual por tipo de uso, individualizados por Sistema Aquífero - Litorâneo Nordeste-Sudeste | 151 |
| Figura 4.96 - Mapa pluviométrico médio anual da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba (mm/ano) | 154 |
| Figura 4.97 - Mapa da RPD - recarga potencial direta, em L/s.km ² | 159 |
| Figura 4.98 - Mapa da RPE - reserva potencial explorável, em L/s.km ² | 160 |
| Figura 4.99 - Diagrama ilustrativo do cálculo do método GOD | 162 |
| Figura 4.100 - Mapa de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas | 164 |
| Figura 4.101 - Mapa de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas com destaque para a macrorregião entre as cidades de Campina Grande e João Pessoa..... | 165 |
| Figura 4.102 - Modelo de Circulação das Águas Subterrâneas na bacia hidrográfica..... | 167 |
| Figura 4.103 - Estações de medição de qualidade da Água listadas pela PERH na Bacia do Rio Paraíba | 170 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.104 - Estações de medição de qualidade da água listadas pela ANA na Bacia do Rio Paraíba | 171 |
| Figura 4.105 - Mapa de uso e ocupação do solo | 173 |
| Figura 4.106 - Distribuição da cobertura do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba | 174 |
| Figura 4.107 - Distribuição do número de outorgas existentes na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba | 175 |
| Figura 4.108 - Distribuição do volume anual outorgado na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba | 175 |
| Figura 4.109 - Distribuição do volume anual outorgado na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba | 177 |
| Figura 4.110 - Mapeamento das ETAs, Outorgas cadastradas e demais sistemas hidráulicos cadastrados na Bacia do Rio Paraíba | 178 |
| Figura 4.111 - Modelo proposto para seleção de áreas e usuários das áreas de contribuição | 179 |
| Figura 4.112 - Concentrações de OD medidas pela ANA na Bacia do Paraíba..... | 186 |
| Figura 4.113 - Estações de medição de qualidade da Água na Bacia do Rio Paraíba..... | 187 |
| Figura 4.114 - Distribuição das medições de turbidez na Bacia do Rio Paraíba..... | 188 |
| Figura 4.115 - Valores de turbidez medidos pela ANA na Bacia do Paraíba (UNT) | 189 |
| Figura 4.116 - Valores de pH medidos pela ANA na Bacia do Paraíba..... | 190 |
| Figura 4.117 - Distribuição das medições de coliformes na Bacia do Rio Paraíba..... | 192 |
| Figura 4.118 - Distribuição das medições de ortofosfato na Bacia do Rio Paraíba | 194 |
| Figura 4.119 - Concentrações medias de ortofosfato por estação do Ano | 195 |
| Figura 4.120 - Concentração de Nitrogênio amoniacal medidos pela ANA na Bacia do Paraíba (mg/L)..... | 196 |
| Figura 4.121 - Concentração de Nitrato medidos pela ANA na Bacia do Paraíba (mg/L) | 197 |
| Figura 4.122 - Concentração de Nitrogênio amoniacal medidos pela ANA na Bacia do Paraíba (mg/L)..... | 198 |
| Figura 4.123 - Valores de clorofila-a medidos pela ANA na Bacia do Paraíba (µg/L) | 199 |
| Figura 4.124 - Valores de cianobactérias medidos pela ANA na Bacia do Paraíba (células/ml) | 201 |
| Figura 4.125 - Distribuição das medições de salinidade na Bacia do Rio Paraíba..... | 202 |
| Figura 4.126 - Distribuição do IQA nas estações de monitoramento da Bacia do Paraíba.... | 205 |
| Figura 4.127 - Distribuição do IET nas estações de monitoramento da Bacia do Paraíba.... | 207 |
| Figura 4.128 - Mapeamento dos poços de monitoramento na bacia hidrográfica do Paraíba | 209 |
| Figura 4.129 - Diagrama de Piper das águas subterrâneas do Estado da Paraíba | 211 |
| Figura 4.130 - Distribuição nos valores de concentração de cloretos nos poços monitorados pela CAGEPA (mg/L)..... | 212 |
| Figura 4.131 - Distribuição nas concentrações de alcalinidade nos poços monitorados pela CAGEPA (mg/L)..... | 213 |
| Figura 4.132 - Distribuição nos valores de concentração de dureza nos poços monitorados pela CAGEPA (mg/L)..... | 215 |
| Figura 4.133 - Distribuição dos valores médios de salinidade medidos em poços confinados | 217 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.134 - Distribuição dos valores médios de salinidade medidos em poços de aquífero livre..... | 218 |
| Figura 4.135 - Distribuição nos valores de concentração de SDT nos poços monitorados pela CAGEPA (mg/L)..... | 219 |
| Figura 4.136 - Distribuição dos valores médios de turbidez na bacia do Paraíba..... | 220 |
| Figura 4.137 - Distribuição dos valores médios de cor na bacia do Paraíba..... | 221 |
| Figura 4.138 - Distribuição dos valores médios de pH na bacia do Paraíba..... | 222 |
| Figura 4.139 - Distribuição dos valores de E-Coli. nos poços monitorados na bacia do Paraíba..... | 224 |
| Figura 4.140 - Vazões médias de longo termo (Qmlt) para as UPHs do PRH-RPB..... | 227 |
| Figura 4.141 - Vazões médias de longo termo (Qmlt) para as bacias afluentes dos açudes estratégicos do PRH-RPB..... | 228 |
| Figura 4.142 - Mapa de localização dos poços tubulares cadastrados no estado da Paraíba pelo SIAGAS - Sub-bacia do Alto Paraíba..... | 231 |
| Figura 4.143 - Mapa de localização dos poços tubulares cadastrados no estado da Paraíba pelo SIAGAS - Sub-bacia do Médio Paraíba..... | 232 |
| Figura 4.144 - Mapa de localização dos poços tubulares cadastrados no estado da Paraíba pelo SIAGAS - Sub-bacia do Baixo Paraíba..... | 233 |
| Figura 4.145 - Mapa de localização dos poços tubulares cadastrados no estado da Paraíba pelo SIAGAS - Sub-bacia do Taperoá..... | 234 |
| Figura 4.146 - Mapa de produtividade dos poços tubulares cadastrados na bacia hidrográfica do Rio Paraíba pelo SIAGAS..... | 235 |
| Figura 4.147 - Mapa de produtividade dos poços tubulares cadastrados pelo SIAGAS com destaque para a macrorregião entre as cidades de Campina Grande e João Pessoa..... | 236 |
| Figura 4.148 - Mapa da relação entre vazão outorgada e RPE, em %..... | 239 |
| Figura 4.149 - Mapa da relação entre vazão outorgada “dobrada” e RPE, em %..... | 240 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 4.1 - Densidade Mínima da Rede de Monitoramento..... | 18 |
| Tabela 4.2 - Análise da Densidade da Rede Fluviométrica por sub-bacia..... | 18 |
| Tabela 4.3 - Análise da Densidade da Rede Pluviométrica por sub-bacia..... | 20 |
| Tabela 4.4 - PCDs da AESA-PB na Bacia do Rio Paraíba (PB)..... | 22 |
| Tabela 4.5 - Dados coletados pelos diferentes tipos de PCDs da AESA-PB..... | 23 |
| Tabela 4.6 - Análise da Densidade da Rede Meteorológica por sub-bacia..... | 24 |
| Tabela 4.7 - Estações Fluviométricas com dados disponíveis no Hidroweb..... | 46 |
| Tabela 4.8 - Vazões de referência para diferentes permanências (m ³ /s)..... | 49 |
| Tabela 4.9 - Vazões específicas de referência para diferentes permanências (L/s.km ²)..... | 50 |
| Tabela 4.10 - Resultado do ajuste de distribuições de probabilidade para estudo de vazões máximas..... | 55 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 4.11 - Resumo da análise de suficiência da rede de monitoramento hidrometeorológico | 57 |
| Tabela 4.12 - Estudos de modelagem hidrológica na região semiárida do nordeste brasileiro | 70 |
| Tabela 4.13 - Açudes por Sub-bacias | 86 |
| Tabela 4.14 - Açudes monitorados pela AESA | 89 |
| Tabela 4.15 - Reservatórios estratégicos no âmbito do PRH-RPB | 90 |
| Tabela 4.16 - Volumes atuais e situação dos reservatórios estratégicos do PRH-RPB em maio/2024 | 92 |
| Tabela 4.17 - Curva de regularização do açude Epitácio Pessoa | 102 |
| Tabela 4.18 - Vazões regularizáveis para garantias de 70% a 99% (m ³ /s) | 104 |
| Tabela 4.19 - Análise da garantia associada a capacidade máxima de armazenamento dos reservatórios estratégicos do PRH-RPB | 105 |
| Tabela 4.20 - Dados de vazão de estabilização (m ³ /h) | 136 |
| Tabela 4.21 - Dados de vazão específica (m ³ /h/m) | 136 |
| Tabela 4.22 - Revestimentos dos poços perfurados na região do PRH-RPB | 145 |
| Tabela 4.23 - Profundidade dos poços perfurados na região do PRH-RPB | 145 |
| Tabela 4.24 - Domínio hidrogeológico x tipo de uso x número de poços | 149 |
| Tabela 4.25 - Precipitação por Domínio Hidrogeológico..... | 153 |
| Tabela 4.26 - Valores de RPD e RPE..... | 158 |
| Tabela 4.27 - Datas de validade das outorgas subterrâneas por sistema aquífero..... | 161 |
| Tabela 4.28 - Índice “O” utilizados | 163 |
| Tabela 4.29 - Número de Estações do monitoramento da CAGEPA e SUDEMA | 170 |
| Tabela 4.30 - Número de Estações do monitoramento da ANA (Hidroweb)..... | 171 |
| Tabela 4.31 - Distribuição dos volumes anuais outorgados por fontes hídricas na Bacia do Rio Paraíba | 175 |
| Tabela 4.32 - Distribuição das ETAs na Bacia do Rio Paraíba..... | 176 |
| Tabela 4.33 - cobertura de solo na região a montante do reservatório Mucutu | 180 |
| Tabela 4.34 - Cobertura de solo há montante de cada um dos pontos de monitoramento | 180 |
| Tabela 4.35 - Número de usuários cadastrados, ETAs e demais estruturas hidráulicas a montante de cada ponto de Monitoramento | 182 |
| Tabela 4.36 - Concentração média de OD por estação do ano (mg/L) | 185 |
| Tabela 4.37 - Concentração média de DBO ₅ por sub-bacia (mg/L)..... | 187 |
| Tabela 4.38 - Valores médios de turbidez por sub-bacia (UNT)..... | 188 |
| Tabela 4.39 - Valores médios de turbidez por estação do ano (UNT) | 189 |
| Tabela 4.40 - Valores médios de pH por estação do ano | 191 |
| Tabela 4.41 - Limites de Balneabilidade | 191 |
| Tabela 4.42 - Concentração média de coliformes por sub-bacia..... | 193 |
| Tabela 4.43 - Contagem de E-Coli segundo da CAGEPA e SUDEMA (PERH) | 193 |
| Tabela 4.44 - Valores médios de concentração de Ortofosfato por sub-bacia (mg/L)..... | 194 |
| Tabela 4.45 - Concentração média de nitrogênio amoniacal por estação do ano (mg/L) | 195 |
| Tabela 4.46 - Concentração média de clorofila-a pôr estação do ano (µg/L) | 199 |
| Tabela 4.47 - Concentração média de cianobactérias por estação do ano (células/ml)..... | 200 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 4.48 - Valores médios de salinidade por sub-bacia (ppm) | 202 |
| Tabela 4.49 - Concentrações média de metais pesados por sub-bacia (mg/L)..... | 203 |
| Tabela 4.50 - Classificação do IQA..... | 204 |
| Tabela 4.51 - Valores de IQAs ao logo da bacia hidrográfica do Paraíba | 204 |
| Tabela 4.52 -Classificação do Estado Trófico para rios segundo IET | 206 |
| Tabela 4.53 - Valores de IETs ao logo da bacia hidrográfica do Paraíba | 207 |
| Tabela 4.54 - Número de Estações do monitoramento..... | 209 |
| Tabela 4.55 - Distribuição análises de Alcalinidade nos poços monitorados pela CAGEPA (mg/L)..... | 214 |
| Tabela 4.56 - Valores médios de Salinidade dos poços na Bacia do Paraíba (mg/L) | 216 |
| Tabela 4.57 - Valores médios de turbidez dos poços na Bacia do Paraíba (uT) | 220 |
| Tabela 4.58 - Valores médios de Cor dos poços na Bacia do Paraíba (uT) | 221 |
| Tabela 4.59 - Valores médios de pH dos poços na Bacia do Paraíba | 222 |
| Tabela 4.60 - Valores médios de pH dos poços na Bacia do Paraíba | 223 |
| Tabela 4.61 - Distribuição das análises de E-Coli nos poços monitorados pela AESA..... | 223 |
| Tabela 4.62 - Disponibilidade hídrica integrada (Subterrânea + Superficial)..... | 243 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| AESA | - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba |
| ANA | - Agência Nacional de Águas e Saneamento |
| BH-RPB | - Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba |
| CAGEPA | - Companhia de Água e Esgoto da Paraíba |
| CBH | - Comitê de Bacia Hidrográfica |
| CEMADEN | - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais |
| CETESB | - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo |
| COBRAPE | - Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos |
| CONAMA | - Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CPRM | - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil |
| DBO | - Demanda Bioquímica de Oxigênio |
| DNOCS | - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas |
| ETA | - Estação de Tratamento de Água |
| IBGE | - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| INMET | - Instituto Nacional de Meteorologia |
| IPH | - Instituto de Pesquisas Hidráulicas |
| MS | - Ministério da Saúde |
| MGB | - Modelo de Grandes Bacias |
| MLT | - Vazão Média de Longo Termo |
| PERH-PB | - Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba |
| PCDs | - Plataformas de Coleta de Dados |
| PISF | - Projeto de Integração do Rio São Francisco |
| PRH-RPB | - Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba |
| RIMAS | - Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas |
| RPD | - Recarga Potencial Direta |
| RPE | - Reserva Potencial Explotável |
| SEIRHMA-PB | - Secretaria de Estado da Infraestrutura e dos Recursos Hídricos e do Meio Ambiente |
| SGB | - Serviço Geológico do Brasil |
| SIAGAS | - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas |
| SIG | - Sistema de Informação Geográfica |
| SISDAGRO | - Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária |
| SMAP | - <i>Soil Moisture Accounting Procedure</i> |
| SNIRH | - Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos |
| SNSH | - Secretaria Nacional de Segurança Hídrica |
| SUDEMA | - Superintendência de Administração do Meio Ambiente da Paraíba |
| TdR | - Termos de Referência |
| UPH | - Unidade de Planejamento Hídrico |
| URHs | - Unidades de Respostas Hidrológicas |
| WMO | - <i>World Meteorological Organization</i> |

2 INTRODUÇÃO

Os Planos de Recursos Hídricos são instrumentos de planejamento e tem como objetivo primordial promover a harmonização entre os usos múltiplos da água na bacia e orientar a implementação dos instrumentos de gestão previstos nas Políticas de Recursos Hídricos. A elaboração de um Plano de Recursos Hídricos deve traduzir seus objetivos em metas estratégicas e quantitativas que possam orientar as decisões do sistema de gestão de recursos hídricos. A reflexão inicial do trabalho deve estar embasada em uma análise crítica da situação atual dos recursos hídricos da bacia, que permita observar quais são as principais lacunas, as quais devem ser trabalhadas intensamente durante a execução da consultoria, bem como as iniciativas e contribuições que geraram avanços na gestão dos recursos hídricos nos últimos anos, e que devem ser fortalecidas.

Diversas questões relacionadas aos recursos hídricos cercam a elaboração do PRH-RPB, dentre elas, a transposição da bacia do rio São Francisco, a estiagem prolongada da região do semiárido, a alta variabilidade de precipitações e vazões (o que torna a região imprevisível), as questões cruciais do setor de saneamento (ausência de água para diluição de esgotos, por exemplo). Todos esses elementos devem ser analisados de maneira conjunta, de modo a proporcionar a Secretaria de Estado da Infraestrutura e dos Recursos Hídricos (SEIRH) juntamente com a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), informações que subsidiem tomadas de decisão no âmbito da gestão dos recursos hídricos.

O Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba será composto por quatro fases. A Fase Preliminar é composta pelo Relatório de Planejamento das Ações e Mobilização e Metodologia, que abordará o detalhamento das propostas metodológicas com a descrição das atividades envolvidas. A Fase A é referente ao Diagnóstico da Bacia Hidrográfica, onde será realizada a caracterização e avaliação do quadro natural e antrópico na Bacia, além das restrições e potencialidades hídricas relacionadas às demandas atuais. A Fase B é fundamentada no diagnóstico da situação atual, apresentado na fase A, e corresponde à construção dos possíveis cenários ao longo do tempo (curto, médio e longo prazo) considerando condições tendenciais e cenários em situações mais críticas ou desfavoráveis, e outras mais favoráveis e confortáveis. Além disso, será realizada a análise a prospecção de medidas destinadas a compatibilizar as disponibilidades hídricas com as demandas no cenário desejável. A Fase C corresponde à consolidação do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba propriamente dita, com participação de consultas públicas para o acompanhamento e implementação do plano e um sistema de informações geográficas para apoio à fase de diagnóstico e dos produtos intermediários e finais.

Alinhado com a capacidade técnica da AESA, a participação social, expressa por meio de eventos participativos ao longo do Plano, permitirá o aferimento sobre os objetivos reais do PRH-RPB, pois envolverá todos os setores usuários na tomada de decisões estratégicas, que irão culminar no estabelecimento dos vetores de crescimento regional e estadual.

3 OBJETIVO

O objetivo do presente relatório é apresentar os dados e estudos levantados para a elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba (PRH-RPB), detalhando as informações obtidas e que serão utilizadas nas próximas fases do estudo e comporão o banco de dados georreferenciados, o SIG-Plano. Contudo, é importante destacar que a atividade de levantamento de informações é contínua durante toda a construção do PRH-RPB, bem como do SIG-Plano, de modo que poderão ser atualizados e incorporados novos dados e estudos conforme o desenvolvimento do estudo e a necessidade identificada.

Ademais, o Tomo I deste relatório também tem como objetivo apresentar a caracterização e avaliação natural e antrópica na bacia, englobando seus aspectos naturais, físicos, ambientais e socioeconômicos, focando na relação e interferência desses fatores com os recursos hídricos da região e suas implicações no âmbito do PRH-RPB.

Já o Tomo II tem como finalidade caracterizar e apresentar a atualização do estudo hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, com a avaliação da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea da bacia em termos quantitativos e qualitativos, e culminando na avaliação integrada de seus recursos hídricos.

Por fim, o Tomo III contém os cálculos de demandas para o uso de água, as cargas geradas e o balanço hídrico qualitativo e quantitativo, além da análise integrada de todas as informações que compõem a Fase A, de Diagnóstico dos Recursos Hídricos da Bacia.

4 SITUAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS – DISPONIBILIDADE HÍDRICA

4.1 BASE DE DADOS DE MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

O monitoramento hidrometeorológico do estado da Paraíba é responsabilidade da Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AESAPB). Para além desta rede de estações hidrometeorológicas, existem na bacia do Rio Paraíba estações de responsabilidade de outros órgãos como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e o Serviço Geológico Brasileiro (SGB). Para além dos bancos de dados próprios destes órgãos, existe o banco de dados hidrometeorológicos gerenciado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) que centraliza dados de monitoramento de todo o país, proveniente dos diferentes operadores (SNIRH, 2024).

4.1.1 Rede de monitoramento hidrometeorológico existente

Para uma gestão eficaz dos recursos hídricos, é necessário monitorar não apenas a qualidade, mas também a quantidade de água nos rios. Isso significa que é necessário acompanhar de forma constante e sistemática a disponibilidade hídrica, abordando tanto aspectos qualitativos quanto quantitativos (ANA, 2015).

Desse modo, é necessário avaliar a densidade da rede de monitoramento de recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba para garantir uma gestão integrada eficiente desses recursos. Assim, este item tem o propósito de avaliar se a quantidade dos pontos de monitoramentos na região é adequada, considerando principalmente a quantidade de estações de medição de fluxo de água, sedimentos, qualidade de água e pluviosidade disponíveis.

Conforme observado por Soares (2001), é difícil de se estabelecer uma densidade uniforme de estações de monitoramento que seja adequada para toda a região. Estudos indicam que os principais fatores que influenciam na definição de uma densidade adequada incluem as características geográficas e hidrológicas específicas da área, o padrão da rede hidrográfica, a demanda por dados hidrológicos ou meteorológicos para o planejamento, construção e operação de estruturas hidráulicas, além da densidade populacional e o nível de desenvolvimento econômico local.

Considerando os desafios em estabelecer uma densidade adequada de estações de monitoramento de referência, alguns estudos adotam o valor recomendado pela *World Meteorological Organization* (WMO). A WMO estabeleceu diretrizes para uma rede mínima de monitoramento, adaptadas às características climáticas e topográficas específicas de cada região, a qual é atualizada periodicamente. Com base nesses critérios, a avaliação da densidade de estações de monitoramento para a bacia hidrográfica do Rio Paraíba considerou os valores apresentados na Tabela 4.1, os quais estão relacionados à área de drenagem.

Tabela 4.1 - Densidade Mínima da Rede de Monitoramento

| Unidade Fisiográfica | Densidade de estações por tipo (km ² /estação) | | |
|----------------------|-----------------------------------------------------------|------------|--------|
| | Precipitação | Evaporação | Vazão |
| Costeira | 900 | 50.000 | 2.750 |
| Montanhas | 250 | 50.000 | 1.000 |
| Planícies Interiores | 575 | 5.000 | 1.875 |
| Colinas/Ondulantes | 575 | 50.000 | 1.875 |
| Pequenas ilhas | 25 | 50.000 | 300 |
| Áreas urbanas | - | - | - |
| Polar/árido | 100.000 | 10.000 | 20.000 |

Fonte: WMO (2020).

Portanto, para a avaliação da adequação do número de estações, considerou-se:

- A sub-bacia do Baixo Paraíba como zona Costeira;
- As demais sub-bacias como Planícies Interiores;
- As densidades das estações de evaporação para as estações meteorológicas.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para cada um dos tipos de estação.

4.1.1.1 Rede Fluviométrica

As estações de monitoramento fluvial são responsáveis por registrar diferentes tipos de dados, como os níveis de água (cm), vazões (m³/s), a qualidade da água, um resumo das descargas, a presença de sedimentos e a análise do perfil transversal do rio. Na Bacia do Rio Paraíba existem 13 estações fluviométricas com séries de dados de vazão disponíveis para *download* através do portal *Hidroweb* (SNIRH; 2024). Uma estação da AESA-PB e outras 12 do SGB. Conforme os parâmetros da WMO (2020), a densidade de estações fluviométricas para a bacia do Rio Paraíba é de 1.549,59 km²/estação. Portanto, quando avaliada em sua área total, a bacia possui uma rede de monitoramento fluviométrico numericamente suficiente.

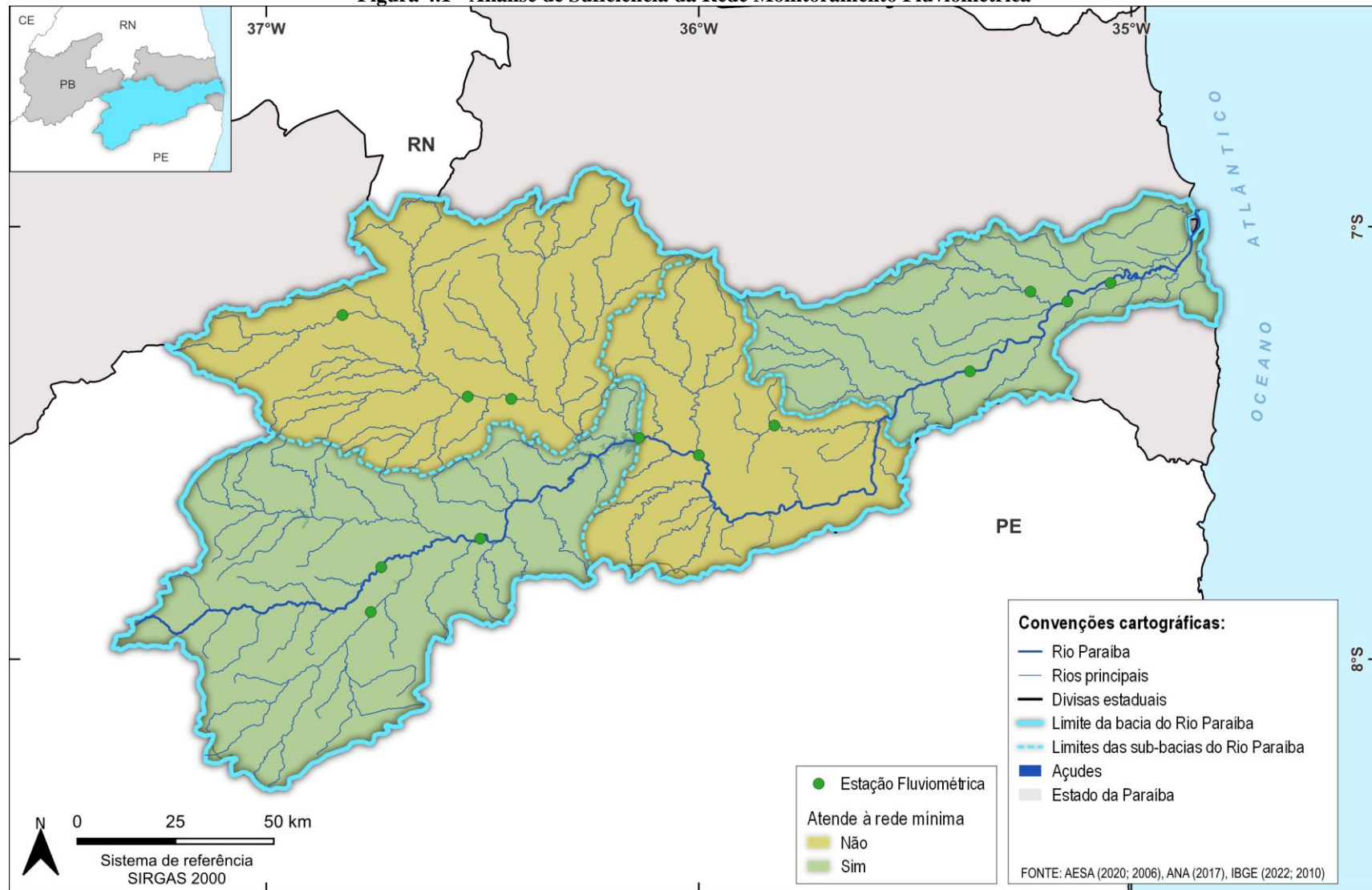
A fim de contemplar a distribuição espacial dessas estações, também foi realizada a avaliação da densidade das estações por sub-bacia. Adotou-se, para tanto, a densidade mínima correspondente a região costeira para a sub-bacia do Baixo Paraíba, enquanto as demais sub-bacias foram consideradas como planícies interiores. Os resultados desta análise são apresentados pela Tabela 4.2 e pela Figura 4.1. Verifica-se que apenas as sub-bacias do Médio Paraíba e do Rio Taperoá necessitam de complementação da rede fluviométrica. Por fim, a distribuição dessas estações na bacia pode ser verificada na Figura 4.1.

Tabela 4.2 - Análise da Densidade da Rede Fluviométrica por sub-bacia

| Sub-bacia | Área (km ²) | Número de estações | Densidade das estações (km ² /estação) | Avaliação da rede existente | | |
|---------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|
| | | | | Nº mínimo de estações | Possui déficit? | Estações propostas |
| Alto Paraíba | 6.727,70 | 4 | 1.681,93 | 4 | - | - |
| Médio Paraíba | 3.797,58 | 2 | 1.898,79 | 3 | sim | 1 |
| Baixo Paraíba | 3.950,52 | 4 | 987,63 | 2 | - | - |
| Taperoá | 5.668,24 | 3 | 1.889,41 | 4 | sim | 1 |
| Total | 20.144,04 | 13 | 1.549,54 | 11 | - | - |

Fonte: Cobrape (2024), com informações de ANA (2024) e WMO (2020).

Figura 4.1 - Análise de Suficiência da Rede Monitoramento Fluviométrica



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de AESA (2024), ANA (2024) e WMO (2020).

4.1.1.2 Rede Pluviométrica

A rede pluviométrica é responsável, basicamente, pelo monitoramento da precipitação na bacia, que é a principal forma de recarga hídrica de uma bacia hidrográfica. No estado da Paraíba a Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AESAPB), conforme dados fornecidos pela própria agência, opera atualmente 242 estações pluviométricas, das quais 79 estão localizadas na Bacia do Rio Paraíba.

Considerando a bacia como um todo, a densidade da rede pluviométrica resulta em 254,99 km²/estação. A rede mínima indicada pela WMO (2020) para regiões costeiras e planícies interiores, respectivamente, é de uma estação a cada 900 km² e 525 km². Portanto, em ambas as categorias de classificação, a densidade da rede pluviométrica gerenciada pela AESAPB é suficiente. Entretanto, é necessário avaliar se quanto a distribuição espacial nas sub-bacias, a rede continua atendendo o critério de suficiência. Novamente foi considerado o parâmetro de região costeira para o Baixo Paraíba e o de planícies interiores para as demais sub-bacias.

Os resultados apresentaram o mesmo padrão do resultado obtido para a bacia como um todo, assim como apresenta a Tabela 4.3. Todas as sub-bacias possuem uma quantidade suficiente de estações pluviométricas.

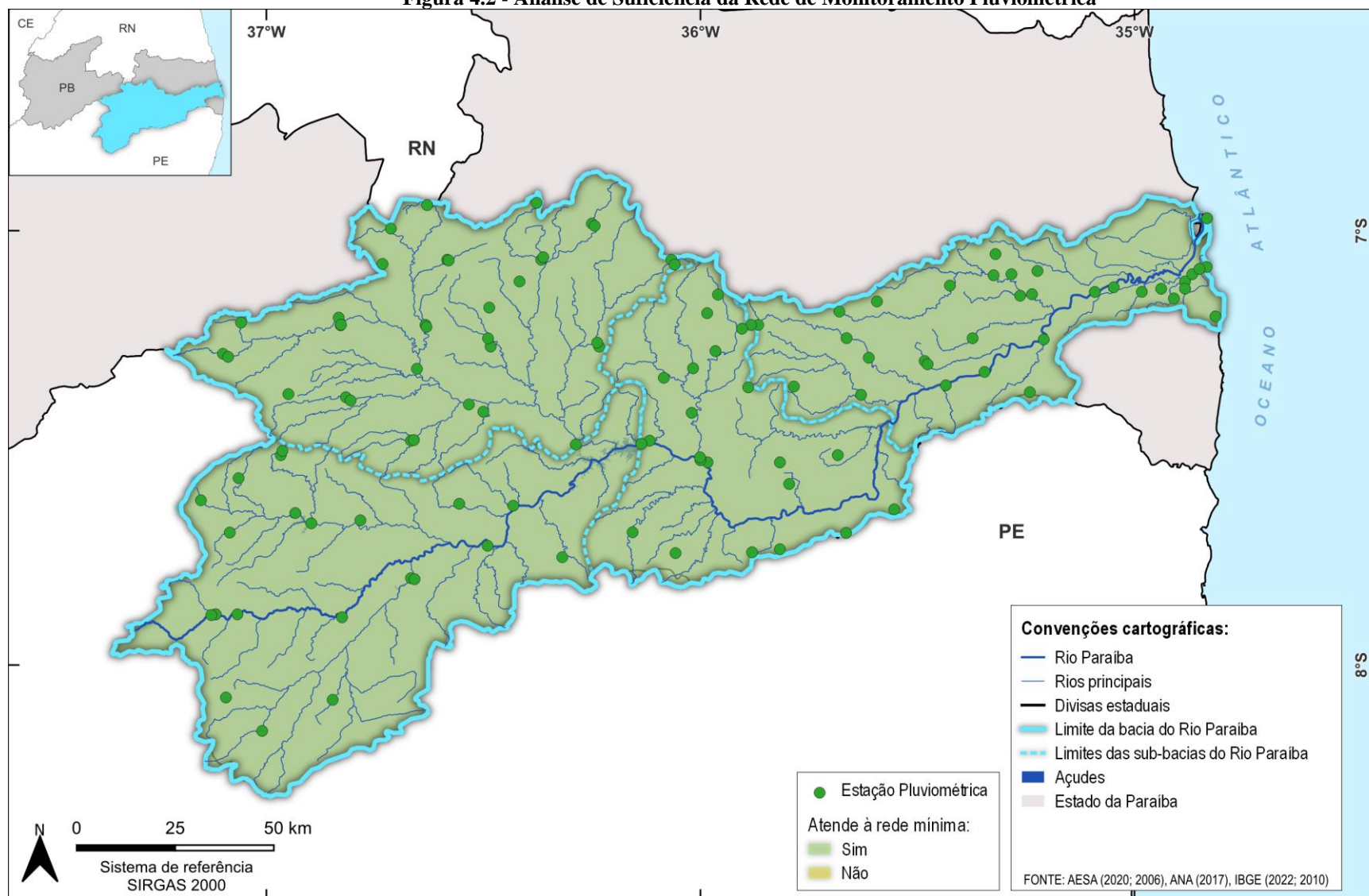
Tabela 4.3 - Análise da Densidade da Rede Pluviométrica por sub-bacia

| Sub-bacia | Área (km ²) | Número de estações | Densidade das estações (km ² /estação) | Avaliação da rede existente | | |
|---------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|
| | | | | Nº mínimo de estações | Possui déficit? | Estações propostas |
| Alto Paraíba | 6.727,70 | 16 | 420,48 | 12 | - | - |
| Médio Paraíba | 3.797,58 | 16 | 237,35 | 7 | - | - |
| Baixo Paraíba | 3.950,52 | 26 | 151,94 | 5 | - | - |
| Taperoá | 5.668,24 | 21 | 269,92 | 10 | - | - |
| Total | 20.144,04 | 79 | 254,99 | 36 | - | - |

Fonte: Cobrape (2024), com informações de ANA (2024) e WMO (2020).

Cabe destacar que esta análise é uma forma de avaliar a rede de monitoramento quanto a quantidade de estações por área de bacia hidrográfica, mas a distribuição espacial desses pontos de monitoramento entre si também é um aspecto importante. A Figura 4.2 apresenta a localização das estações pluviométricas ao longo da Bacia do Rio Paraíba e, como contabilizado na Tabela 4.3, a região do Alto Paraíba é a que apresenta menor densidade de monitoramento pluviométrico, seguida da sub-bacia do Taperoá. Essas sub-bacias tem um comportamento climatológico e hidrológico semelhante, característicos do semiárido paraibano.

Figura 4.2 - Análise de Suficiência da Rede de Monitoramento Pluviométrica



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de AESA (2024) e WMO (2020).

4.1.1.3 Rede Meteorológica

A rede meteorológica presente na bacia consiste em duas diferentes redes: uma rede estadual, que consiste nas Plataformas de Coletas de Dados (PCDs) da AESA, e a rede nacional, composta pelas estações do INMET.

O INMET possui quatro estações automáticas, sendo uma em cada sub-bacia, e mais três estações convencionais muito próximas às estações automáticas, sendo a exceção a sub-bacia do Rio Taperoá, que possui apenas a estação automática. O PERH-PB (2022) relata uma análise comparativa entre os dados das PCDs da AESA-PB e as do INMET, constatando valores médios semelhantes para ambas as redes.

Conforme o PERH-PB (2022), na área de estudo do PRH-RPB, são mencionadas cinco PCDs da AESA, localizadas nos municípios de Sumé (Alto Paraíba), Campina Grande (Médio Paraíba), Itatuba e João Pessoa (Baixo Paraíba) e de Soledade (Taperoá). Entretanto, foi disponibilizado pela AESA o acesso aos dados das 96 PCDs existentes no estado da Paraíba, das quais 33 estão localizadas na Bacia do rio Paraíba, conforme apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - PCDs da AESA-PB na Bacia do Rio Paraíba (PB)

| Código AESA-PB | Latitude | Longitude | Sub-bacia |
|-----------------------|-----------------|------------------|------------------|
| AESA-C016 | -7,7294 | -36,5021 | Alto Paraíba |
| AESA-C028 | -7,8827 | -37,1275 | Alto Paraíba |
| AESA-C043 | -8,0810 | -36,8419 | Alto Paraíba |
| AESA-G004 | -7,6622 | -36,8443 | Alto Paraíba |
| AESA-A001 | -7,2525 | -35,9468 | Médio Paraíba |
| AESA-A002 | -7,4296 | -35,8999 | Médio Paraíba |
| AESA-C001 | -7,2256 | -35,9048 | Médio Paraíba |
| AESA-C003 | -7,7307 | -36,0573 | Médio Paraíba |
| AESA-C030 | -7,6371 | -35,5502 | Médio Paraíba |
| AESA-G005 | -7,3886 | -36,0648 | Médio Paraíba |
| AESA-G023 | -7,6929 | -35,6583 | Médio Paraíba |
| AESA-A005 | -7,2540 | -35,6527 | Baixo Paraíba |
| AESA-A017 | -7,0264 | -34,9153 | Baixo Paraíba |
| AESA-A018 | -7,0692 | -35,0284 | Baixo Paraíba |
| AESA-C004 | -7,1106 | -34,8497 | Baixo Paraíba |
| AESA-C006 | -7,3670 | -35,6224 | Baixo Paraíba |
| AESA-C007 | -7,2990 | -35,4800 | Baixo Paraíba |
| AESA-C015 | -7,2387 | -35,8619 | Baixo Paraíba |
| AESA-C023 | -7,1500 | -34,7978 | Baixo Paraíba |
| AESA-C036 | -7,2655 | -35,2453 | Baixo Paraíba |
| AESA-C040 | -7,1535 | -34,9678 | Baixo Paraíba |
| AESA-G003 | -7,1598 | -35,8811 | Baixo Paraíba |
| AESA-G011 | -7,3053 | -35,3455 | Baixo Paraíba |
| AESA-G013 | -7,1963 | -34,8138 | Baixo Paraíba |
| AESA-G018 | -7,0928 | -35,2235 | Baixo Paraíba |
| AESA-A016 | -7,1299 | -36,0881 | Taperoá |

| Código AESA-PB | Latitude | Longitude | Sub-bacia |
|-----------------------|-----------------|------------------|------------------|
| AESA-C012 | -7,4920 | -36,2874 | Taperoá |
| AESA-C024 | -7,0305 | -36,5649 | Taperoá |
| AESA-C039 | -7,2747 | -36,2304 | Taperoá |
| AESA-C044 | -7,4821 | -36,6600 | Taperoá |
| AESA-C046 | -7,0606 | -36,3567 | Taperoá |
| AESA-C048 | -7,2162 | -36,8268 | Taperoá |
| AESA-G007 | -7,1784 | -36,4835 | Taperoá |

Fonte: Disponibilizado por AESA (2024).

As PCDs da AESA-PB recebem o código de acordo com o tipo de estação, as estações do tipo Agrometeorológica, tem o código iniciando com a letra A. Da mesma forma as estações Meteorológicas e Meteorológicas CSBS, recebem o código iniciando com a letra C e G, respectivamente. Os dados que são coletados por cada um dos tipos de PCDs estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Dados coletados pelos diferentes tipos de PCDs da AESA-PB

| Dado coletado | Agrometeorológica | Meteorológica | Meteorológica CSBS |
|--------------------------------|--------------------------|----------------------|---------------------------|
| Conteúdo de Água no Solo 10 cm | ✓ | - | ✓ |
| Conteúdo de Água no Solo 20 cm | ✓ | - | ✓ |
| Conteúdo de Água no Solo 30 cm | ✓ | - | ✓ |
| Conteúdo de Água no Solo 40 cm | ✓ | - | ✓ |
| Conteúdo de Água no Solo 50 cm | ✓ | - | ✓ |
| Conteúdo de Água no Solo 60 cm | ✓ | - | ✓ |
| Corrente de Recarga | ✓ | ✓ | ✓ |
| Evapotranspiração | ✓ | ✓ | ✓ |
| Precipitação do Período | ✓ | ✓ | ✓ |
| Pressão Atmosférica | ✓ | ✓ | ✓ |
| Radiação Solar | ✓ | ✓ | ✓ |
| Sensor de Porta Aberta | ✓ | ✓ | ✓ |
| Temperatura do Ar | ✓ | ✓ | ✓ |
| Temperatura do Solo 10 cm | ✓ | - | ✓ |
| Temperatura do Solo 20 cm | ✓ | - | ✓ |
| Temperatura do Solo 30 cm | ✓ | - | ✓ |
| Temperatura do Solo 40 cm | ✓ | - | ✓ |
| Temperatura do Solo 50 cm | ✓ | - | ✓ |
| Temperatura do Solo 60 cm | ✓ | - | ✓ |
| Temperatura Interna | ✓ | ✓ | ✓ |
| Tensão da bateria | ✓ | ✓ | ✓ |
| Umidade do Ar | ✓ | ✓ | ✓ |
| Umidade Interna | ✓ | ✓ | ✓ |
| Vento Direção 1 | ✓ | ✓ | ✓ |
| Vento Direção 1 Desvio Padrão | ✓ | ✓ | ✓ |
| Vento Direção 1 na máx | ✓ | ✓ | ✓ |
| Vento Direção 2 | ✓ | - | ✓ |
| Vento Direção 2 Desvio Padrão | ✓ | - | ✓ |

| Dado coletado | Agrometeorológica | Meteorológica | Meteorológica CSBS |
|------------------------|-------------------|---------------|--------------------|
| Vento Direção 2 na máx | ✓ | - | ✓ |
| Vento Velocidade 1 | ✓ | ✓ | ✓ |
| Vento Velocidade 1 Máx | ✓ | ✓ | ✓ |
| Vento Velocidade 2 | ✓ | - | ✓ |
| Vento Velocidade 2 Máx | ✓ | - | ✓ |

Fonte: Disponibilizado por AESA (2024).

Os principais dados utilizados como subsídio para o estudo hidrológico do PRH-RPB são aqueles que possibilitam a estimativa da evapotranspiração da bacia hidrográfica. Esses dados são coletados pelas estações do INMET e pelas PCDs da AESA-PB na Bacia do Rio Paraíba. Para a análise da densidade da rede de monitoramento, foram considerados os parâmetros associados ao monitoramento de evaporação da WMO (2020). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Análise da Densidade da Rede Meteorológica por sub-bacia

| Sub-bacia | Área (km ²) | Estações existentes | | Densidade das estações (km ² /estação) | | Avaliação da rede existente | | |
|----------------------|-------------------------|---------------------|----------|---------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|
| | | AESA-PB | INMET | AESA-PB | INMET | Nº mínimo de estações | Possui déficit? | Estações propostas |
| Alto Paraíba | 6.727,70 | 4 | 2 | 1.681,93 | 3.363,85 | 2 | - | - |
| Médio Paraíba | 3.797,58 | 7 | 2 | 542,51 | 1.898,79 | 1 | - | - |
| Baixo Paraíba | 3.950,52 | 14 | 2 | 282,18 | 1.975,26 | 1 | - | - |
| Taperoá | 5.668,24 | 8 | 1 | 708,53 | 5.668,24 | 2 | - | - |
| Total | 20.144,04 | 33 | 7 | 610,43 | 2.877,72 | 5 | - | - |

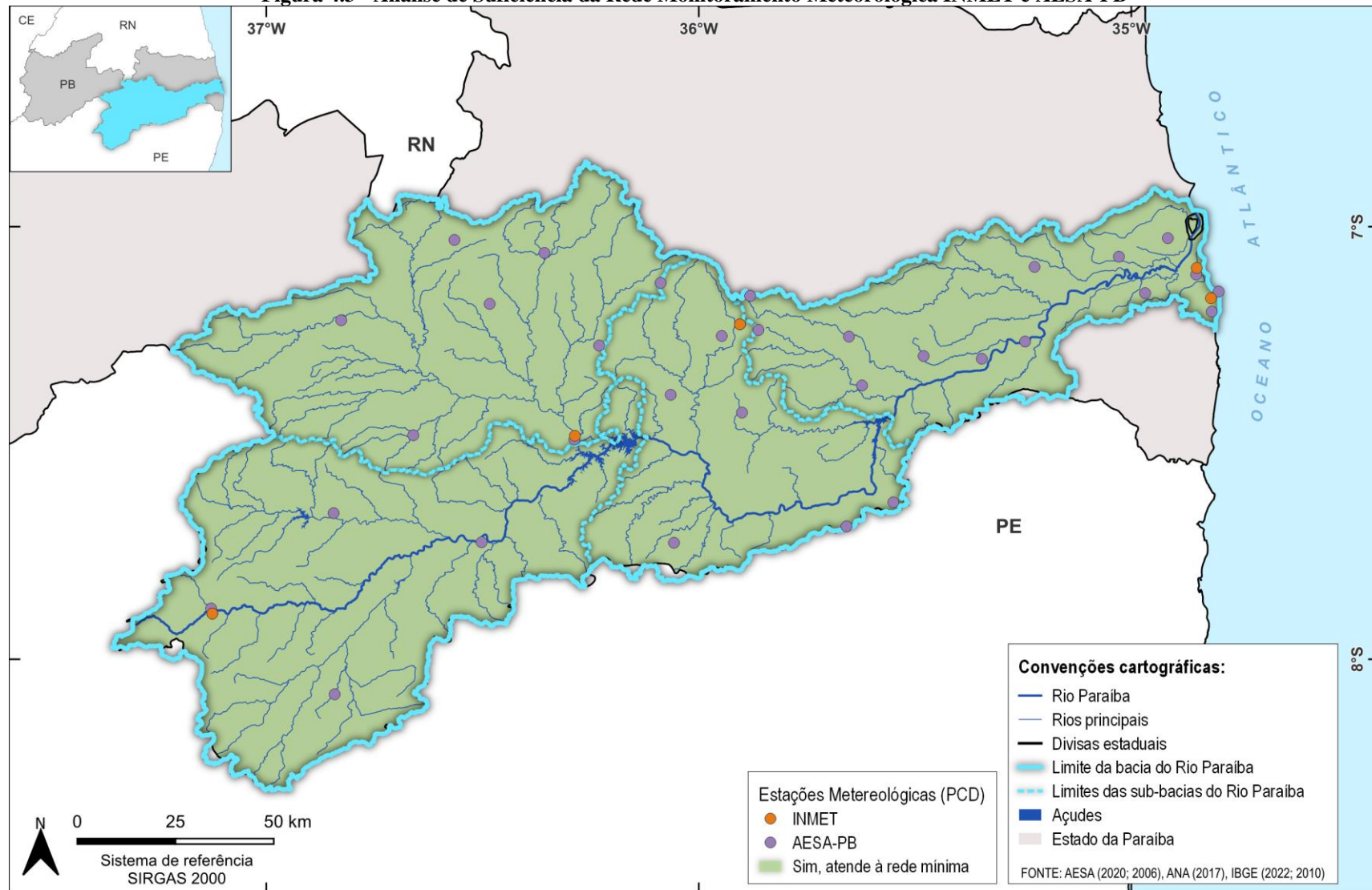
Fonte: Cobrape (2024), com informações de AESA (2024), ANA (2024) e WMO (2020).

A quantidade total de estações meteorológicas na bacia é de 40 estações (Tabela 4.6), portanto, atende ao critério estabelecido pela WMO (2020), que para a bacia do rio Paraíba sugere no mínimo 5 pontos de monitoramento. Quando a bacia é considerada como um todo, ainda que as estações sejam consideradas de forma independente por operador o critério é atendido, pois existem 7 estações do INMET e 33 da AESA-PB.

A análise por sub-bacia, aponta que a rede está numericamente bem distribuída e é suficiente em todas as quatro regiões quando analisada de forma conjunta. Considerando apenas a rede operada pelo INMET, haveria a necessidade da implantação de mais um ponto de monitoramento na sub-bacia do Taperoá. Entretanto, a cobertura de monitoramento da AESA-PB é a segunda maior nesta sub-bacia. A distribuição espacial da rede de monitoramento meteorológico para a região de interesse do PRH-RPB é apresentada na Figura 4.3.

Da Tabela 4.6 e da Figura 4.3 é possível observar que mesmo suficiente a rede de monitoramento meteorológico na sub-bacia do Alto Paraíba é menor em relação às demais sub-bacias, mesmo esta apresentando um comportamento climatológico semelhante a região da sub-bacia do Rio Taperoá. Por fim, embora as redes possam apresentar densidade suficiente conforme a classificação proposta pela WMO (2020), é necessário que também sejam avaliados os dados quanto ao período monitorado e quantidades de falhas desses dados, de modo a se obter um diagnóstico completo da rede de monitoramento hidrometeorológico da bacia e identificar possíveis lacunas e melhorias a serem implementadas.

Figura 4.3 - Análise de Suficiência da Rede Monitoramento Meteorológica INMET e AESA-PB

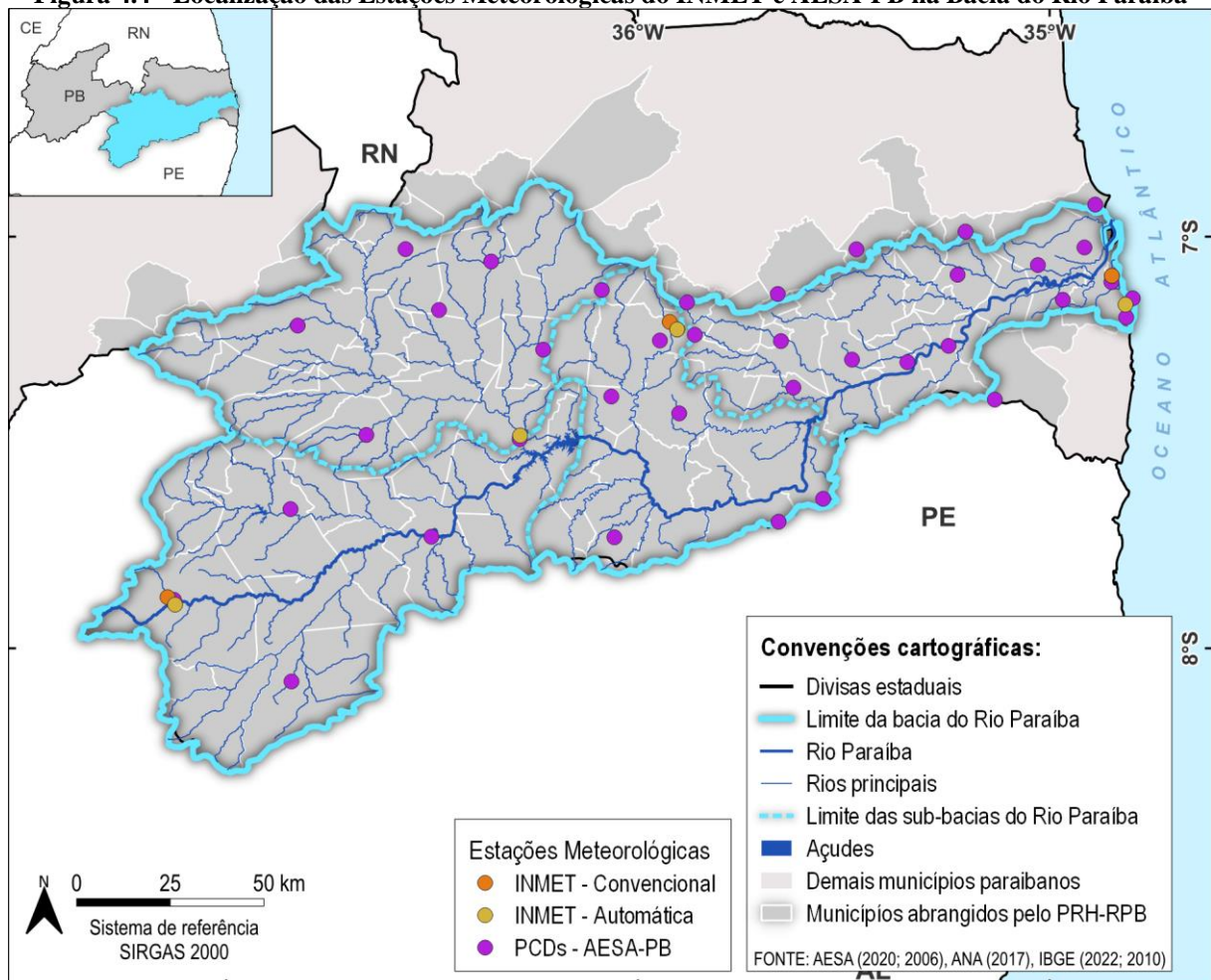


Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de AESA (2024), ANA (2024) e WMO (2020).

4.1.2 Dados meteorológicos

Na bacia hidrográfica do Rio Paraíba o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) mantém em operação sete estações meteorológicas e a AESA- PB mantém 33 PCDs (Figura 4.4). As Plataformas de Coleta de Dados da AESA-PB fornecem informações a cada 10 minutos e são um importante suporte ao monitoramento das variáveis climatológicas nessa escala de tempo. Entretanto, para a modelagem hidrológica o maior período de dados disponível deve ser analisado. Desta forma, as análises apresentadas tomam por base as séries do INMET, que de acordo com o PERH (2022) são compatíveis com os dados monitorados pela AESA-PB.

Figura 4.4 - Localização das Estações Meteorológicas do INMET e AESA-PB na Bacia do Rio Paraíba



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de INMET (2024).

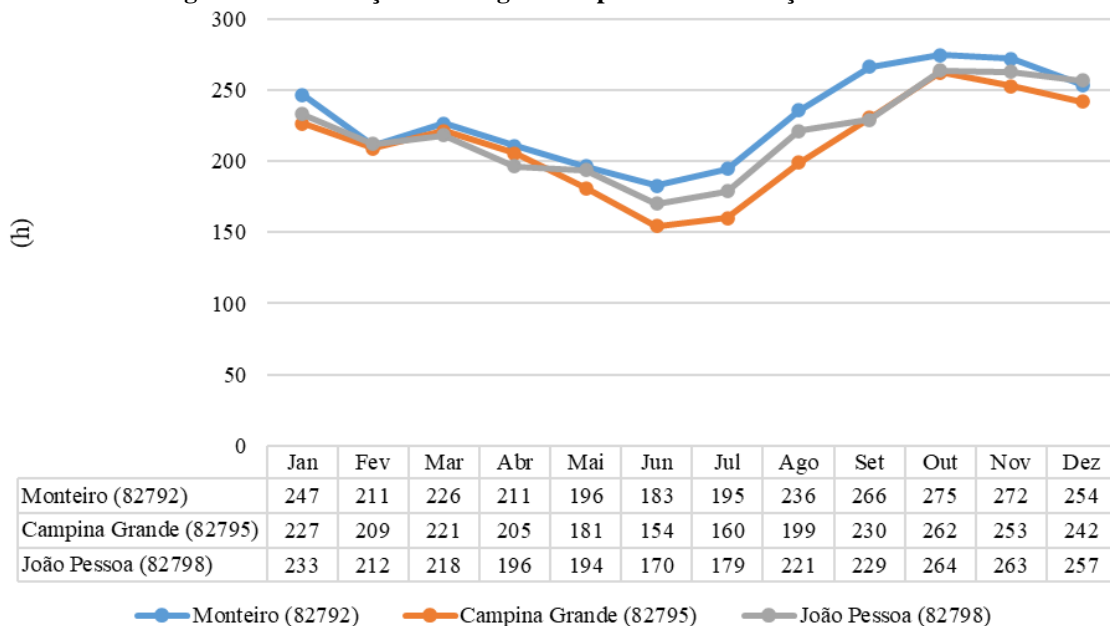
Dentre os dados meteorológicos observados nessas estações estão: insolação total, umidade relativa do ar, intensidade do vento, precipitação, temperatura e pressão atmosférica. O monitoramento destas variáveis é base para as estimativas da evapotranspiração, dado importante para análise hidrológica da região.

4.1.2.1 Insolação Total

Os dados sobre insolação total foram obtidos apenas nas estações convencionais. Os números referem-se à média de horas de exposição ao sol no mês. Os valores analisados estão entre o ano de 1980 e dezembro de 2023. Como pode ser observado pela Figura 4.5, é possível verificar

que no meio do ano o total de horas de insolação diminui, sendo a estação de Campina Grande a que recebe menor insolação, com o registro médio de 154 horas.

Figura 4.5 - Insolação total registrada por mês nas estações convencionais

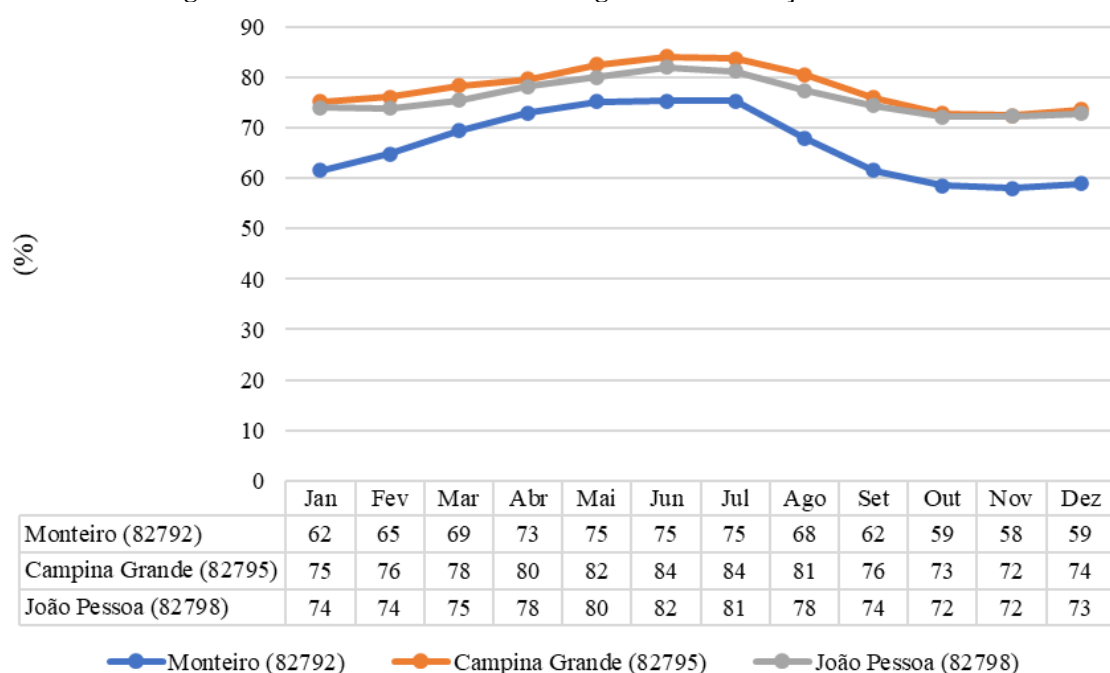


Fonte: Adaptado INMET (2024).

4.1.2.2 Umidade Relativa

A umidade relativa média do ar foi obtida apenas pelas estações convencionais, como apresenta a Figura 4.6. A estação Monteiro apresenta os menores valores. Observa-se também que a umidade relativa do ar aumenta no período de maio a julho.

Figura 4.6 - Umidade relativa do ar registrada nas estações convencionais

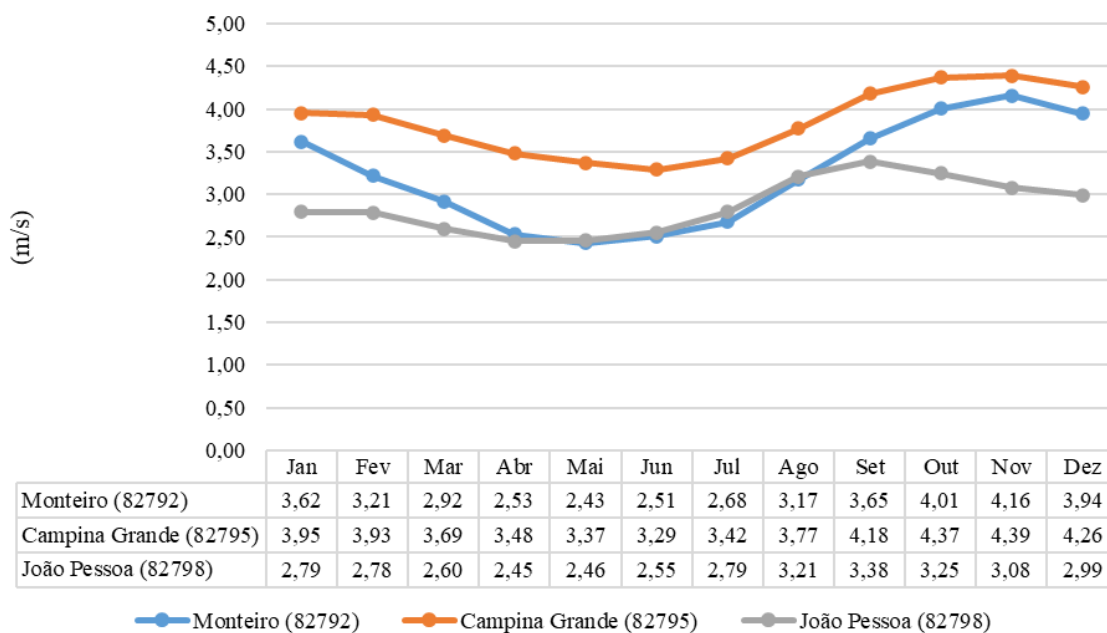


Fonte: Adaptado INMET (2024).

4.1.2.3 Velocidade do vento

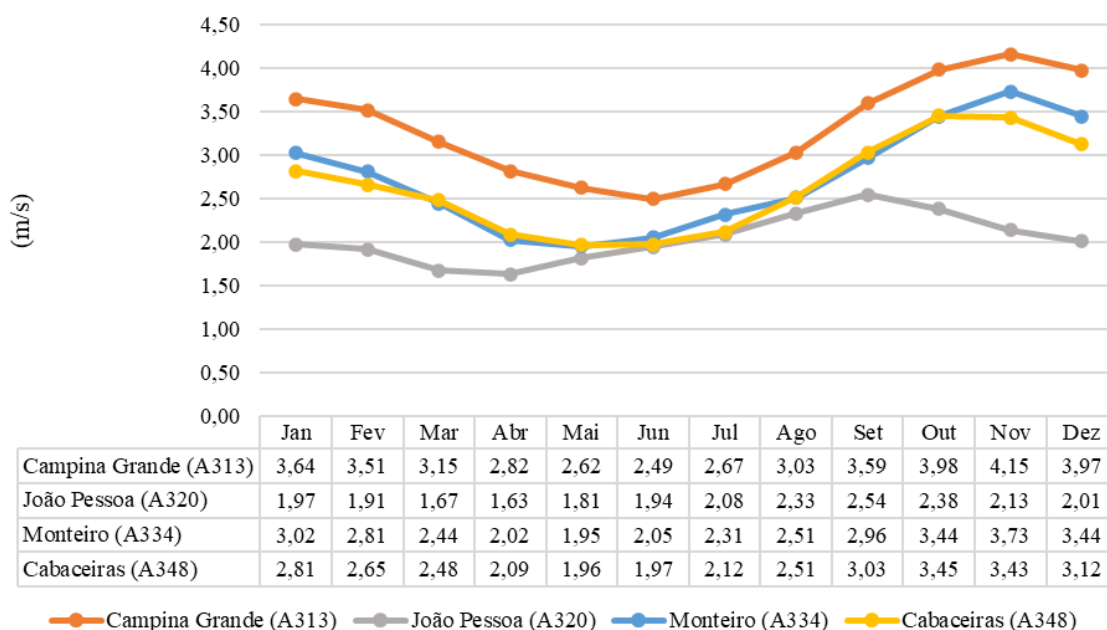
Os valores da intensidade do vento estão presentes tanto nas estações convencionais quanto nas automáticas. Nas estações convencionais, é possível verificar que os valores médios ficam entre 2 m/s e 4,5 m/s. As maiores velocidades do vento foram registradas na estação de Campina Grande. A velocidade diminui no período entre março e julho, como pode ser observado na Figura 4.7. Na Figura 4.8, pode-se observar os registros das velocidades médias dos ventos nas estações meteorológicas automáticas.

Figura 4.7 - Velocidade média do vento registrada nas estações convencionais



Fonte: Adaptado INMET (2024).

Figura 4.8 - Velocidade média do vento registrado nas estações automáticas



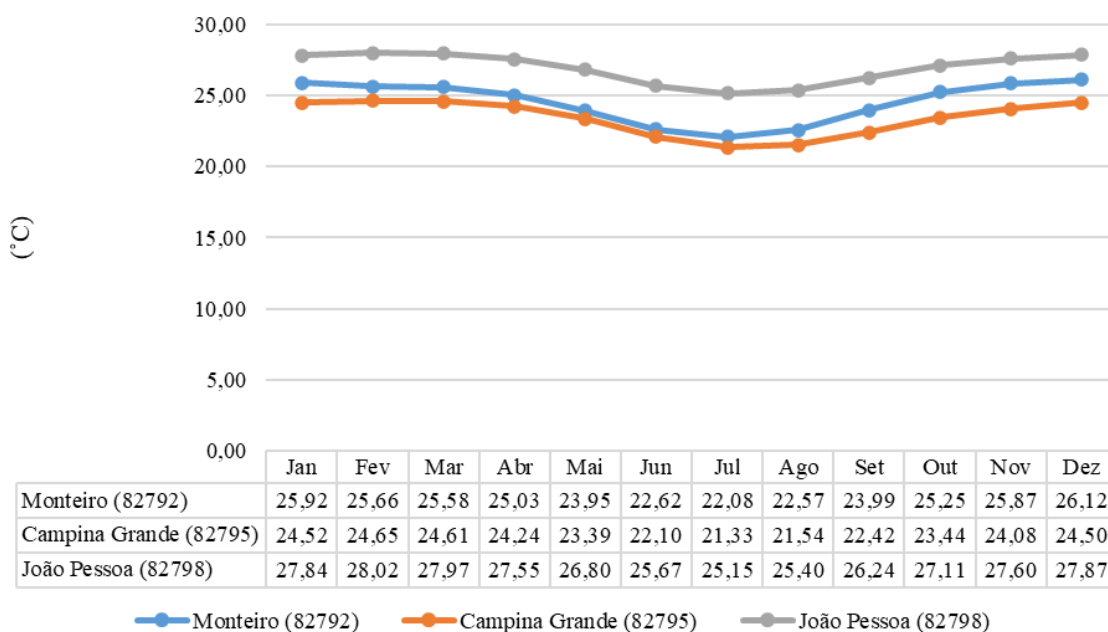
Fonte: Adaptado INMET (2024).

Os períodos dos dados são diferentes em comparação com as estações convencionais, sendo este de 2006 até o ano de 2023. Como pode ser observado pela comparação entre a Figura 4.7 e a Figura 4.8, que apresentam um comportamento semelhante. Entretanto, existe uma diferença entre os valores mínimos, sendo próximo de 2,5 m/s na estação convencional e próximo de 1,5 m/s na estação automática de João Pessoa. Isso ocorre com os valores registrados nas estações de Campina Grande e Monteiro.

4.1.2.4 Temperatura

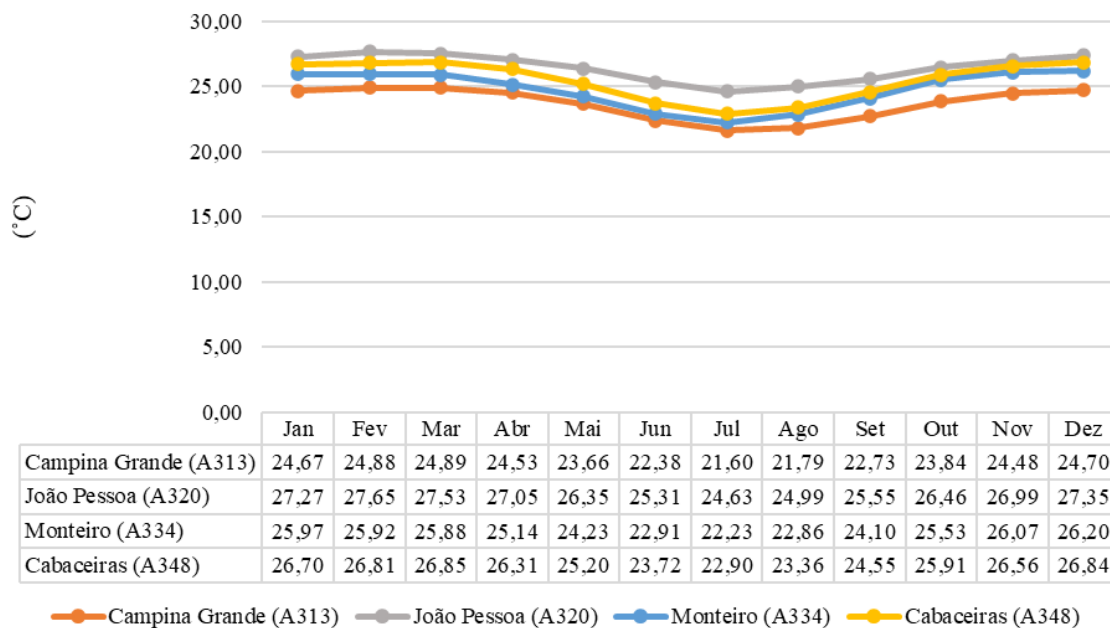
As estações convencionais e automáticas do INMET registram os dados de temperaturas médias mensais. Na Figura 4.9, é possível ver que a estação convencional de João Pessoa (82798) tem as temperaturas mais altas do que as outras duas estações convencionais. Os valores médios da temperatura ficam entre 20°C e 30°C, sendo que os valores próximos a 20 °C ocorrem no meio do ano, entre os meses de junho e agosto.

Figura 4.9 - Temperatura média mensal registrada nas estações convencionais



Fonte: Adaptado INMET (2024).

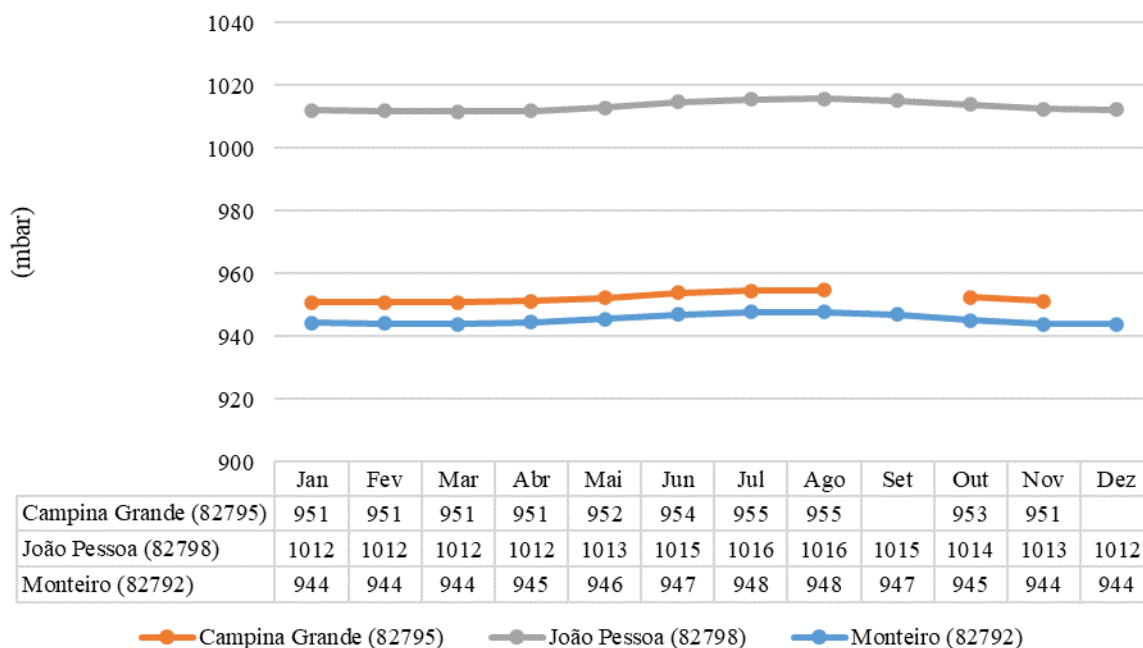
A Figura 4.10 apresenta os valores das temperaturas registrada pelas estações automáticas. O comportamento das temperaturas é semelhante ao que foram observados na Figura 4.9, estando entre o intervalo de 20°C e 30°C. É possível observar que João Pessoa (A320) continua apresentando as maiores temperaturas, seguida pela estação de Cabaceira (A348).

Figura 4.10 - Temperatura média mensal registrada nas estações automáticas

Fonte: Adaptado INMET (2024).

4.1.2.5 Pressão Atmosférica

Os dados das estações convencionais foram obtidos através das Normais Climatológicas do Brasil do INMET, no período de 1991 a 2020. A Figura 4.11 apresenta as pressões mínimas com os valores de 944 mbar e as máximas de 1016 mbar.

Figura 4.11 - Pressão atmosférica média mensal registrada nas estações convencionais

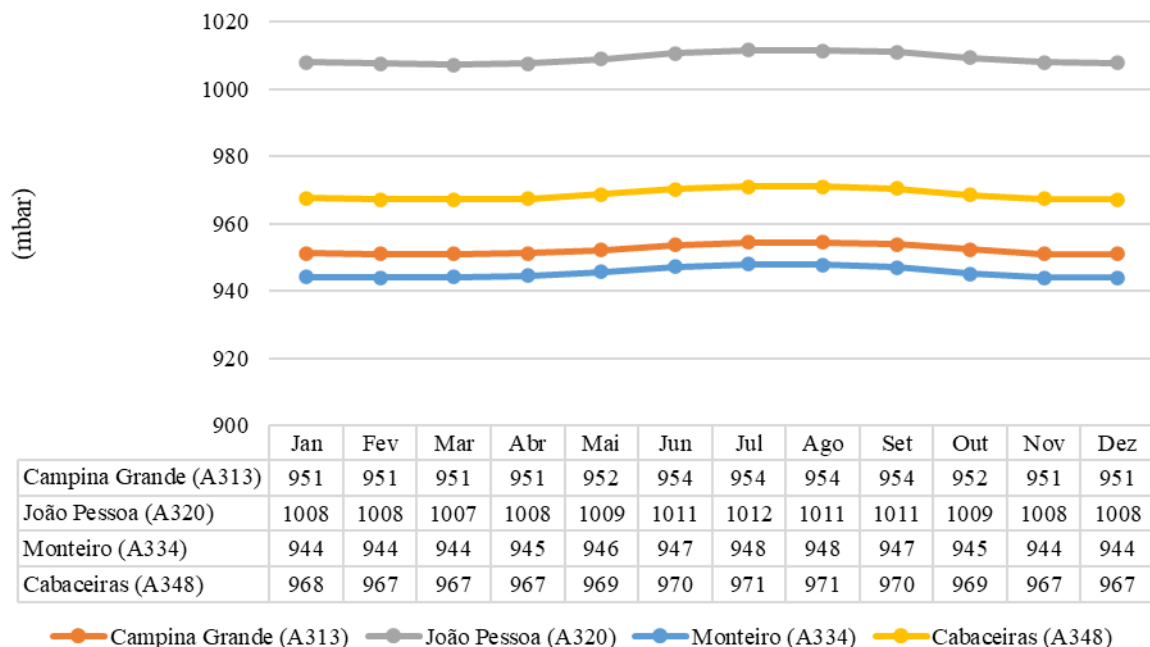
Fonte: INMET (2024).

A estação de João Pessoa (82798) é a que apresenta os maiores valores, sendo que esta estação se encontra próxima ao nível do mar com uma altitude de 9,67 m, enquanto a estação Monteiro

(82792) é a que apresenta os menores valores de pressão e a estação encontra-se em maiores altitudes em comparação com as outras estações (606,41 m). Nos meses de setembro e dezembro, a estação de Campina Grande (82795) não possui observações dos valores médios.

A Figura 4.12 mostra os dados obtidos nas estações automáticas. Como foi observado nas estações convencionais, a estação de João Pessoa também apresentou valores altos, sendo que as estações convencionais apresentaram valores médios mensais ligeiramente mais altos em comparação com as estações automáticas, sendo esta última localizada a uma altitude mais elevada do que a convencional (33,5 m). A estação Monteiro (A334), de forma semelhante às estações convencionais, também apresentou valores baixos em comparação com as outras estações e está localizada a uma altitude de 606,39 m, seguido pela estação Campina Grande (A313), com altitude de 546,17 m e Cabaceira (A348) com a altitude de 391,96 m.

Figura 4.12 - Pressão atmosférica média mensal registrada nas estações automáticas



Fonte: Adaptado INMET (2024).

4.1.3 Dados de Evapotranspiração

A evapotranspiração é o conjunto de dois processos naturais de retorno da água precipitada para a atmosfera: a evaporação e a transpiração. A transferência de água para o vapor do ar diretamente de superfícies líquidas, como reservatórios, lagos, açudes e rios, é o processo chamado de evaporação, enquanto a transpiração refere-se à absorção de água do solo por plantas, e eliminada para atmosfera em seus processos naturais. Portanto, pode-se entender a evapotranspiração como o processo oposto à precipitação: enquanto a primeira representa a perda de água, a segunda refere-se a recarga de água.

A evaporação é importante na engenharia devido as perdas de água que acontecem em reservatórios e canais, de modo que a evapotranspiração tem forte influência na quantidade de

água da chuva que é transformada em vazão em uma bacia hidrográfica (Collischonn e Dornelles, 2015).

Tais processos dependem de fatores atmosféricos e da disponibilidade de água. Dentre os fatores atmosféricos, pode-se destacar a radiação solar, a temperatura e umidade relativa do ar, e a velocidade do vento. De maneira geral, quanto maior a energia recebida pela superfície líquida ou quanto mais baixa a concentração de vapor no ar acima dessa superfície, maior é a taxa de evaporação. Além disso, outras variáveis, como o tipo de vegetação e o tipo de solo, interferem na transpiração.

Uma vez que é difícil estimar ou medir separadamente a evaporação e transpiração, os dois processos são comumente tratados como um único, o de evapotranspiração. Ademais, chama-se de evapotranspiração potencial (ETp) a taxa de evapotranspiração que ocorre quando a umidade do solo é suficiente para um determinado tipo de cobertura vegetal, ou seja, não há restrição hídrica para que aconteça o referido processo. Já a evapotranspiração real (ETr) corresponde a taxa que ocorre em condições reais de umidade do solo, em qualquer cobertura vegetal. Dessa forma, a evapotranspiração real é igual ou inferior à evapotranspiração potencial.

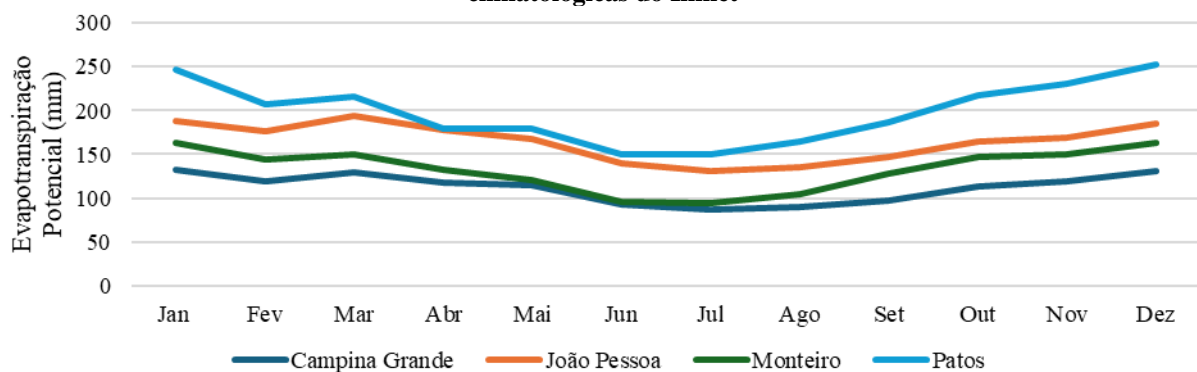
A diferenciação desses conceitos é importante para a utilização correta desses dados nas análises futuras do PRH-RPB. A seguir são apresentadas as informações de diferentes fontes, conforme os conceitos citados.

4.1.3.1 Evapotranspiração potencial

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza diversos dados meteorológicos, dentre eles a evapotranspiração potencial estimada no âmbito das normais climatológicas (Inmet, 2018).

A Figura 4.13 apresenta a evapotranspiração potencial mensal em quatro estações representativas das quatro sub-bacias analisadas no âmbito do PRH-RPB, sendo que as estações de Campina Grande, João Pessoa e Monteiro estão inseridas dentro da área de estudo, acrescida da estação de Patos, incluída para permitir uma melhor avaliação da sub-bacia do Rio Taperoá.

Figura 4.13 - Evapotranspiração potencial mensal na região do PRH-RPB segundo as normais climatológicas do Inmet

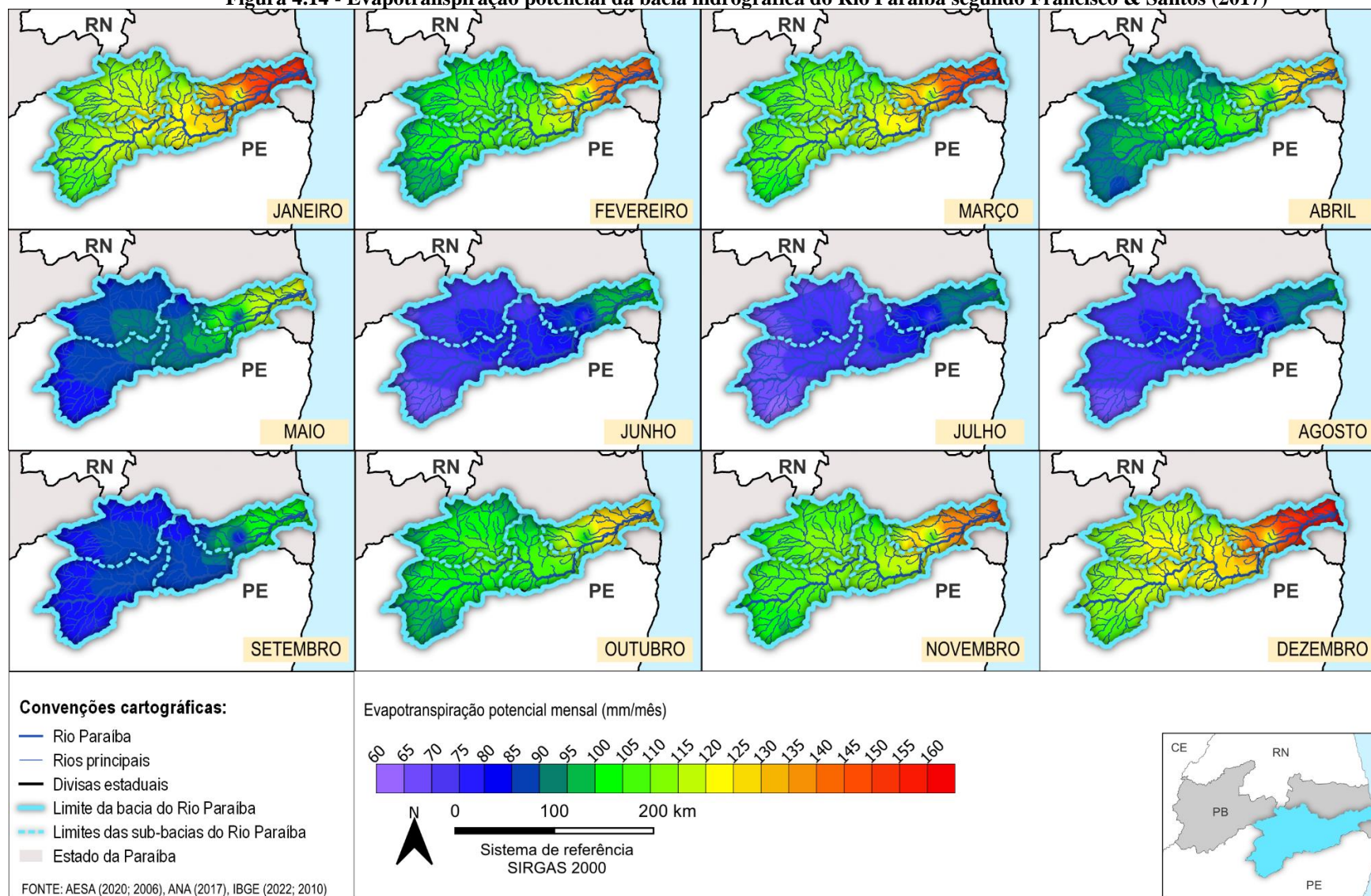


Fonte: INMET (2018).

De maneira geral, observa-se que os maiores valores de evapotranspiração potencial são observados nos meses mais secos, quando o fluxo de perda de água para a atmosfera é facilitado devido ao baixo grau de saturação de umidade do ar.

Francisco & Santos (2017) desenvolveram um atlas sobre a climatologia do estado da Paraíba. Dentre os resultados obtidos pelos autores, a evapotranspiração potencial mensal também foi estimada a partir do cálculo do balanço hídrico, a qual pode ser visualizada para a região do PRH-RPB na Figura 4.14, onde pode ser observado um padrão de comportamento muito semelhante às estações do Inmet (Figura 4.13).

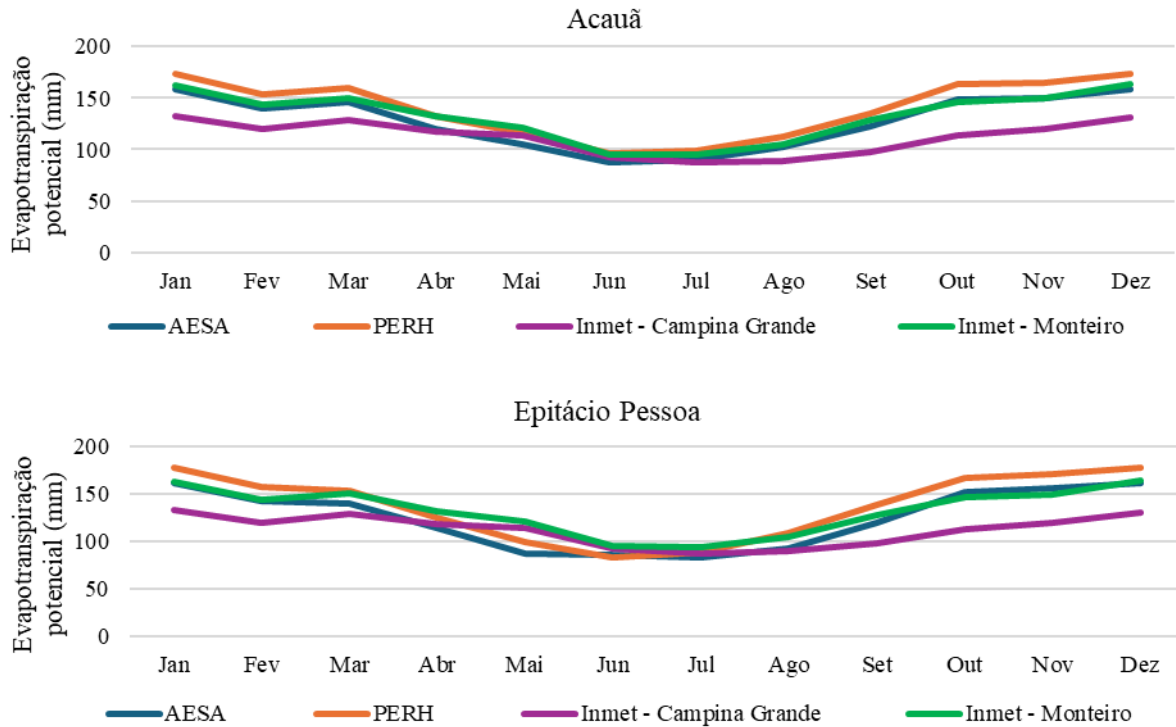
Figura 4.14 - Evapotranspiração potencial da bacia hidrográfica do Rio Paraíba segundo Francisco & Santos (2017)



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), adaptado de Francisco & Santos (2017).

Ademais, a AESA disponibilizou para a elaboração do PRH-RPB, valores de evapotranspiração para os açudes localizados na bacia de estudo, tanto em fichas dos açudes (AESA, 2024), como também os valores estimados pelo PERH-PB (AESA, 2018). Tais valores também foram compilados e comparados com as fontes já apresentadas, ao que se pode perceber que também se trata de valores de evapotranspiração potencial. A Figura 4.15 apresenta a comparação dos dados das diferentes fontes de informação para os dois maiores açudes do PRH-RBP.

Figura 4.15 - Evapotranspiração potencial estimada para os açudes de Acauã e Epitácio Pessoa



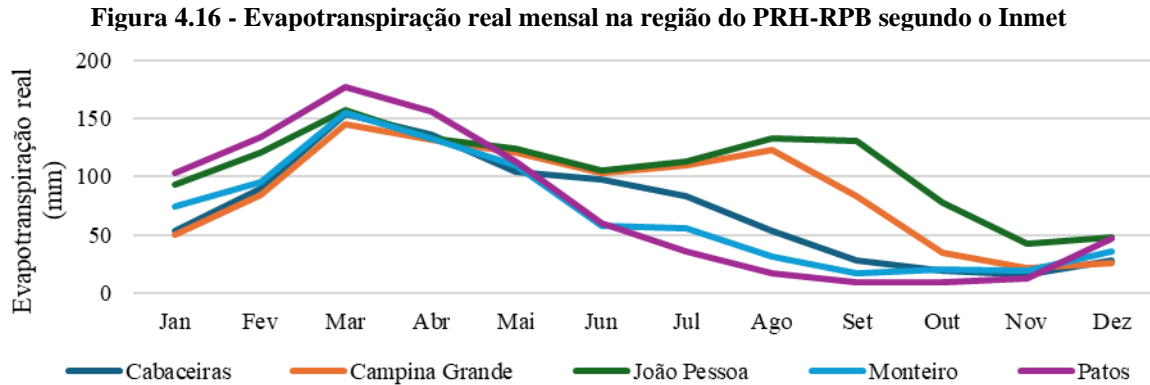
Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de AESA (2024; 2018), Inmet (2018).

A comparação permite perceber que todas as fontes de informações avaliadas seguem o mesmo padrão, com pequenas variações decorrentes do período de dados utilizado e a base metodológica empregue para as estimativas. Este comportamento corrobora os estudos avaliados.

4.1.3.2 Evapotranspiração real

Uma vez que, por definição, a evapotranspiração potencial corresponde a um valor estimado em uma condição ideal, ou seja, sem déficit hídrico, a evapotranspiração real é conceito em que as taxas de evaporação e a transpiração são estimadas para as condições reais de umidade e de cobertura vegetal.

Para tal caracterização, também foram levantadas informações de diversas fontes consolidadas. A primeira consiste no Inmet (2024), que também disponibiliza valores de evapotranspiração real por meio da ferramenta de Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária (Sisdagro), que calcula Balanço Hídrico Climatológico Normal. A Figura 4.16 apresenta tais dados para cinco estações, estando apenas a de Patos fora da bacia do Rio Paraíba, porém necessária para uma melhor avaliação da sub-bacia do Rio Taperoá.



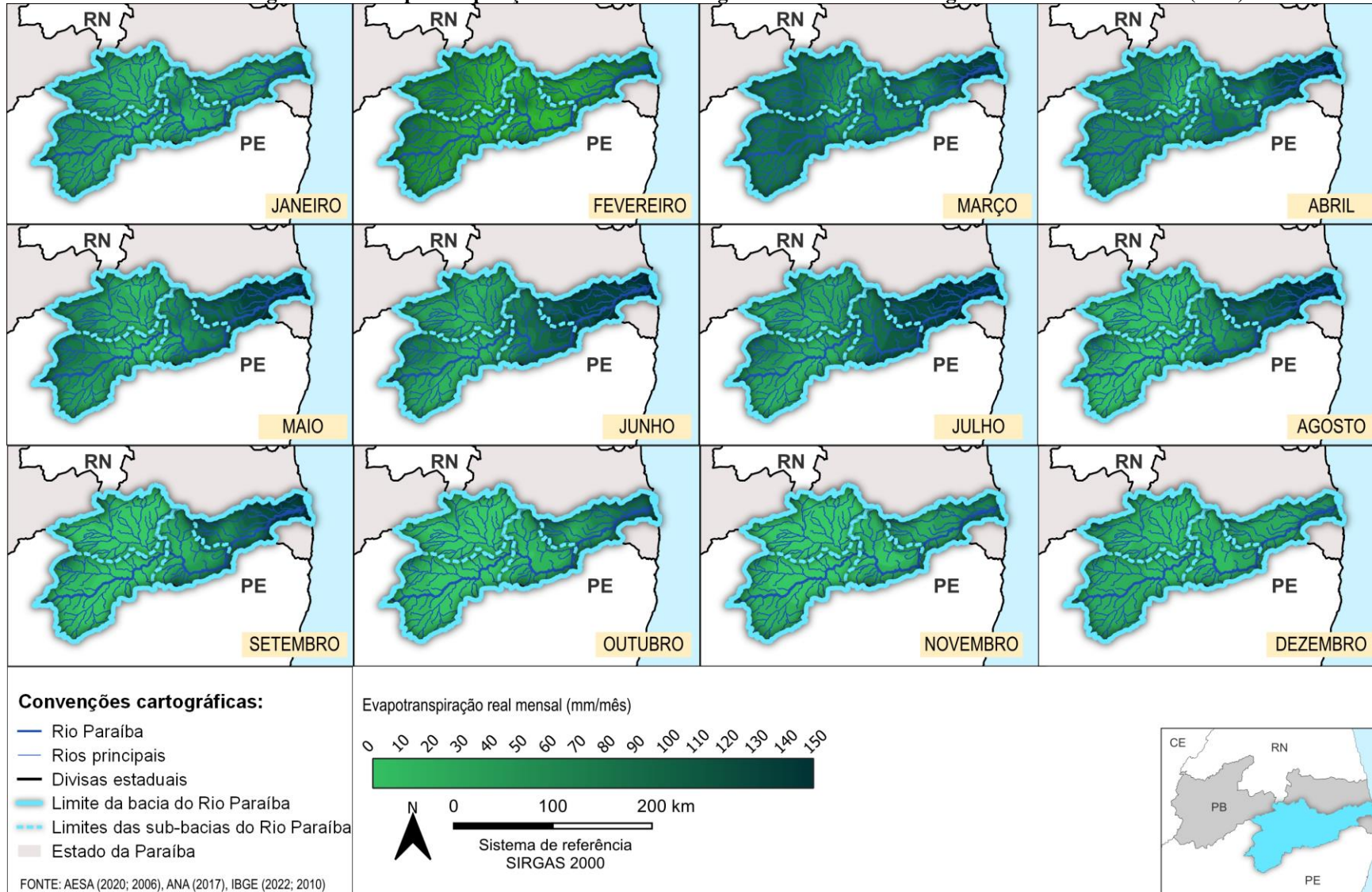
Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de INMET (2024).

É perceptível uma mudança no comportamento das curvas das estações em relação a evapotranspiração potencial, com maiores taxas de evapotranspiração real no primeiro semestre, enquanto na segunda metade do ano é evidente a influência do regime de precipitação deficitário na região. As exceções são as estações de João Pessoa e Campina Grande, onde há registro de precipitações mais significativas também no segundo semestre.

Francisco & Santos (2017) também estimaram a evapotranspiração real para o estado da Paraíba por meio do cálculo do balanço hídrico climatológico. Os resultados mensais obtidos para a área de estudo do PRH-RPB podem ser observados na Figura 4.17, na qual verifica-se o padrão similar ao observado nas estações do Inmet (Figura 4.16).

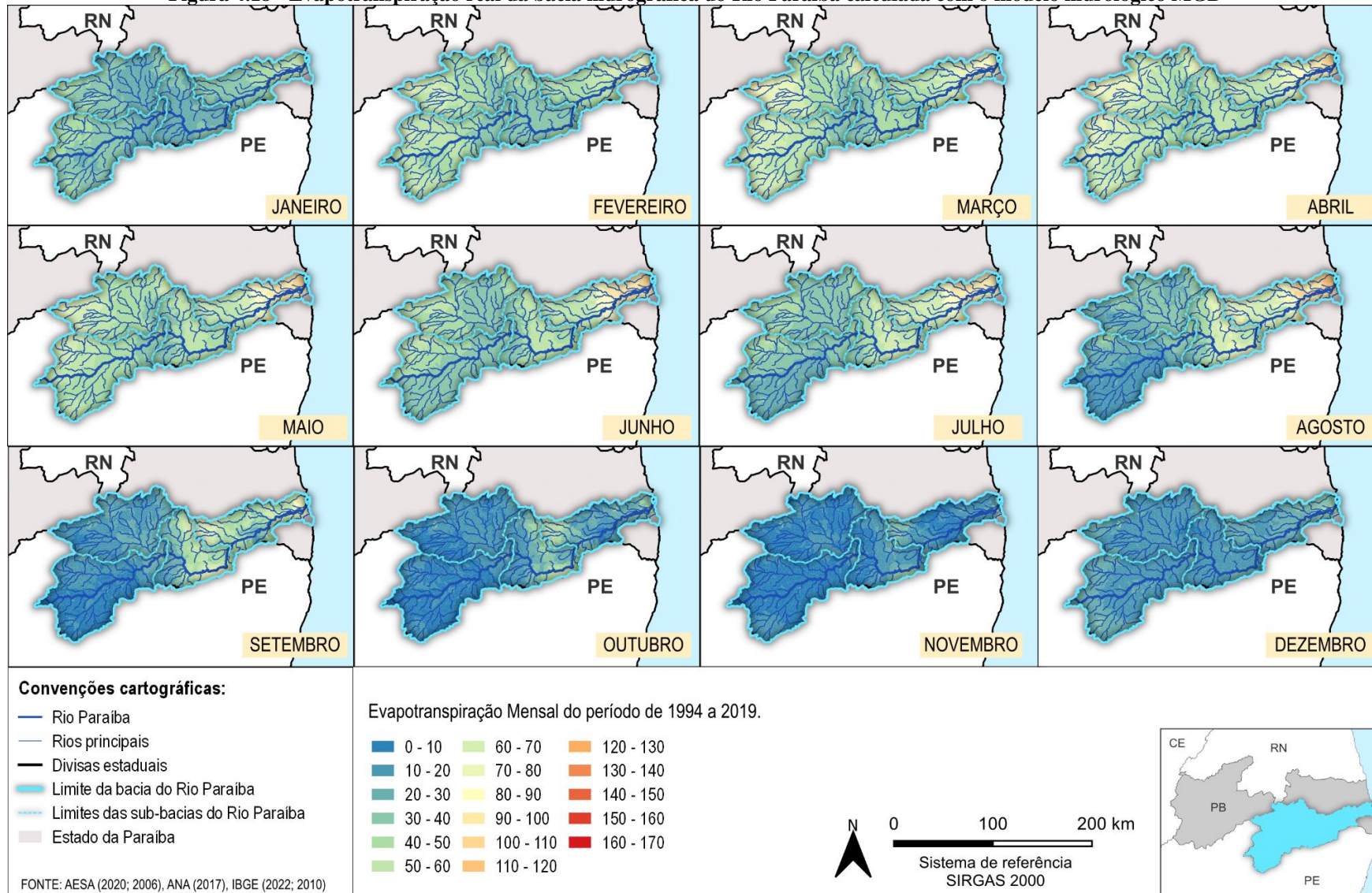
Por fim, o modelo hidrológico utilizado no âmbito do estudo também faz a estimativa da evapotranspiração real para a bacia hidrográfica, apresentado na Figura 4.18, onde pode-se também identificar o mesmo comportamento dos demais dados avaliados, validando as informações utilizadas.

Figura 4.17 - Evapotranspiração real da bacia hidrográfica do Rio Paraíba segundo Francisco & Santos (2017)



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), adaptado de Francisco & Santos (2017).

Figura 4.18 - Evapotranspiração real da bacia hidrográfica do Rio Paraíba calculada com o modelo hidrológico MGB



Fonte: Cobrape (2024).

4.1.3.3 *Evaporação líquida*

Reservatórios artificiais, como os açudes e barragens, são intervenções antrópicas em paisagens naturais com o objetivo de acumulação de água para atenderem os mais diversos usos, sejam esses consuntivos, como o abastecimento público, a dessedentação animal e a irrigação; bem como os não consuntivos, como o turismo e a pesca.

Dessa forma, a construção dessas infraestruturas hídricas busca a melhoria da oferta hídrica. Contudo, em seu planejamento, deve ser considerada a parcela de água perdida para o ambiente por meio da evaporação dos espelhos d'água desses reservatórios, para que não seja prejudicada a segurança hídrica dos locais e usos a que tais reservatórios atendem. Nesse contexto, a ANA, em 2021, publicou um estudo que trata da estimativa da evaporação líquida de massas de água artificiais.

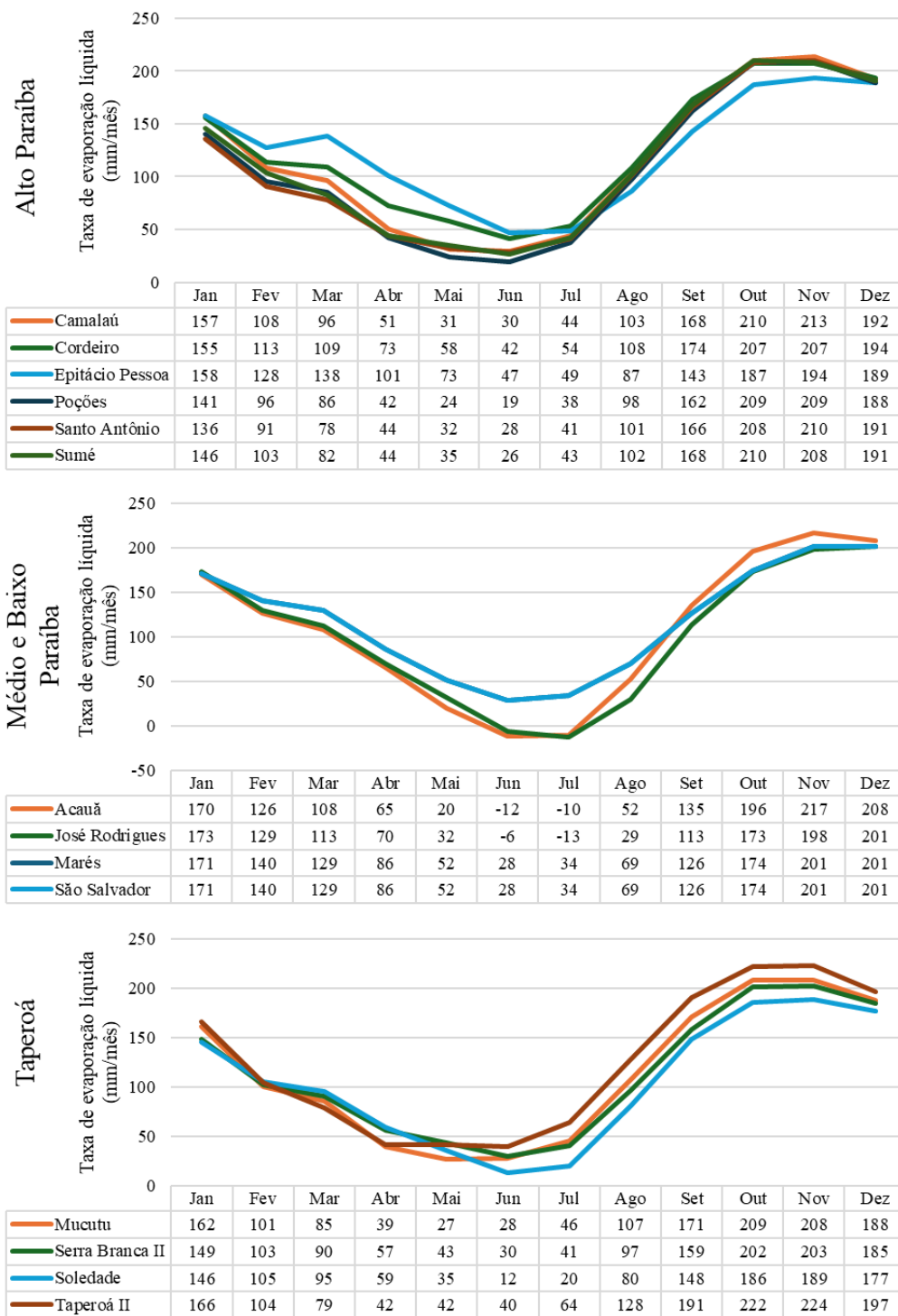
A evaporação líquida consiste na diferença entre a evaporação de água de um reservatório artificial e a evapotranspiração real na área do espelho d'água sem a implantação do reservatório. Esse conceito é importante, uma vez que essa evapotranspiração real sem o reservatório tem a tendência de ser inferior à evaporação de uma superfície líquida. Portanto, a evaporação líquida não se aplica a massas d'água naturais, uma vez que as condições de evapotranspiração nesses locais não se alteram devido a este tipo de intervenção hidráulica (ANA, 2021).

A Figura 4.19 apresenta a taxa de evaporação líquida calculada pelo referido estudo para os açudes estratégicos do PRH-RPB, com exceção do açude de Marés, que possui um espelho d'água maior que 1 km² em sua capacidade máxima e por esse motivo não foi considerado no estudo. Portanto, para a taxa de evaporação líquida do açude de Marés foi adotada a mesma taxa do açude de São Salvador, uma vez que estes açudes estão localizados próximos, em região com características meteorológicas e físicas semelhantes.

Como pode-se observar, há alguns valores negativos nos meses de junho e julho, o que significa que a evaporação desses açudes é menor que a evapotranspiração real esperada para caso eles não houvessem sido construídos. Nos demais, o resultado positivo evidencia que há um consumo de água por evaporação em decorrência da existência da superfície líquida.

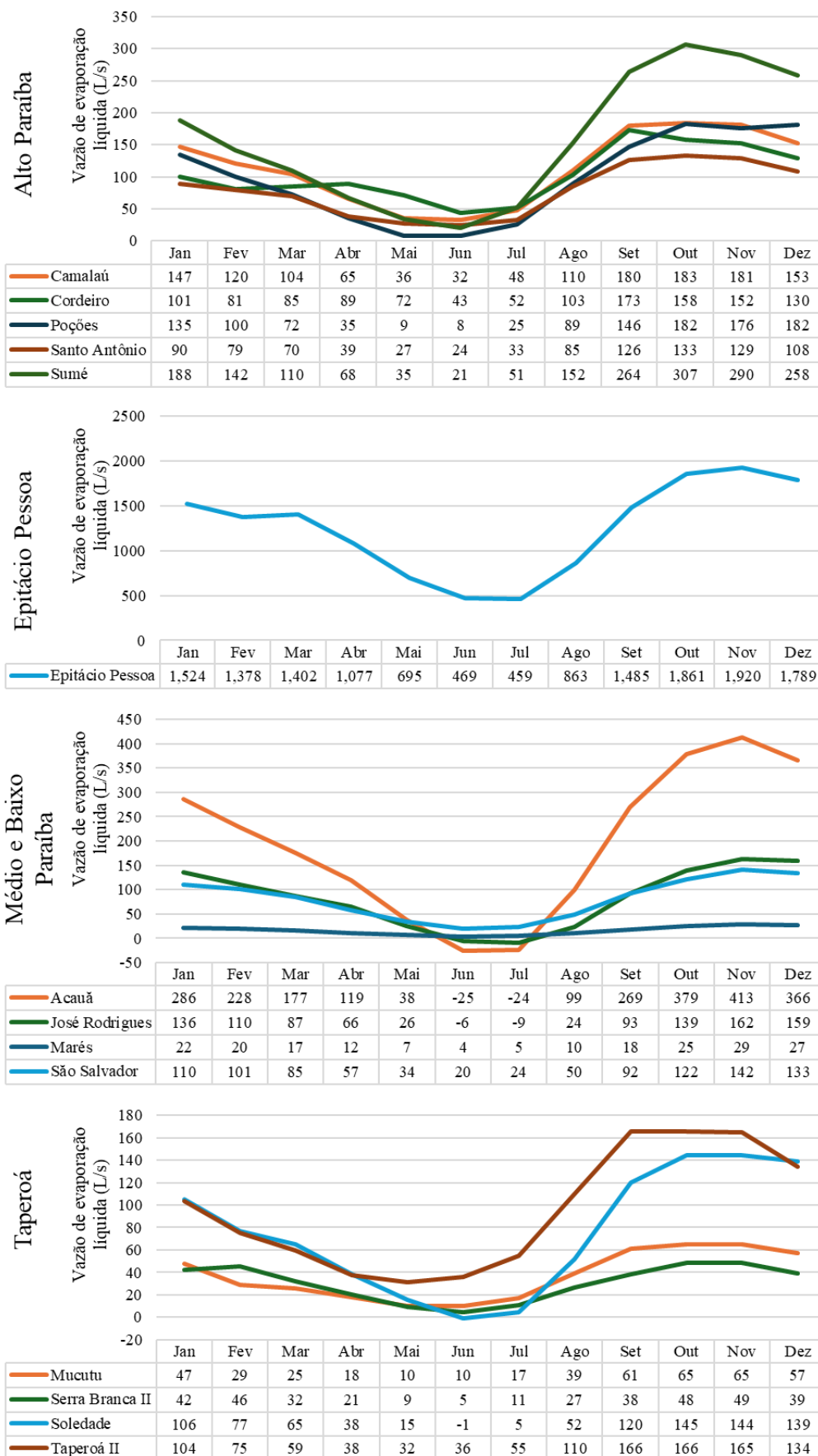
Além das taxas, o estudo também acompanhou e avaliou as variações das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios estudados, o que permitiu que fossem estimadas as vazões de evaporação líquida média mensal de cada um dos reservatórios, ou seja, a vazão de água que estes efetivamente perdem para o ambiente. Esses valores de vazão para os reservatórios estratégicos do PRH-RPB podem ser conferidos na Figura 4.20, ressaltando que para o açude de Marés, uma vez que este possui espelho menor que 1 km² e não foi contemplado no estudo, o cálculo de sua vazão apresentada foi realizada com base nas informações do açude de São Salvador.

Figura 4.19 - Taxa de evaporação líquida dos açudes estratégicos do PRH-RPB segundo ANA



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de ANA (2021).

Figura 4.20 - Vazão de evaporação líquida mensal dos açudes estratégicos do PRH-RPB segundo ANA



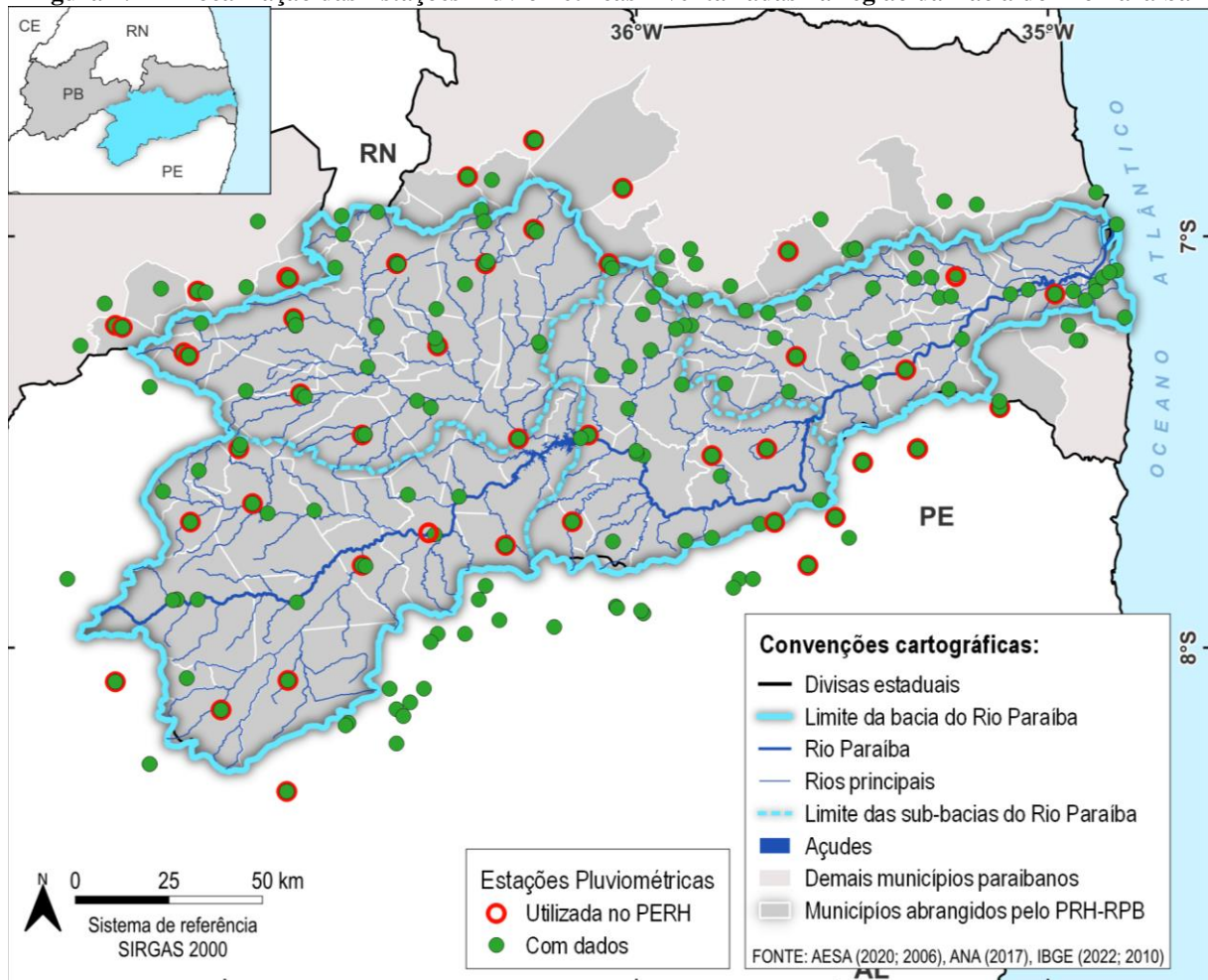
Fonte: ANA (2021).

Esses dados são de suma importância para a estimativa da disponibilidade hídrica com vistas a gestão de recursos hídricos, uma vez que essas vazões não estão disponíveis para o consumo pelos múltiplos usuários das águas desses reservatórios, podendo ser, inclusive, considerado como uso consuntivo bastante significativo (ANA, 2021), principalmente em áreas em que o recurso hídrico é escasso, como no caso da região do PRH-RPB.

4.1.4 Dados Pluviométricos

Com base no inventário das estações pluviométricas disponível no portal *Hidroweb* (SNIRH, 2024), foram identificadas 190 estações pluviométricas cadastradas e com algum dado observado na região da Bacia do Rio Paraíba, conforme apresentado pela Figura 4.21.

Figura 4.21 - Localização das Estações Pluviométricas inventariadas na região da Bacia do Rio Paraíba



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de SNIRH (2024) e AESA (2024).

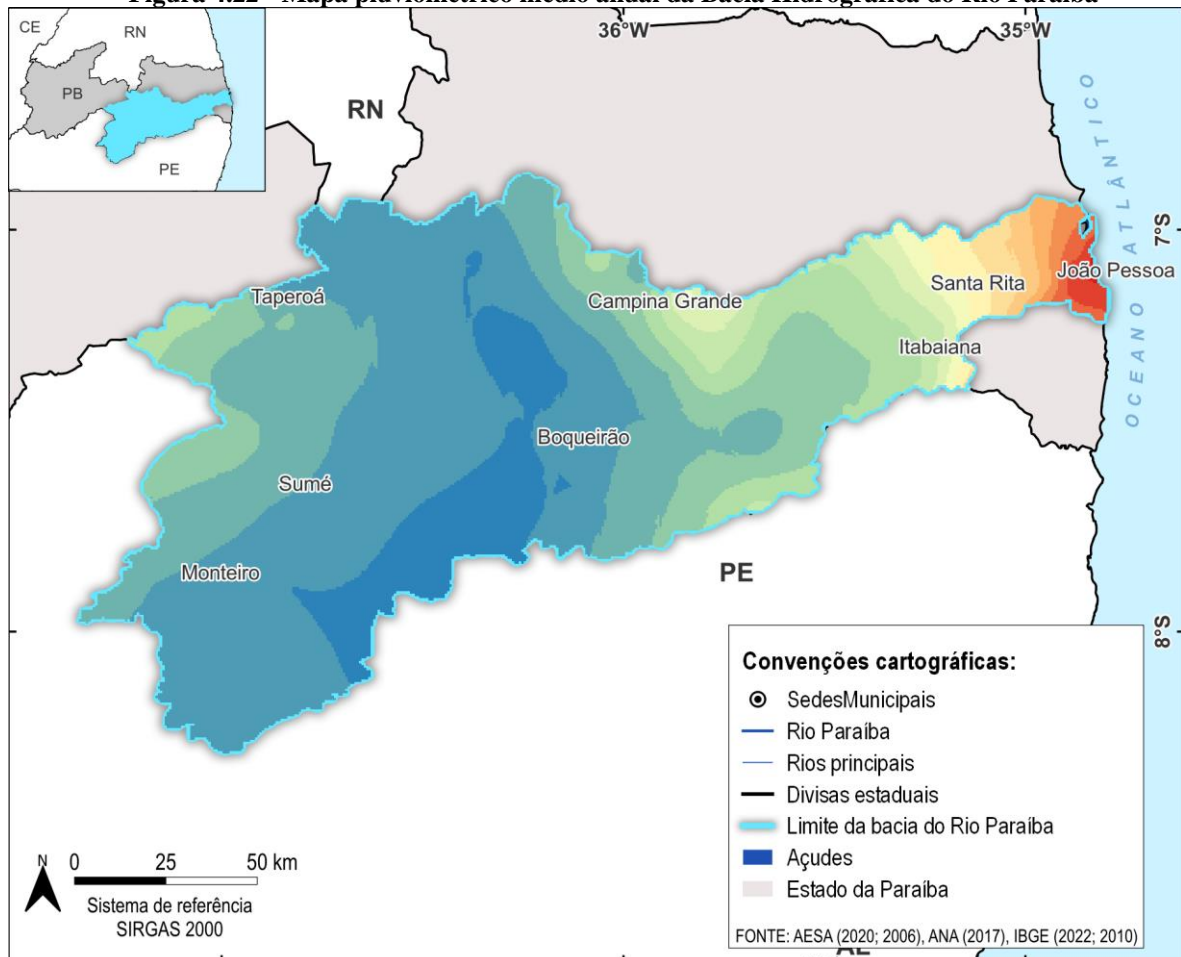
4.1.4.1 Pré-seleção das estações pluviométricas

A seleção das estações a serem utilizadas no estudo e o período de dados foram realizados por meio da análise da porcentagem de falhas nas séries históricas e com o critério de reunir o maior número de estações com períodos de dados coincidentes. A partir das séries de precipitação média diária das 190 estações que apresentam algum registro de dados, obteve-se o diagrama de disponibilidade de dados, apresentados no Anexo B do RP-03.

Pelo diagrama é possível observar uma interrupção na operação de diversas estações da área em estudo no ano de 1993. Ao realizar a comparação do número de estações operando antes e após esta data, conclui-se que a escolha indica o período mais recente de 1994 a 2019. Além deste critério, pesa na escolha a utilização de um período mais recente e com menor porcentagem de falhas, por representar de forma mais adequada o comportamento estatístico da precipitação na região, a qual também pode estar sendo influenciada por eventos de mudanças climáticas.

O período de dados é de pouco menos do que 30 anos, que é a extensão adotada para as normais climatológicas. Portanto, foram pré-selecionadas 77 estações para o estudo, cujos dados cadastrais principais constam no Anexo A do RP-03, e sua localização bem como a superfície de precipitação gerada com esses dados, são apresentadas na Figura 4.22.

Figura 4.22 - Mapa pluviométrico médio anual da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba



Precipitação Total Média Anual (mm)

| | | | | |
|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 346 - 400 | 700 - 800 | 1000 - 1100 | 1300 - 1400 | 1600 - 1700 |
| 400 - 500 | 800 - 900 | 1100 - 1200 | 1400 - 1500 | 1700 - 1800 |
| 500 - 600 | 900 - 1000 | 1200 - 1300 | 1500 - 1600 | > 1800 |
| 600 - 700 | | | | |

Fonte: Cobrape (2024).

Estas estações foram submetidas a análises de consistência por meio de curvas duplo-acumulativas, com a finalidade de detectar alterações sistemáticas no comportamento da série

histórica de um dado posto pluviométrico, quando comparado ao padrão observado na mesma região. Essa análise está apresentada a seguir.

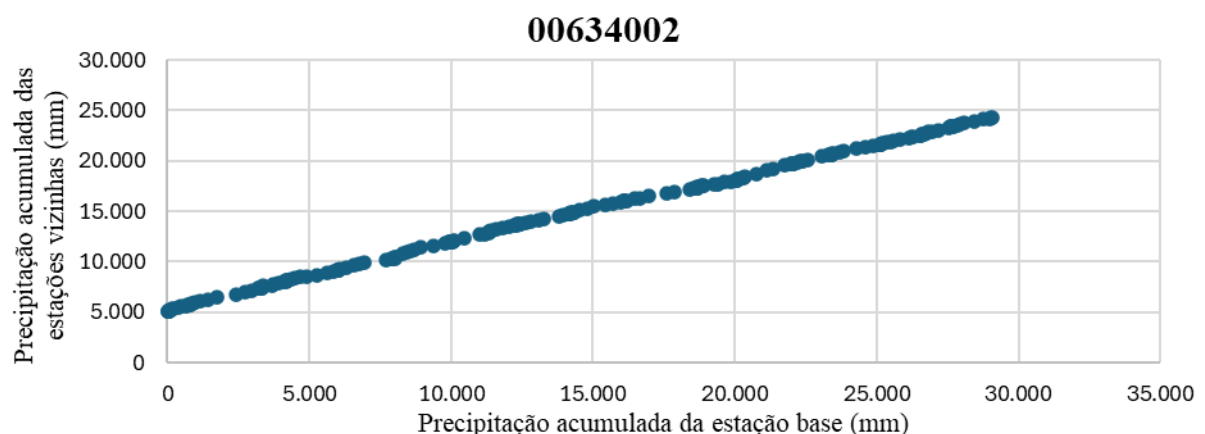
4.1.4.2 Curvas Duplo-Acumulativas

A curva duplo-acumulativa é um método frequentemente utilizado na análise de consistência de dados pluviométricos. O método consiste na comparação entre os valores acumulados de duas séries temporais. Para duas séries cronológicas $X(t)$ e $Y(t)$, os valores acumulados de Y são plotados contra os valores acumulados de X . Se X e Y são correlacionados linearmente, qualquer alteração sistemática em uma das duas séries será detectada através da mudança na declividade da linha de regressão.

No que se refere à análise de consistência de dados de precipitação, esta técnica é utilizada comumente para testar dados de totais de precipitação média mensais ou anuais observados em diversas estações pluviométricas na mesma área climática. Desta forma, a série da estação (X), a ser analisada, é utilizada como referência e a outra série (Y) pode ser a média ou a soma dos totais precipitados de todo o grupo de estações da mesma área climática.

O critério utilizado para definir tais áreas na Bacia do Rio Paraíba, foi por sub-bacias (Taperoá, Alto, Médio e Baixo Paraíba). As curvas duplo-acumulativas foram geradas para as 77 estações pluviométricas apresentadas no Anexo A do RP-03, considerando o período comum de dados entre 1994 e 2019, como apresentado no item referente à pré-seleção das estações pluviométricas. A Figura 4.23 exemplifica, para a estação 00634002, as curvas duplo-acumulativas traçadas para cada uma das estações e que estão apresentadas no Anexo A do RP-03.

Figura 4.23 - Curva duplo-acumulativa para a estação 00634002 (Baixo Curso do Rio Paraíba)



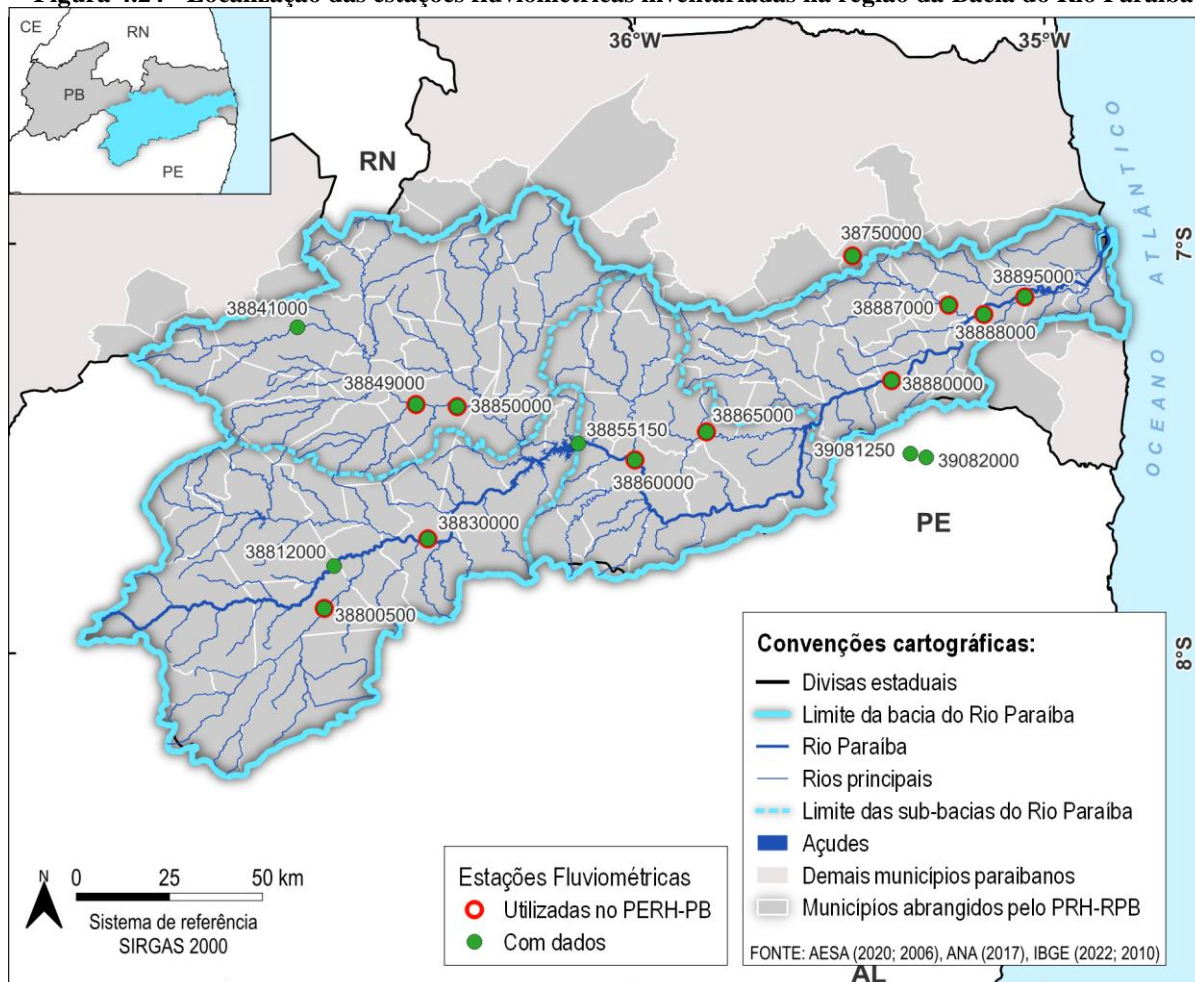
Fonte: Cobrape (2024).

Nota-se que, em geral, as curvas (Anexo A do RP-03) apresentam poucos desvios ao longo do período histórico, com exceção de sete estações, também apresentadas no Anexo A do RP-03. A correção das curvas e dos dados históricos requer uma análise local mais detalhada, pois é necessário identificar qual seria o período a ser corrigido, se antes ou após a mudança de declividade na reta de regressão. Por esta razão e dado o número representativo de estações pluviométricas existente, sete estações foram excluídas das análises posteriores.

4.1.5 Dados Fluviométricos

Com base no inventário das estações fluviométricas disponível no portal *Hidroweb* (SNIRH, 2024), na Bacia do Rio Paraíba e proximidade, são 17 as estações fluviométricas que apresentam séries de dados disponíveis, como apresenta a Figura 4.24.

Figura 4.24 - Localização das estações fluviométricas inventariadas na região da Bacia do Rio Paraíba



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de ANA (2024) e AESA (2024).

4.1.5.1 Pré-seleção das estações fluviométricas

Nota-se da Figura 4.24, que os 13 postos fluviométricos, dentro da bacia do rio Paraíba, que apresentam algum dado estão bem distribuídos ao longo da bacia hidrográfica, no curso principal do Rio Paraíba (6 estações) e nos seus principais afluentes, Rio Taperoá e Paraibinha.

Um fator importante para além da existência de registros de vazão observada é o período de observação disponível para cada uma dessas estações fluviométricas. O período de dados observados para cada uma das estações destacadas na Figura 4.24 está no diagrama de disponibilidade de dados, apresentado Anexo B do RP-03.

As primeiras estações fluviométricas que entraram em operação na bacia hidrográfica são do final da década de 1960. Na primeira metade dos anos 2000 outras estações foram instaladas, mas é apenas de 2015 a 2022 que identificamos o maior período comum de dados disponíveis. Usualmente, os estudos hidrológicos dão preferência para séries de dados de ao menos 30 anos,

quando disponível. A partir do apresentado, e considerando a existência de postos fluviométricos com séries de mais de 30 anos ao longo do curso principal da área de estudo, a Tabela 4.7 traz as informações básicas das estações com esta disponibilidade de dados.

Tabela 4.7 - Estações Fluviométricas com dados disponíveis no Hidroweb

| Código | Nome | Latitude | Longitude | Rio | Area de Drenagem (km ²) | Período de dados | Falhas (%) |
|----------|------------------|----------|-----------|-------------|-------------------------------------|------------------|------------|
| 38830000 | Caraúbas | -7,7211 | -36,5053 | Rio Paraíba | 5.030 | 03/70 07/22 | 6,9% |
| 38850000 | Poço de Pedras | -7,3981 | -36,4336 | Rio Taperoá | 3.180 | 01/70 07/23 | 6,9% |
| 38860000 | Bodocongo | -7,5283 | -35,9997 | Rio Paraíba | 13.700 | 12/69 11/22 | 1,7% |
| 38880000 | Guarita | -7,3344 | -35,3728 | Rio Paraíba | 17.400 | 01/70 09/23 | 1,1% |
| 38895000 | Ponte da Batalha | -7,1300 | -35,0475 | Rio Paraíba | 19.000 | 12/69 09/23 | 2,5% |

Fonte: SNIRH (2024).

Cabe destacar as estações fluviométricas apresentadas na Tabela 4.7 são todas operadas pela CPRM e serão utilizadas para as análises hidrológicas neste estudo.

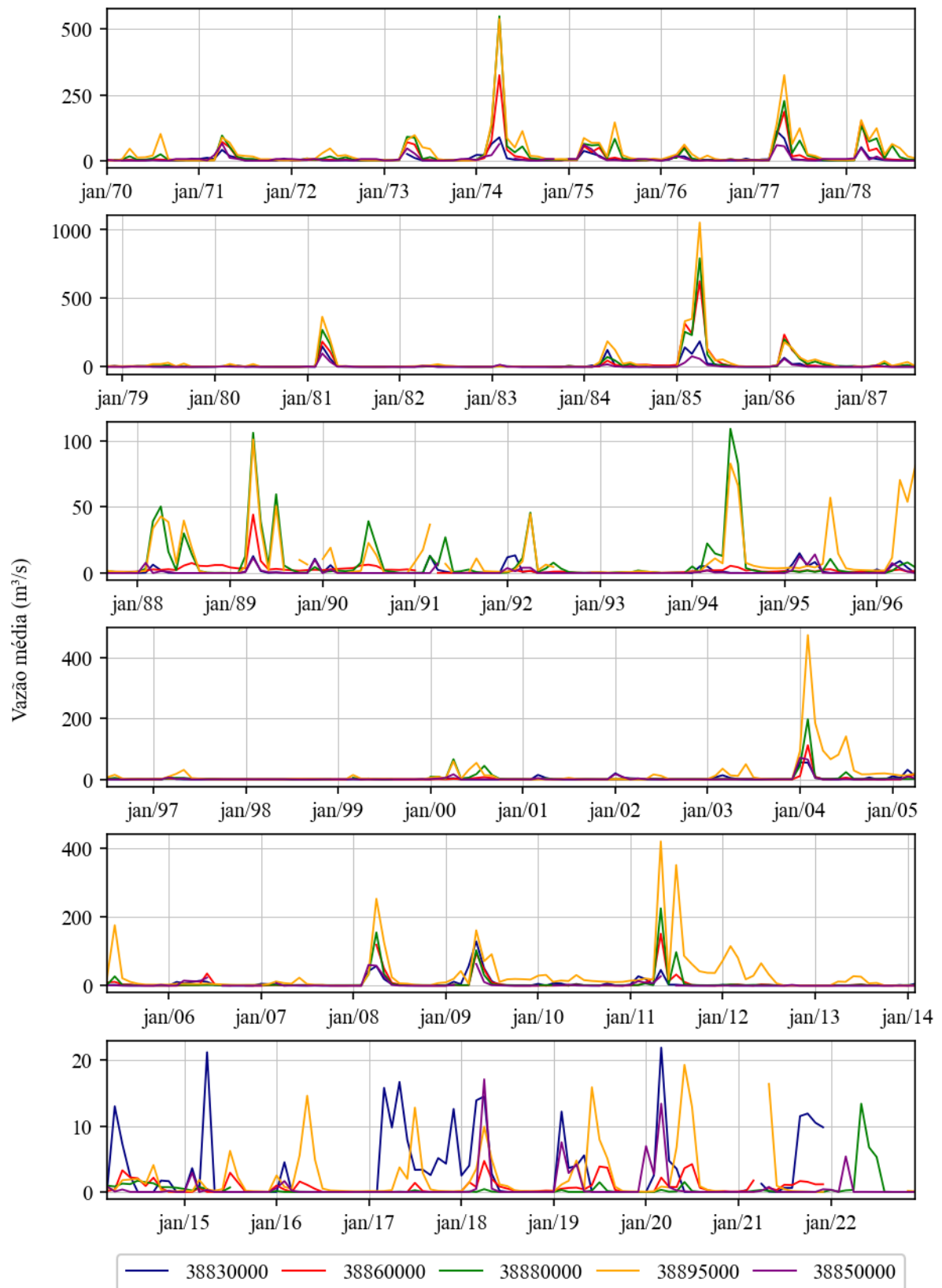
4.1.5.2 *Fluviogramas Simultâneos*

Os fluviogramas simultâneos para as estações fluviométricas selecionadas na Bacia do Rio Paraíba estão apresentados na Figura 4.25. Nota-se que há uma boa concordância entre os fluviogramas de todas as estações. Das cinco estações fluviométricas, apenas a de código 38850000 está localizada no Rio Taperoá. Essa estação tem comportamento semelhante ao da estação 38830000, localizada no trecho superior do Rio Paraíba. Ambas as estações possuem áreas de drenagem de mesma ordem de grandeza e estão localizadas em uma porção da bacia com aspectos climatológicos semelhantes.

Ainda é possível observar na Figura 4.25 os anos para os quais a série histórica de vazões médias apresenta as vazões de maior magnitude, nos períodos úmidos de 1974 e 1985. Em 1994, destacam-se os hidrogramas das estações 38880000 e 38895000, ambas no baixo curso do Rio Paraíba, com comportamento distinto dos demais fluviogramas, indicando que podem ter ocorrido eventos de cheia apenas nesta porção da bacia hidrográfica.

Adicionalmente, cabe destacar que para o período de dados entre os anos de 2015 e 2022 há um comportamento diferente das vazões em relação ao período anterior. Esta mudança de comportamento é especialmente evidente para a estação 38830000 (Figura 4.25). Destaca-se na figura que a escala vertical (vazão média em m³/s) está diferente entre as janelas de períodos apresentados. Antes de indicar uma mudança de comportamento hidrológico, esta alteração está associada ao nível de consistência da série para este último período de dados. De 1970 a 2014, as séries disponíveis no Hidroweb estão consistidas, enquanto para o período subsequente consta apenas a série de dados brutos (não consistidos).

Figura 4.25 - Fluviogramas simultâneos de vazões médias mensais no período de 1970 a 2022



Fonte: ANA (2024).

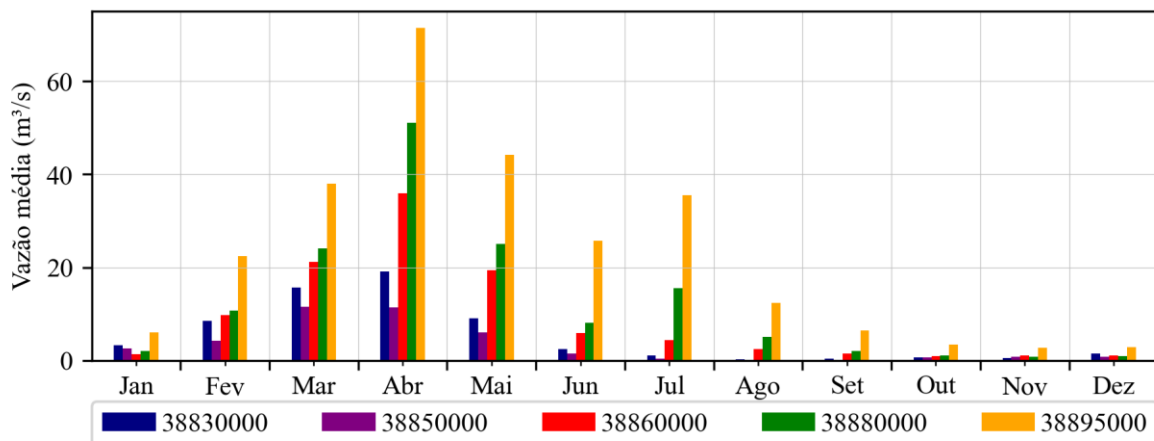
Por fim, destaca-se que nesses gráficos também é possível perceber os efeitos da seca já mencionada no item 4.3.3.1, alterando as dimensões das vazões a partir de 2011, como pode

ser observado na mudança de grandeza do eixo vertical da terceira para a quarta parte da Figura 4.25.

4.1.5.3 Vazões médias

Pela análise das vazões médias mensais e anuais confirma-se a variação sazonal das vazões com período mais seco entre setembro e janeiro e mais úmido entre fevereiro e agosto, aproximadamente, conforme evidencia a Figura 4.26.

Figura 4.26 - Variação sazonal das vazões médias mensais



Fonte: Adaptado de ANA (2024).

4.1.5.4 Curvas de Permanência

A curva de permanência representa a distribuição de frequências acumuladas das vazões diárias, mensais ou anuais, onde representa-se, no eixo das abcissas, geralmente, a frequência acumulada e nas ordenadas as vazões. As frequências acumuladas podem ser interpretadas em termos da porcentagem de tempo em que uma dada vazão foi igualada ou superada no histórico de vazões. Por exemplo, a menor vazão observada no histórico estaria disponível (ou seria igualada ou superada) durante 100% do tempo.

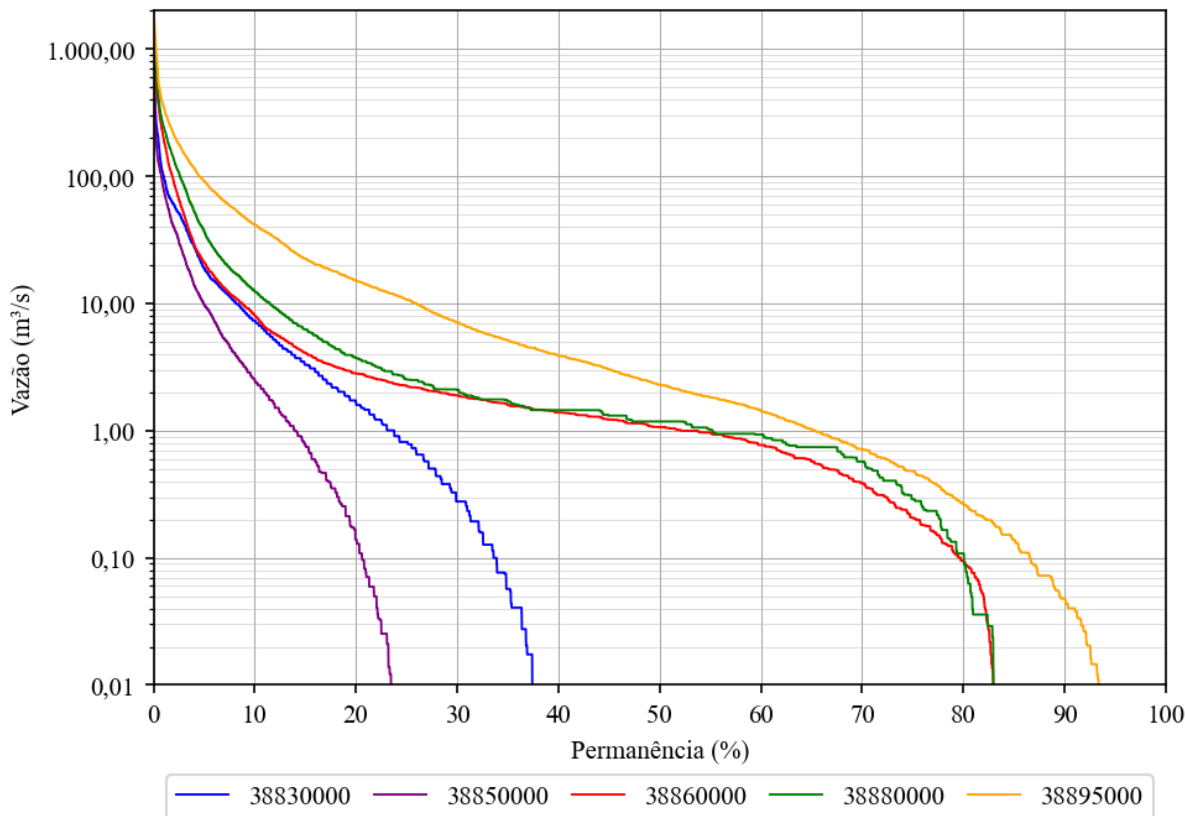
A curva de permanência é um instrumento indispensável para o planejamento de recursos hídricos, permitindo visualizar e quantificar o potencial hídrico de um rio. Para comparação de bacias com diferentes áreas de drenagem, é conveniente utilizar as vazões específicas (em L/s.km²), permitindo comparar a “riqueza hídrica” por área unitária em diferentes bacias.

A curva de permanência pode ser construída com vazões diárias, mensais ou anuais. A curva de vazões diárias é mais precisa, pois o cálculo de vazões médias mensais e anuais amortece as variações de vazão ocorridas, ocultando características importantes do regime de vazão do local.

O procedimento para obtenção da curva de permanência a partir de uma série de vazões Q_1, Q_2, \dots, Q_n consiste em ordenar a série em ordem decrescente, associar um contador à série ordenada ($i = 1$ para $Q_{m\acute{a}x}$, $i = n$ para $Q_{m\acute{i}n}$), associar a permanência por $p = i/n \times 100$ e plotar em um gráfico os pares Q versus p .

As curvas foram construídas a partir das séries de vazões médias diárias. A Figura 4.27 mostra as curvas de permanência das 5 estações fluviométricas selecionadas para o estudo, e a Tabela 4.8 contém os valores das vazões associadas a cada permanência.

Figura 4.27 - Curvas de permanência para as Estações Fluviométricas na Bacia do Rio Paraíba



Fonte: Adaptado de ANA (2024).

Tabela 4.8 - Vazões de referência para diferentes permanências (m³/s)

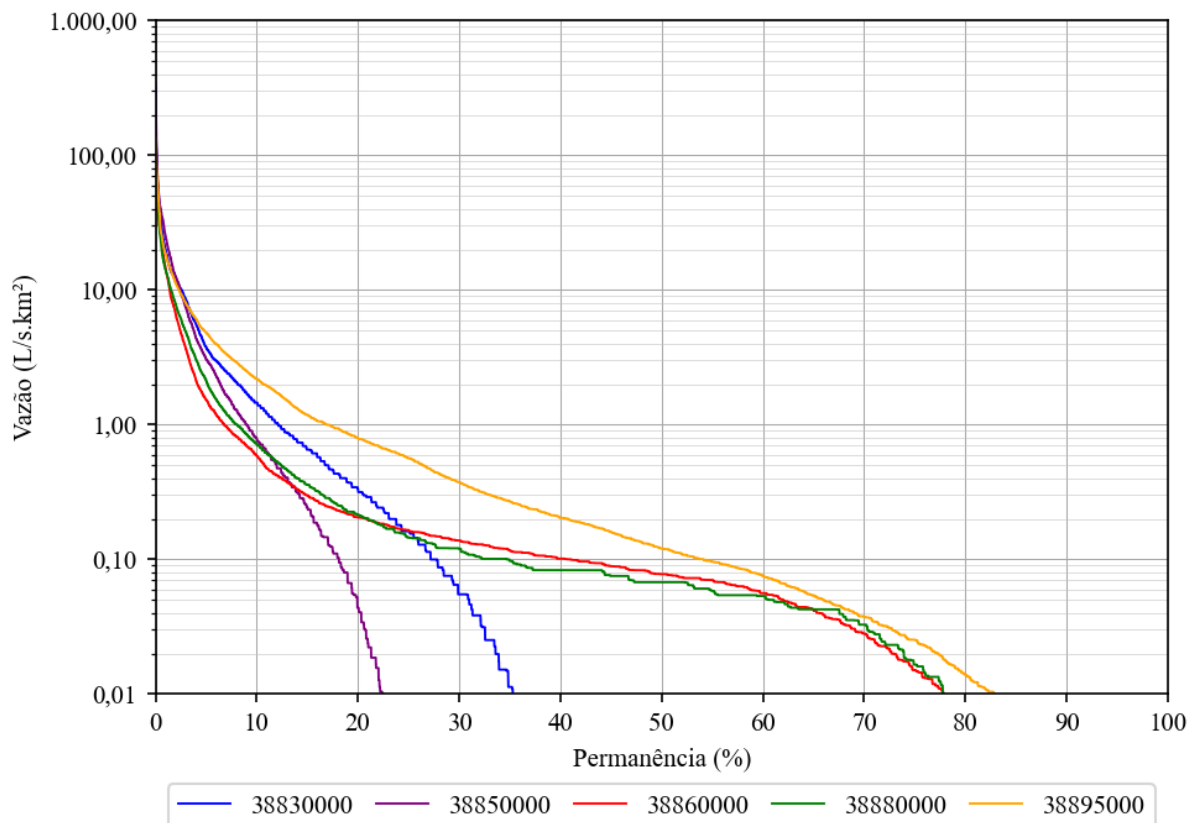
| Estação Fluviométrica | Q ₁₀ | Q ₂₀ | Q ₃₀ | Q ₅₀ | Q ₆₀ | Q ₇₀ | Q ₈₀ | Q ₉₀ | Q ₉₅ | Q ₉₈ |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 38830000 | 7,32 | 1,68 | 0,28 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 38850000 | 2,55 | 0,14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 38860000 | 8,05 | 2,81 | 1,89 | 1,07 | 0,77 | 0,39 | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 38880000 | 12,63 | 3,72 | 2,09 | 1,18 | 0,93 | 0,57 | 0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 38895000 | 41,64 | 15,14 | 7,11 | 2,30 | 1,43 | 0,71 | 0,26 | 0,05 | 0,00 | 0,00 |

Fonte: Adaptado de ANA (2024).

Pela análise das curvas, percebe-se imediatamente o efeito das prolongadas estiagens, características das regiões áridas. Mesmo para o posto fluviométrico Ponte da Batalha (38895000), situado no Baixo Paraíba e com significativa área de drenagem, as vazões com permanências acima de 90% são nulas. Para as demais estações a montante desta, nenhuma delas possui vazão não nula com permanência acima de 80%. Este fato mostra a necessidade de regularização e/ou transferência de vazões de outras bacias para suprir a deficiência hídrica.

Adicionalmente, pode-se fazer a mesma análise para as curvas de permanência traçadas a partir das vazões específicas, conforme apresenta a Figura 4.28. As vazões específicas associadas a cada permanência estão apresentadas na Tabela 4.9.

Figura 4.28 - Curva de permanência para as vazões específicas das estações fluviométricas na Bacia do Rio Paraíba



Fonte: Adaptado de ANA (2024).

Tabela 4.9 - Vazões específicas de referência para diferentes permanências (L/s.km²)

| Estação Fluviométrica | Q ₁₀ | Q ₂₀ | Q ₃₀ | Q ₅₀ | Q ₆₀ | Q ₇₀ | Q ₈₀ | Q ₉₀ | Q ₉₅ | Q ₉₈ |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 38830000 | 1,46 | 0,33 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 38850000 | 0,80 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 38860000 | 0,59 | 0,21 | 0,14 | 0,08 | 0,06 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 38880000 | 0,73 | 0,21 | 0,12 | 0,07 | 0,05 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 38895000 | 2,19 | 0,80 | 0,37 | 0,12 | 0,08 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Fonte: Adaptado de ANA (2024).

Da observação da figura e tabela acima, percebe-se a similaridade das vazões específicas para as permanências acima de 50% nas estações com maiores áreas de contribuição (38860000, 38880000 e 38895000). Para as estações na parte de montante da bacia (38830000 e 38850000) esta comparação não é possível devido à nulidade das vazões para a maior parcela das curvas de permanência.

4.1.5.5 Vazões máximas

Para as séries de vazões diárias dos postos fluviométricos selecionados, foi realizada uma análise estatística de vazões máximas anuais, por meio do ajuste de distribuições de probabilidade comumente utilizadas em estudos dessa natureza. Foram selecionadas as distribuições Gumbel e Exponencial.

Em uma série anual de valores máximos de uma variável observada, para obter uma estimativa da probabilidade teórica (P), os dados são ordenados em ordem decrescente e a cada valor é atribuído o seu número de ordem m (m variando de 1 até n , o número de anos de observação). A frequência com que foi igualado ou superado um evento de ordem m pode ser obtida pelo método de Kimbal, onde:

$$F = \frac{m}{n+1}$$

Considerando F como uma boa estimativa da probabilidade teórica P e definindo o tempo de recorrência T (ou tempo de retorno) como o intervalo médio de anos em que pode ocorrer ou ser superado um dado evento, tem-se a seguinte relação:

$$T = \frac{1}{P}$$

Convém notar que o valor de F pode dar uma boa ideia do valor real de P apenas para tempos de recorrência bem menores que o número de anos de observação. Para eventos mais raros, deve-se ajustar uma distribuição de probabilidades teórica de modo a possibilitar uma estimativa mais correta da probabilidade.

Um problema bastante comum em projetos de engenharia de recursos hídricos é a estimativa da vazão máxima associada a uma probabilidade de ocorrência expressa por um tempo de recorrência. Existem diversas formas de proceder a esta estimativa, assim como existem várias funções probabilísticas teóricas aplicáveis neste caso. Alguns modelos bastante utilizados incluem as distribuições Gumbel e Exponencial, entre outras.

No ajuste das distribuições teóricas, o chamado método dos momentos iguala os momentos populacionais (média μ ; desvio-padrão σ e assimetria γ) das distribuições teóricas aos momentos amostrais (\bar{X} , S e Ca) para a estimativa dos parâmetros das funções das distribuições de probabilidades. Portanto, para cada uma das distribuições citadas obtém-se:

- Distribuição Gumbel

A distribuição Gumbel possui a seguinte função de distribuição inversa, onde $x(T)$ é o *quantil* (vazão máxima anual) estimado para o tempo de recorrência T (anos):

$$x(T) = \beta - \alpha \ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]$$

e valem as seguintes relações:

$$\alpha = \frac{\sigma\sqrt{6}}{\pi}$$

$$\beta = \mu - 0,4500\sigma$$

$$\gamma = 1,14$$

- Distribuição Exponencial

A distribuição Exponencial possui a seguinte função de distribuição inversa:

$$x(T) = \beta + \alpha \ln T$$

e valem as seguintes relações:

$$\alpha = \sigma$$

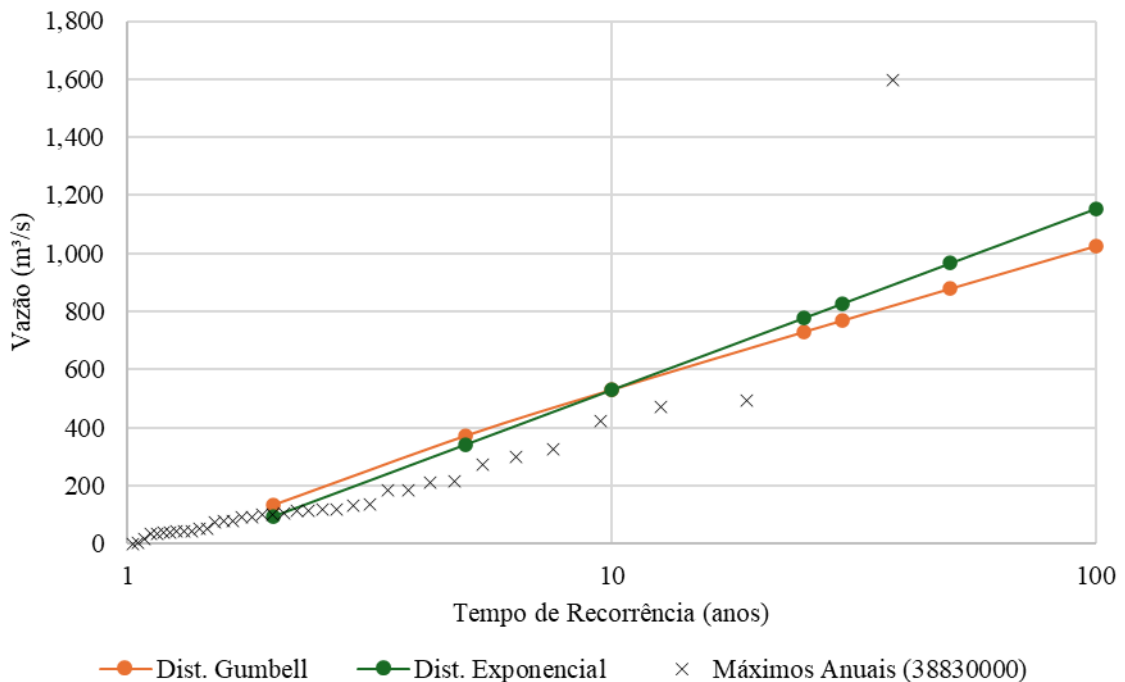
$$\beta = \mu - \sigma$$

$$\gamma = 2.0$$

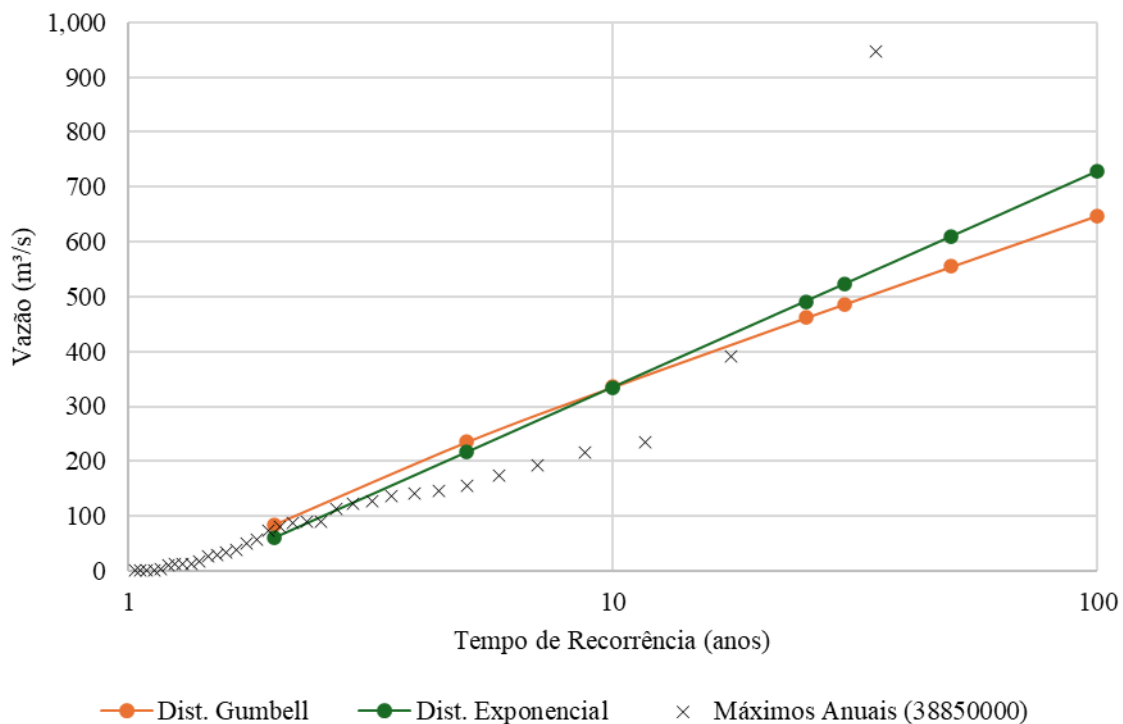
Pela análise dos resultados dos ajustes teóricos para as séries de vazões máximas anuais (Figura 4.29 a Figura 4.33) nota-se a grande variabilidade dos máximos ao longo da série amostral, dificultando a obtenção de um ajuste teórico que se adapte a toda a série de máximos. Por outro lado, os valores das estimativas teóricas obtidas para tempos de recorrência entre 2 e 100 anos, mostrados nas mesmas figuras e na Tabela 4.10 permitem a comparação entre os comportamentos das vazões extremas ao longo do curso do Rio Paraíba.

A Figura 4.34 mostra as vazões máximas em termos de vazões específicas (vazões divididas pelas respectivas áreas de drenagem das estações). Nota-se uma redução das vazões específicas (L/s.km²) em relação ao aumento da área de contribuição, com exceção da estação 38860000 a qual possui uma vazão específica menor entre todas as estações, apesar de que em termos de vazões absolutas (m³/s) mostradas na Figura 4.35 a mesma estação possui vazões máximas um pouco acima das observadas nas estações a montante. Isso pode indicar uma menor contribuição de vazões de cheia causada pela influência da operação do reservatório Eptácio Pessoa (Boqueirão).

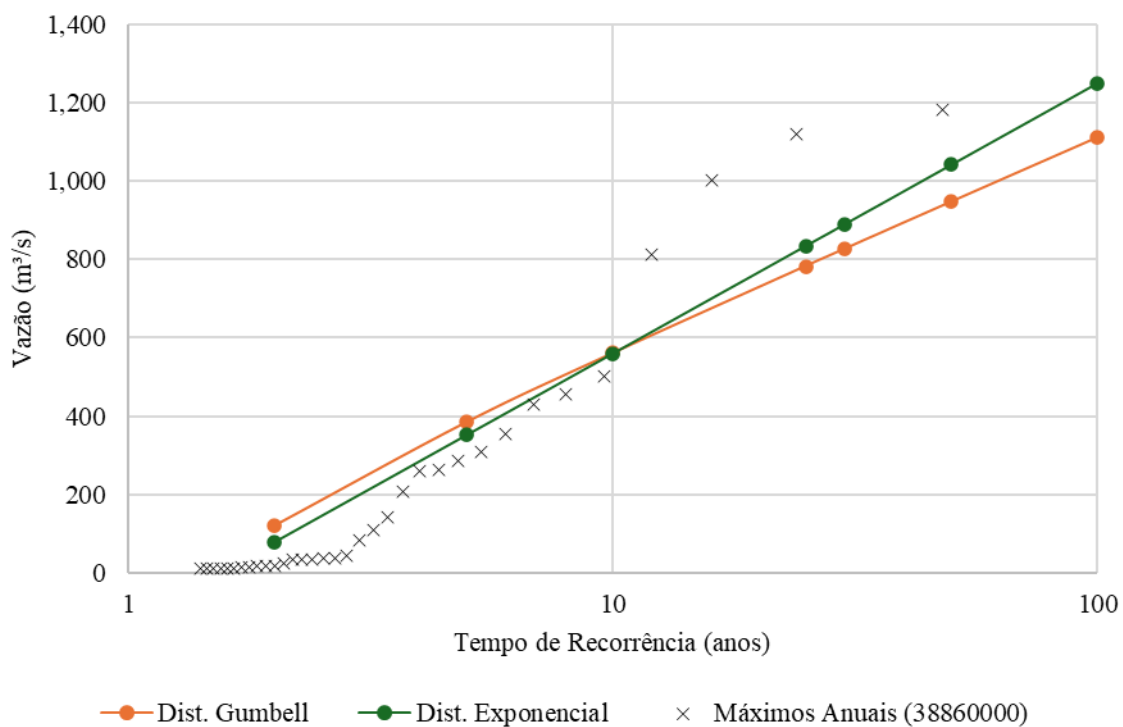
Figura 4.29 - Ajuste das distribuições de Gumbel e Exponencial para a estação 38830000



Fonte: Cobrape (2024).

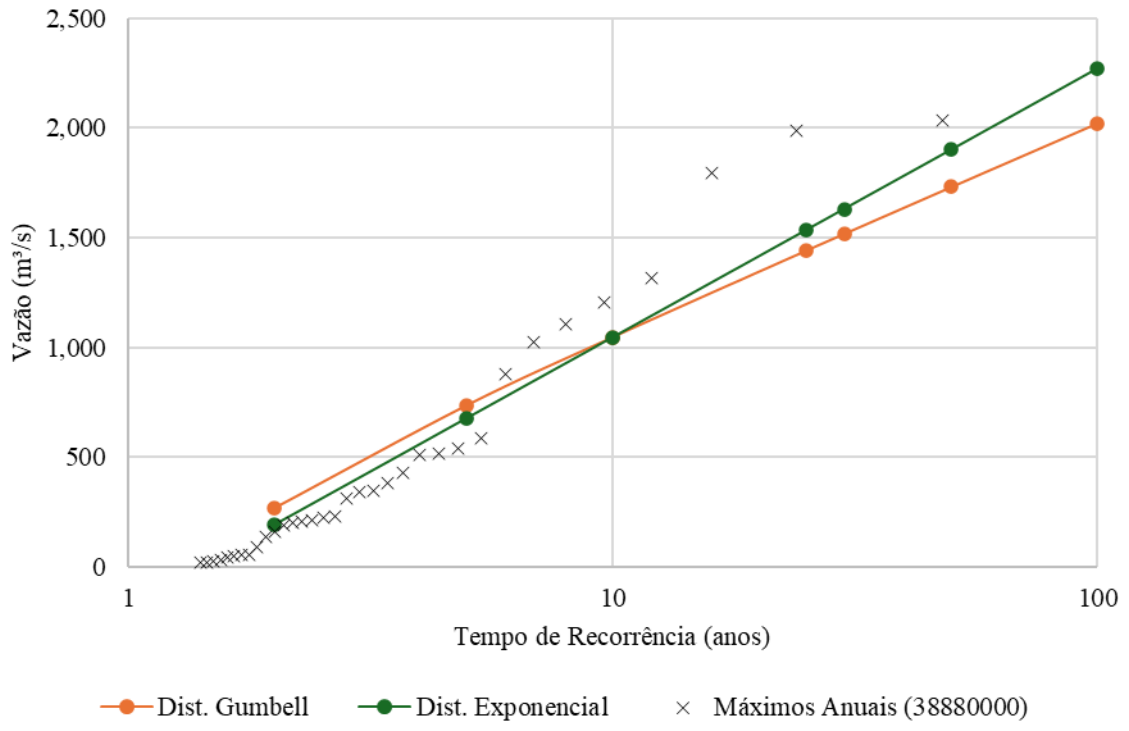
Figura 4.30 - Ajuste das distribuições de Gumbell e Exponencial para a estação 38850000

Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.31 - Ajuste das distribuições de Gumbell e Exponencial para a estação 38860000

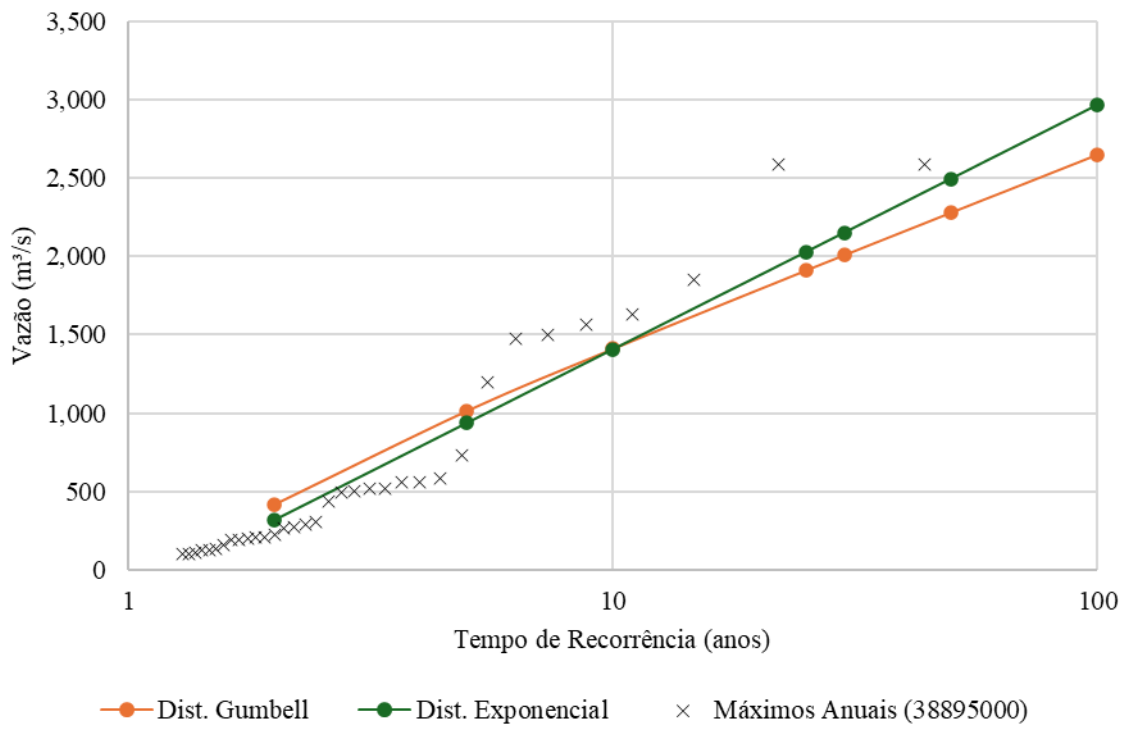
Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.32 - Ajuste das distribuições de Gumbell e Exponencial para a estação 38880000



Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.33 - Ajuste das distribuições de Gumbell e Exponencial para a estação 38895000



Fonte: Cobrape (2024).

Tabela 4.10 - Resultado do ajuste de distribuições de probabilidade para estudo de vazões máximas

| Estação Fluviométrica: | 38830000 | 38850000 | 38860000 | 38880000 | 38895000 |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Área de drenagem (km ²): | 5030 | 3180 | 13700 | 17400 | 19000 |
| Tamanho da amostra: | 37 anos | 34 anos | 47 anos | 49 anos | 43 anos |
| Média Amostral (m ³ /s): | 176,28 | 112,41 | 170,01 | 354,49 | 528,96 |
| Desvio Padrão (m ³ /s): | 271,29 | 170,72 | 299,74 | 531,39 | 675,46 |
| Assimetria da amostra: | 4,29 | 3,82 | 2,28 | 1,97 | 1,81 |

Vazões máximas estimadas (m³/s)

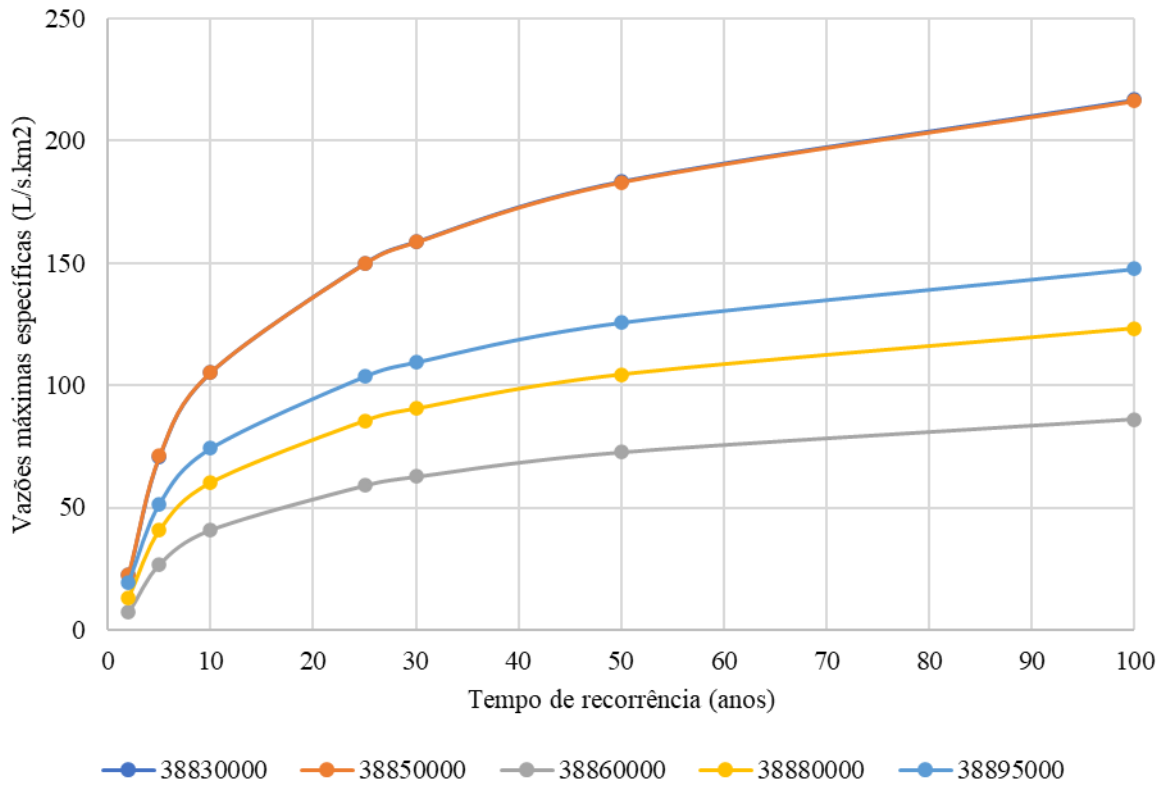
| Estação Fluviométrica: | 38830000 | | 38850000 | | 38860000 | | 38880000 | | 38895000 | | |
|-----------------------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|---------|
| Distribuição Probabilidade: | Gumbel | Exponencial | Gumbel | Exponencial | Gumbel | Exponencial | Gumbel | Exponencial | Gumbel | Exponencial | |
| Parâmetros | α | 211,52 | 271,29 | 133,11 | 170,72 | 233,71 | 299,74 | 414,33 | 531,39 | 526,65 | 675,46 |
| | β | 54,20 | -95,01 | 35,59 | -58,31 | 35,13 | -129,73 | 115,36 | -176,91 | 225,00 | -146,50 |
| | 2 | 131,72 | 93,03 | 84,37 | 60,02 | 120,78 | 78,04 | 267,22 | 191,43 | 418,02 | 321,69 |
| Tempo de Retorno (anos) | 5 | 371,47 | 341,61 | 235,24 | 216,45 | 385,67 | 352,68 | 736,83 | 678,34 | 1014,95 | 940,61 |
| | 10 | 530,20 | 529,66 | 335,13 | 334,79 | 561,05 | 560,45 | 1047,75 | 1046,67 | 1410,16 | 1408,80 |
| | 25 | 730,76 | 778,24 | 461,34 | 491,21 | 782,65 | 835,10 | 1440,60 | 1533,59 | 1909,52 | 2027,72 |
| | 30 | 770,06 | 827,70 | 486,07 | 522,34 | 826,06 | 889,75 | 1517,56 | 1630,47 | 2007,35 | 2150,87 |
| | 50 | 879,55 | 966,28 | 554,97 | 609,55 | 947,04 | 1042,86 | 1732,04 | 1901,92 | 2279,97 | 2495,91 |
| | 100 | 1027,24 | 1154,33 | 647,91 | 727,88 | 1110,21 | 1250,63 | 2021,32 | 2270,25 | 2647,69 | 2964,10 |

Vazões específicas máximas estimadas (L/s.km²)

| Estação Fluviométrica: | 38830000 | | 38850000 | | 38860000 | | 38880000 | | 38895000 | | |
|-----------------------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|--------|
| Distribuição Probabilidade: | Gumbel | Exponencial | Gumbel | Exponencial | Gumbel | Exponencial | Gumbel | Exponencial | Gumbel | Exponencial | |
| Tempo de Retorno (anos) | 2 | 26,19 | 18,49 | 26,53 | 18,88 | 8,82 | 5,70 | 15,36 | 11,00 | 22,00 | 16,93 |
| | 5 | 73,85 | 67,91 | 73,97 | 68,07 | 28,15 | 25,74 | 42,35 | 38,99 | 53,42 | 49,51 |
| | 10 | 105,41 | 105,30 | 105,39 | 105,28 | 40,95 | 40,91 | 60,22 | 60,15 | 74,22 | 74,15 |
| | 25 | 145,28 | 154,72 | 145,08 | 154,47 | 57,13 | 60,96 | 82,79 | 88,14 | 100,50 | 106,72 |
| | 30 | 153,09 | 164,55 | 152,85 | 164,26 | 60,30 | 64,95 | 87,22 | 93,71 | 105,65 | 113,20 |
| | 50 | 174,86 | 192,10 | 174,52 | 191,68 | 69,13 | 76,12 | 99,54 | 109,31 | 120,00 | 131,36 |
| 100 | 204,22 | 229,49 | 203,75 | 228,89 | 81,04 | 91,29 | 116,17 | 130,47 | 139,35 | 156,01 | |

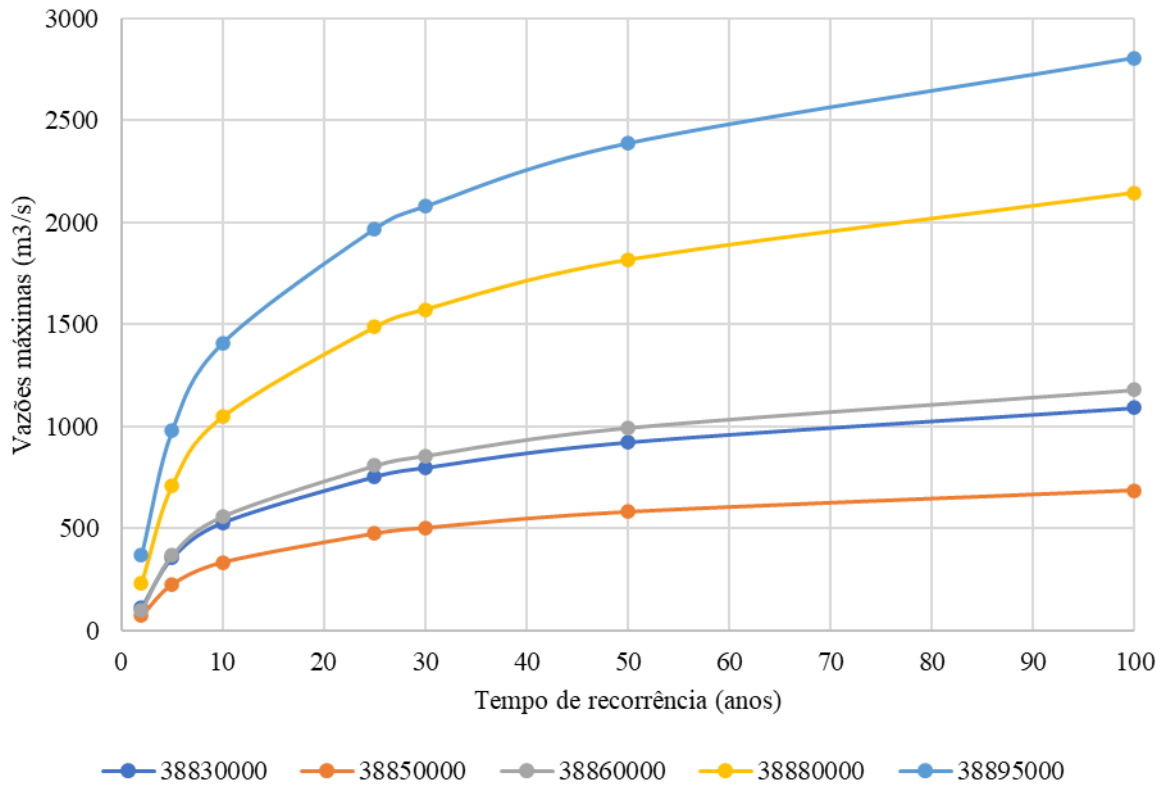
Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.34 - Vazões máximas específicas (L/s.km²) - média dos ajustes



Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.35 - Vazões máximas (m³/s) - média dos ajustes



Fonte: Cobrape (2024).

4.1.5.6 Análise de mínimas

Para os postos fluviométricos em estudo, foi realizada uma análise das vazões mínimas médias anuais de 7 dias de duração, procurando-se obter as vazões características $Q_{7,10}$ (mínimas médias de estiagem de 7 dias de duração e 10 anos de recorrência). Como seria esperado, haja vista os valores nulos das vazões das curvas de permanência, todos os valores dessa vazão característica resultaram nulos para os 5 postos fluviométricos utilizados, indicando que para todos os postos em análise estão presentes nas séries históricas de vazões vários anos com estiagens que resultaram em longos períodos de vazões nulas.

4.1.6 Diagnóstico da rede hidrometeorológica existente e proposição de melhorias no monitoramento

A análise de suficiência da rede meteorológica existente de acordo com o que propõe a Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2020), está apresentada no item 4.1.1. O resultado desta análise é apresentado pela Tabela 4.11, por sub-bacia. A Bacia do Rio Paraíba, quando analisada como um todo, já possui a densidade mínima de rede necessária para o monitoramento adequado. Entretanto, quando analisamos cada sub-bacia de forma independente, aparece a necessidade de implementação de dois postos de monitoramento fluviométrico, respectivamente nas sub-bacias do Médio Paraíba e Taperoá (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 - Resumo da análise de suficiência da rede de monitoramento hidrometeorológico

| Sub-bacia | Complementação necessária na rede de monitoramento (WMO, 2020) | | |
|---------------|----------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
| | Pluviométrico | Fluviométrico | Meteorológico |
| Alto Paraíba | - | - | - |
| Médio Paraíba | - | 1 | - |
| Baixo Paraíba | - | - | - |
| Taperoá | - | 1 | - |
| Total | - | 2 | - |

Fonte: Cobrape (2024).

Contudo, verificar a quantidade de estações de monitoramento não é o único critério a ser levado em consideração na análise da qualidade de uma rede de monitoramento. É necessário também a análise da disponibilidade desses dados, ou seja, a quantidade de medições e o período monitorado. Além disso, a quantidade de falhas e problemas nessas informações coletadas. Esta análise da qualidade dos dados de monitoramento foi apresentada nos itens 4.1.2 a 4.1.5. Logo, os itens seguintes trazem para cada tipo de dado a ser medido as propostas de melhoria na rede de monitoramento, bem como os critérios considerados para tal.

Sabe-se que a Gerência de Monitoramento da AESA-PB tem trabalhado continuamente nos últimos anos sobre a complementação de novas instalações de estações para o aprimoramento da rede de monitoramento do estado, haja vista a rede meteorológica, com 96 PCDs distribuídas no estado. Sabe-se também que é necessário analisar outros critérios que envolvem a questão de implantação e melhoria da rede de monitoramento do estado, pois após a instalação é necessário cuidados de manutenção e monitoramento contínuo para que cada estação possa registrar suas informações resultando em uma série histórica de informações consistentes.

Como ocorre normalmente ao longo da execução de planos de recursos hídricos, há uma etapa e uma atividade específica que explora a questão de expansão e melhoria da rede de monitoramento, assim como é previsto um programa específico para explorar esse tópico dentro da etapa de Plano de Ações. Todos os critérios que são levados em consideração serão apresentados dentro do programa de melhoria contínua da rede de monitoramento do estado e da bacia hidrográfica. Nas fases futuras do PRH-RPB, mais especificamente no Plano de Ações, que abordará as medidas necessárias para melhoria do monitoramento existente na bacia hidrográfica.

4.1.6.1 Monitoramento Meteorológico

A rede de monitoramento meteorológica da AESA (Figura 4.3) conta com um total de 33 estações localizadas dentro da bacia do Rio Paraíba, de um total de 96 estações no estado da Paraíba. As séries de dados disponibilizadas pela agência para *download*, nas 33 estações localizadas na área de interesse do PRH-RPB, possuem, em sua maioria, um período de dados ainda menos extenso do que as estações meteorológicas operadas pelo INMET na bacia.

Considerando também as 7 estações de monitoramento do INMET, são um total de 40 postos de monitoramento das variáveis meteorológicas necessárias para a estimativa da evapotranspiração em toda a Bacia Hidrográfica. Deste modo, uma vez atendida a necessidade de cobertura do monitoramento de acordo com os parâmetros da WMO (2020), sugere-se que se mantenham operantes as estações existentes de modo que as séries de dados possam logo ter um período de dados hidrológicamente representativo de modo a auxiliar a tomada de decisão acerca da gestão de recursos hídricos, uma vez que a evapotranspiração representa uma importante forma de perda de disponibilidade hídrica na região de interesse do PRH-RPB.

4.1.6.2 Monitoramento Pluviométrico

Como é possível verificar no Anexo B do RP-03, as estações pluviométricas existentes na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba não possuem dados em períodos simultâneos. Isso impossibilita a utilização de todos os dados disponíveis, uma vez que a diferença nos períodos de medição restringe o número de estações que pode ser considerada a depender do intervalo de tempo escolhido para o estudo. Para as estações implementadas mais recentemente, é necessário ainda que a série de dados monitorados sejam um pouco mais extensas a fim de avaliar a qualidade destas informações, para que tenham uma significativa representatividade hidrológica.

Da Tabela 4.11, ainda que numericamente existam pontos suficientes de monitoramento de acordo com a WMO (2020), para complementar a rede de monitoramento pluviométrica no contexto do PRH-RPB, foram propostas 21 estações distribuídas pela bacia da seguinte forma: 10 no Alto Paraíba, 6 na sub-bacia do Taperoá, 8 no Médio Paraíba e 2 no Baixo Paraíba.

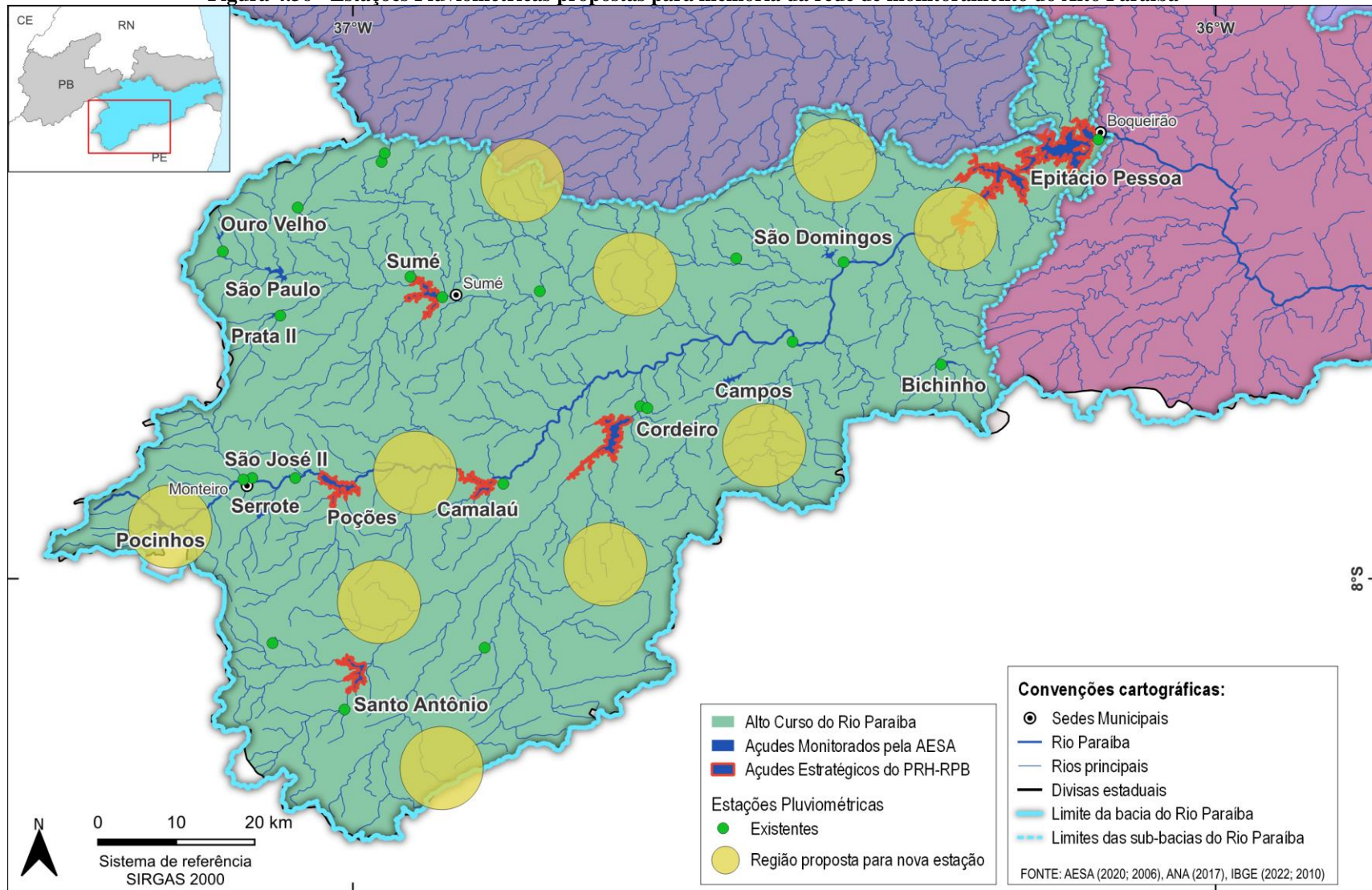
A metodologia utilizada para estimar a localização dessas estações baseou-se na delimitação de um raio de 10 km em torno das estações existentes. Nos locais fora desse raio, foram sugeridas novas estações. Cabe ressaltar que não foi proposta uma localização exata para as novas estações, mas sim regiões que carecem de dados pluviométricos. Essas regiões foram identificadas como áreas que se beneficiariam da melhoria da rede de monitoramento

pluviométrica da bacia do Rio Paraíba. As estações propostas para cada região são apresentadas na Figura 4.36 a Figura 4.39.

Essas proposições visam assegurar que a rede de monitoramento seja mais eficaz, permitindo a coleta de dados mais completos e contínuos. Com isso, será possível realizar análises mais precisas e detalhadas sobre o regime pluviométrico da região, contribuindo para melhorar a gestão dos recursos hídricos e para a elaboração de estratégias mais eficientes para a preservação e uso das águas da bacia.

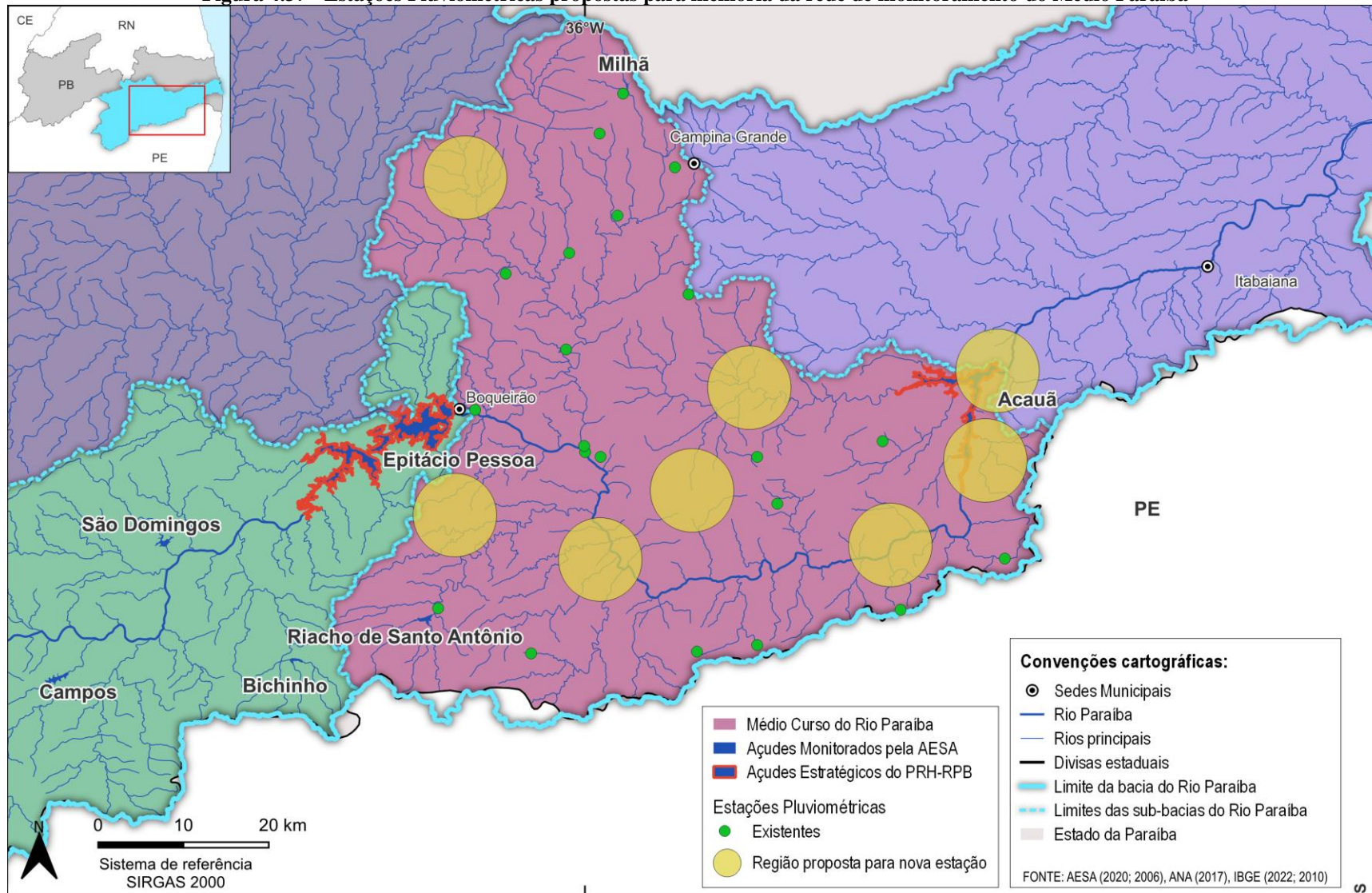
Cabe ressaltar que é essencial e necessário, a continuidade no monitoramento das estações já implantadas e operantes na bacia hidrográfica, além de sua contínua manutenção. Uma vez que a bacia apresenta uma quantidade suficiente de postos pluviométricos em operação, e relativamente uniformemente distribuídos ao longo de sua área de drenagem, a ampliação da rede tem caráter secundário, frente a manutenção da rede existente operando em condições favoráveis.

Figura 4.36 - Estações Pluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento do Alto Paraíba



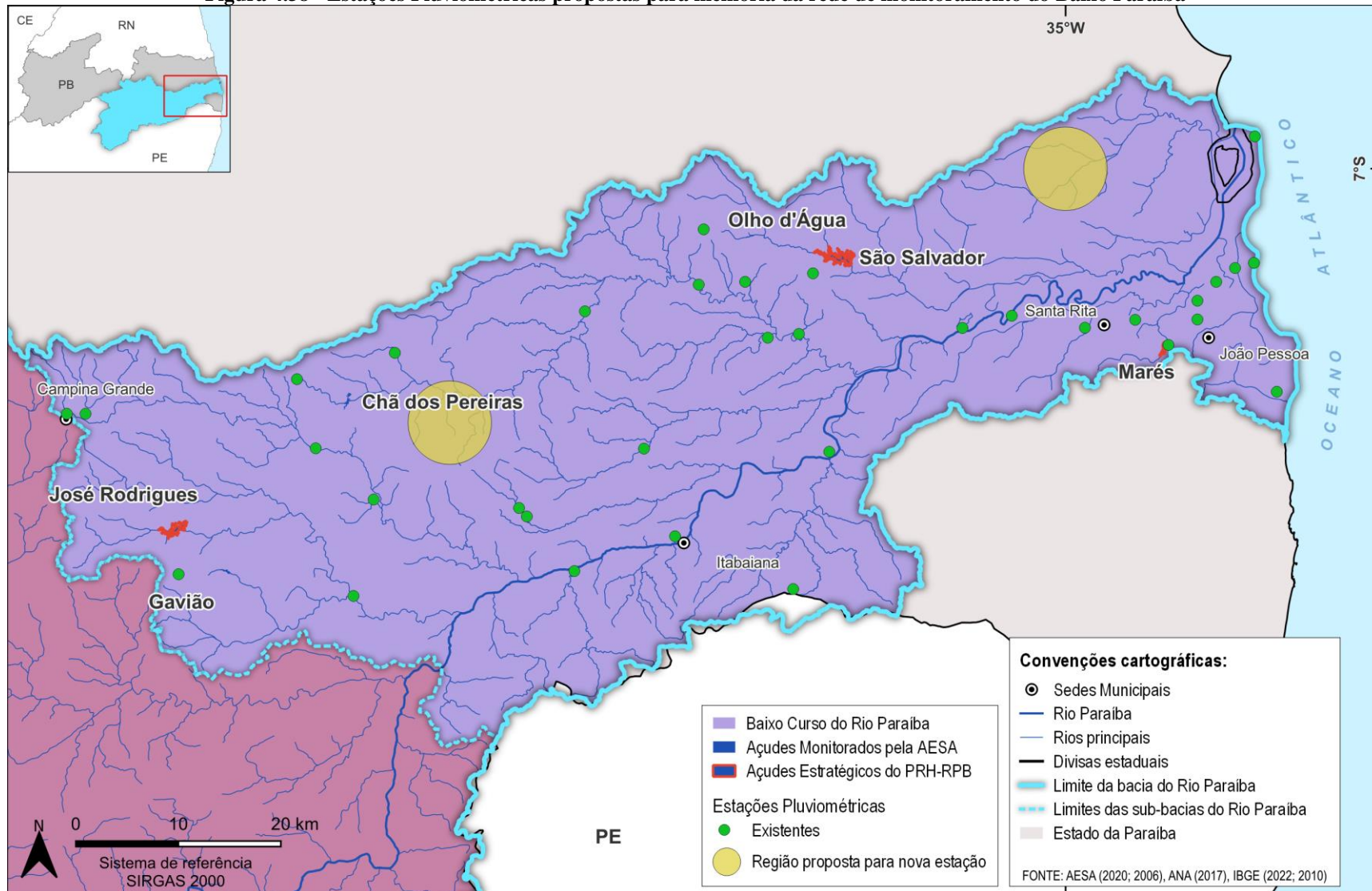
Fonte: Elaborado por Cobrape (2024).

Figura 4.37 - Estações Pluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento do Médio Paraíba



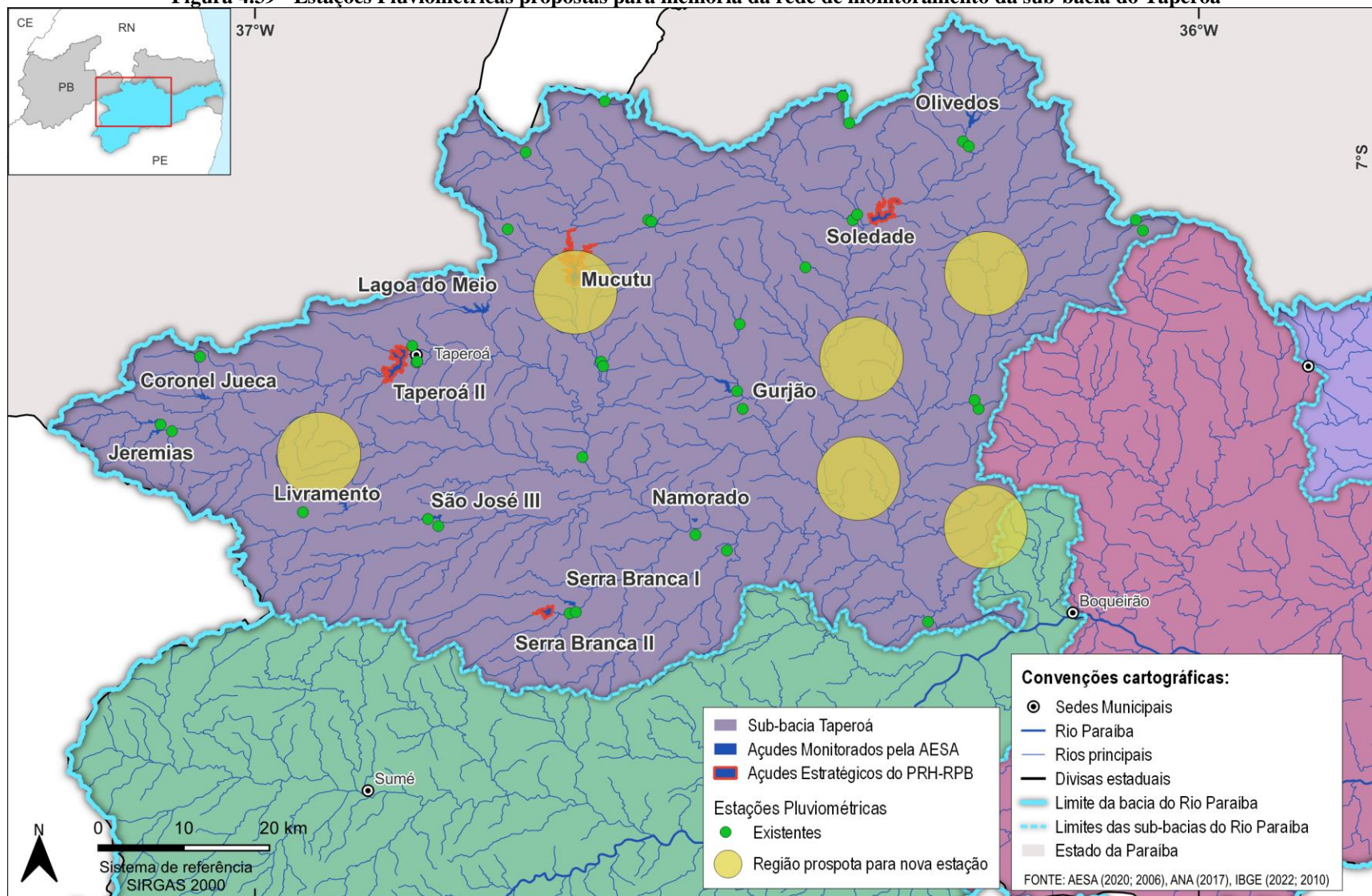
Fonte: Elaborado por Cobrape (2024).

Figura 4.38 - Estações Pluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento do Baixo Paraíba



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024).

Figura 4.39 - Estações Pluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento da sub-bacia do Taperoá



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024).

4.1.6.3 Monitoramento Fluviométrico

Conforme consta no cadastro do inventário de estações fluviométricas do portal *Hidroweb* (SNIRH, 2024), existem 13 estações fluviométricas em operação na bacia do Rio Paraíba, uma estação da AESA-PB e as demais do 12 do SGB (antigo CPRM). Este número, dada a área de drenagem da bacia hidrográfica, de acordo com a WMO (2020) seria suficiente. Entretanto, quando analisadas as sub-bacias de forma independente (Tabela 4.11), verifica-se a necessidade de implantação de mais duas estações de monitoramento, respectivamente nas sub-bacias do Taperoá e Médio Paraíba.

Do ponto de vista hidrológico e de gestão dos recursos hídricos da bacia, é de essencial importância que se possa estimar com alguma precisão a quantidade de água que alimenta os açudes, que representam quase que completamente a disponibilidade hídrica das regiões do Alto Paraíba, Taperoá e Médio Paraíba. Entretanto, a característica hidrológica e climática do semiárido representa um desafio considerável a este monitoramento. Na maior parte do tempo, os canais principais não apresentam vazão, e nos meses úmidos, o volume escoado, em geral, é bastante grande e escoado em um curto espaço de tempo, provocando a erosão das encostas e alterando a seção transversal de escoamento.

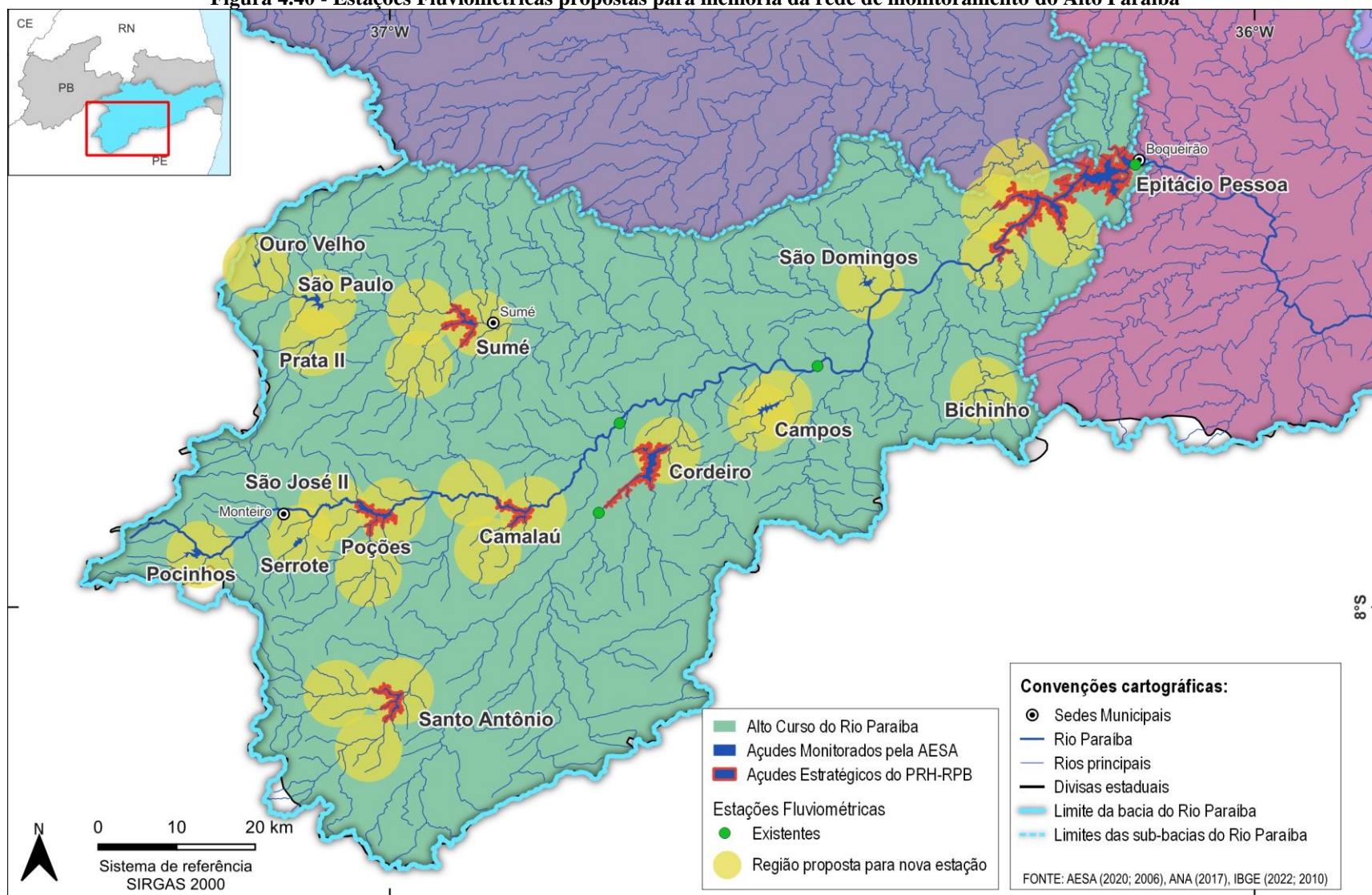
A implementação de uma estação fluviométrica deve considerar esta característica, sendo posicionada idealmente em uma seção transversal estável, de modo que a curva chave da estação possa ser utilizada de forma consistente para a estimativa de vazões. Esta decisão deve ser embasada em estudo específico para a ampliação da rede de monitoramento existente, a fim de que este se dê de forma eficaz e efetiva, gerando um banco de dados importante para o melhor gerenciamento da disponibilidade hídrica real nos açudes e canais perenes da bacia.

Esta preocupação foi levada em conta na proposta de melhoria na rede de monitoramento fluviométrico do PRH-RPB. É fundamental a avaliação da possibilidade de implantação de estações fluviométricas, principalmente à montante e à jusante dos principais açudes, o que permitiria uma melhor avaliação da real capacidade de atendimento às demandas de cada açude, além do melhor controle das regras operacionais dos mesmos. Consequentemente, permitiria um melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos da bacia do Rio Paraíba e melhorias na segurança hídrica da região.

Com o objetivo de complementar a rede de monitoramento, foram propostas regiões para o estudo da alocação de novas estações fluviométricas na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba: 26 regiões para o Alto Paraíba, 5 para o Médio Paraíba, 7 para o Baixo Paraíba e 20 para a sub-bacia do Taperoá. Essas regiões levaram em conta a necessidade de monitorar a entrada e a saída dos açudes monitorados pela AESA-PB. As localizações destas proposições estão apresentadas da Figura 4.40 a Figura 4.43.

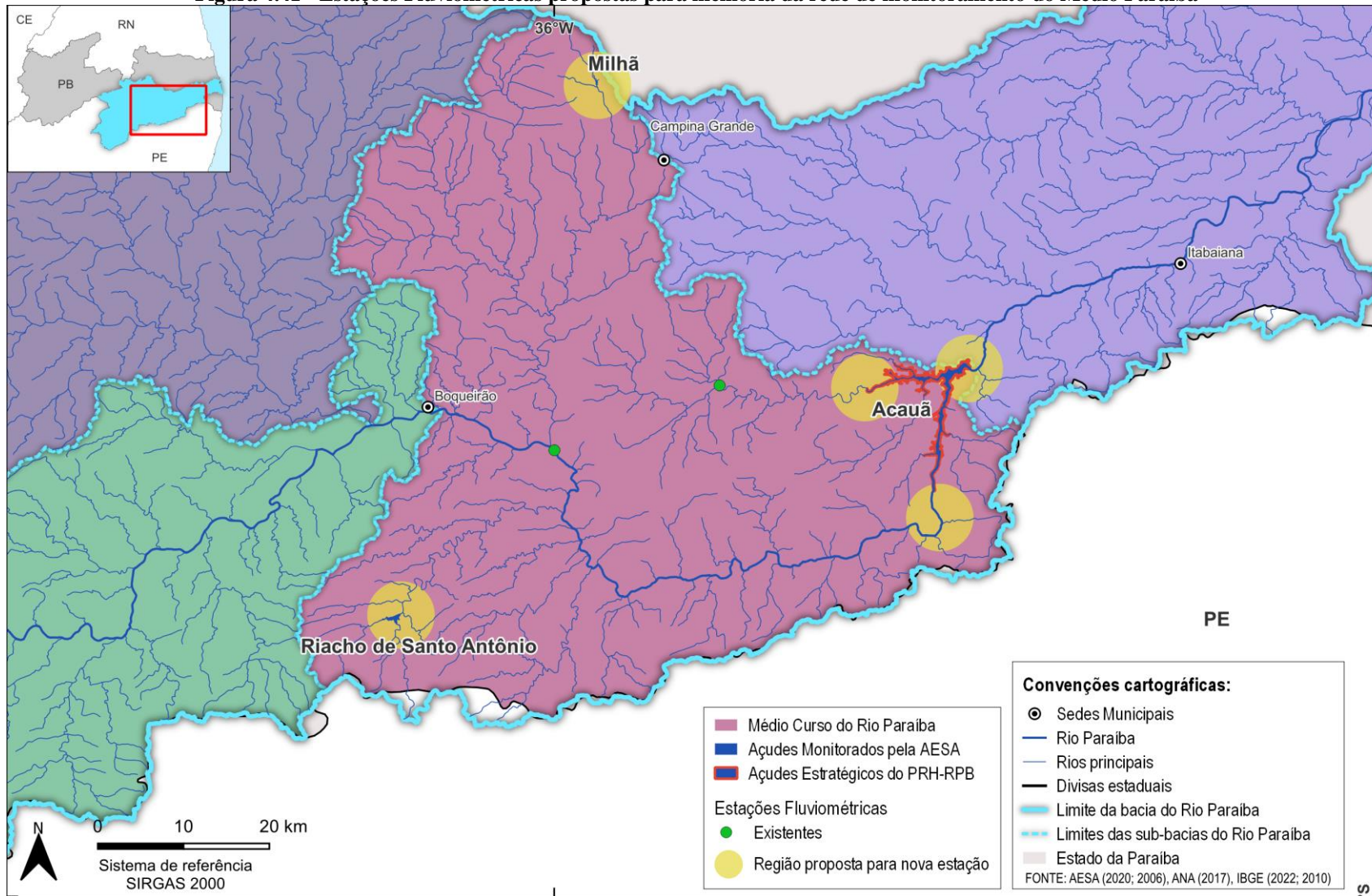
Vale ressaltar que a lacuna na disponibilidade de dados fluviométricos medidos será abordada nas fases futuras do PRH-RPB, mais especificamente no Plano de Ações, que abordará as medidas necessárias para melhoria do monitoramento existente na bacia hidrográfica frente às dificuldades do monitoramento impostas pelas características climatológicas e hidrológicas da região semiárida.

Figura 4.40 - Estações Fluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento do Alto Paraíba



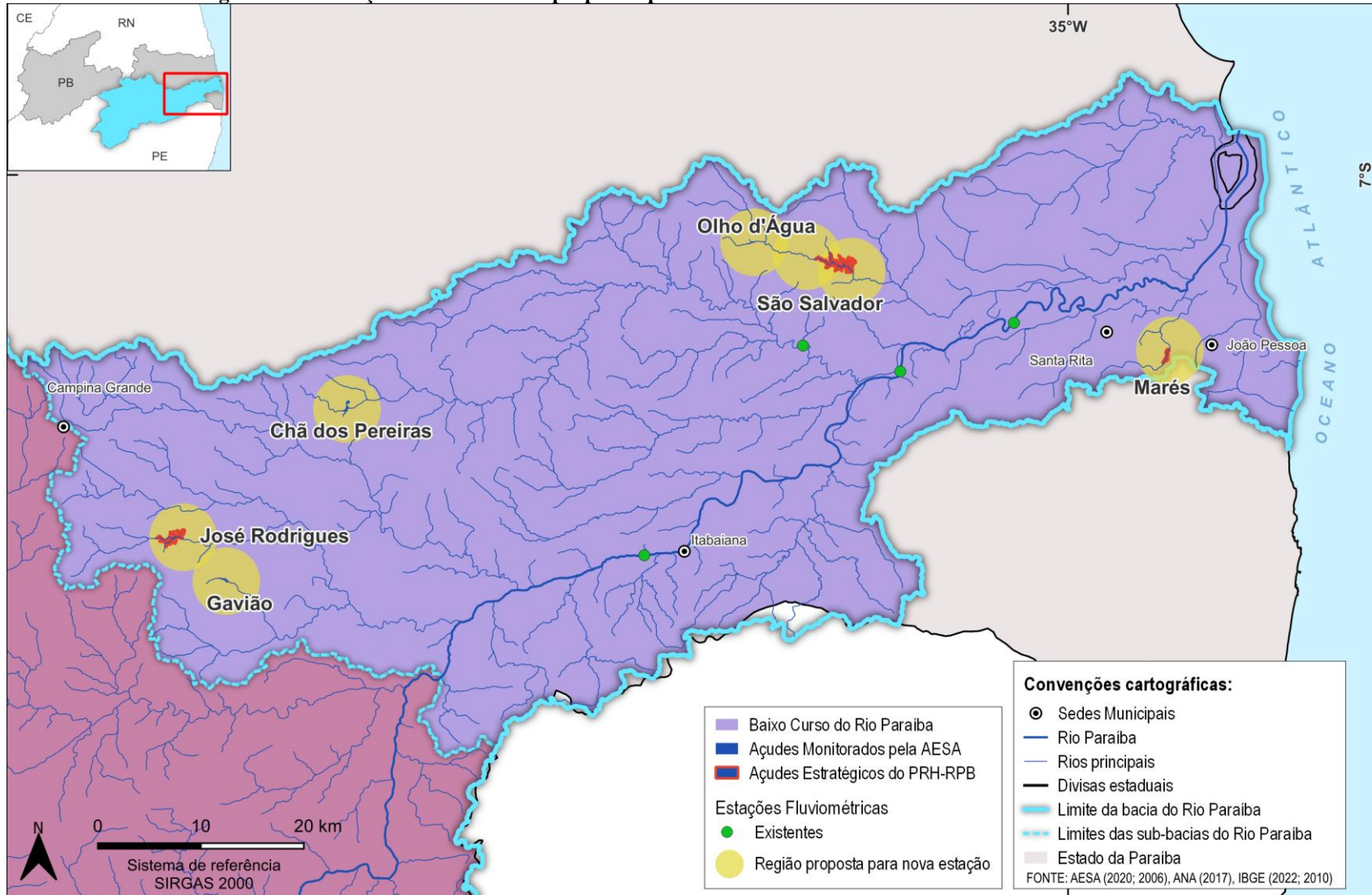
Fonte: Elaborado por Cobrape (2024).

Figura 4.41 - Estações Fluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento do Médio Paraíba



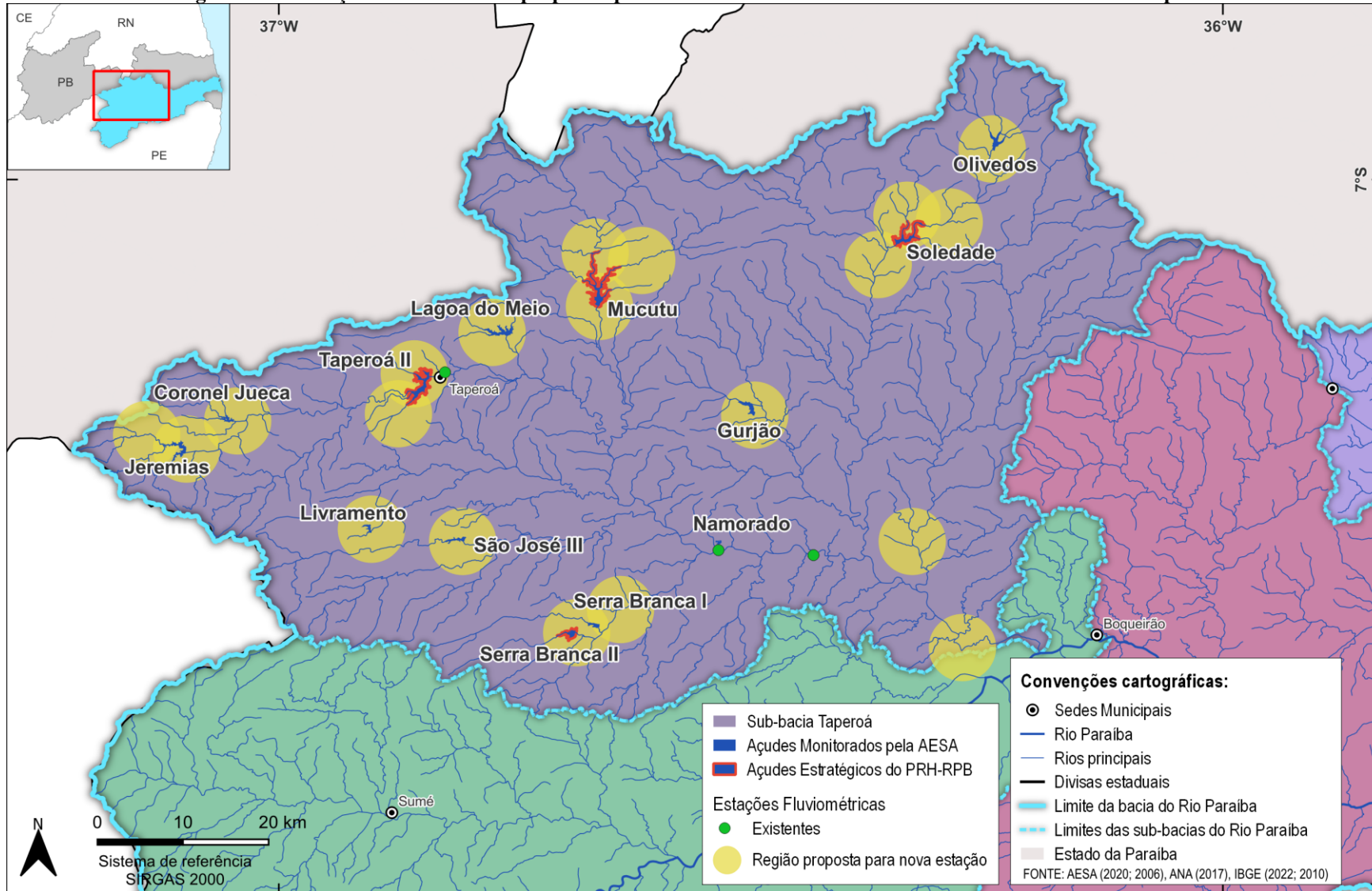
Fonte: Elaborado por Cobrape (2024).

Figura 4.42 - Estações Fluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento do Baixo Paraíba



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024).

Figura 4.43 - Estações Fluviométricas propostas para melhoria da rede de monitoramento da sub-bacia do Taperoá



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024).

4.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Os modelos hidrológicos são uma importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos, uma vez que permitem uma melhor compreensão do comportamento e dos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica (Tucci, 2005). Dentre os diversos tipos e aplicações desses modelos, no contexto de estudos de disponibilidade hídrica, destacam-se os modelos matemáticos de transformação chuva-vazão, capazes de estimar a vazão a partir dos dados observados de precipitação em uma bacia hidrográfica.

Cabe ressaltar que o sucesso na aplicação destes modelos está associado a etapa de calibração. A calibração de um modelo hidrológico é um processo fundamental em que os resultados obtidos a partir da simulação computacional com o modelo são comparados e ajustados de tal forma a representarem de forma coerente o comportamento hidrológico observado para a área de estudo. Uma vez calibrados, tais modelos permitem a obtenção de séries pseudo-históricas de vazão em locais da bacia hidrográfica sem dados observados.

De acordo com o inventário de estações fluviométricas disponível no Portal Hidroweb (ANA, s.d.), na Bacia do Rio Paraíba, estão cadastradas 95 estações fluviométricas, entretanto, somente 5 destas estações possuem um período de dados suficientemente extenso para a análise do comportamento hidrológico da bacia (como relatado em detalhes no capítulo 0). Por esse motivo, considerando a extensão da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, a aplicação de um modelo chuva-vazão se apresenta como uma alternativa para os estudos do PRH-RPB, a fim de se obter estimativas especializadas da disponibilidade hídrica na bacia.

4.2.1 Escolha do modelo hidrológico para o PRH-RPB

A escolha do modelo apropriado deve considerar não só o objetivo do estudo, mas também a disponibilidade de dados e aspectos particulares dos processos hidrológicos predominantes na área em que o modelo escolhido será aplicado. No que se refere aos processos hidrológicos envolvidos na transformação chuva-vazão, a grande maioria dos modelos hidrológicos se concentra na representação e separação do escoamento que acontece nas diferentes camadas do solo.

Na região semiárida do nordeste brasileiro uma representação mais simples das camadas do solo é suficiente para representar o comportamento hidrológico deste, uma vez que as parcelas associadas aos escoamentos subsuperficial e subterrâneo são muito pequenas, dadas as características do solo típico da região de formação cristalina (Schwarzbach e Lanna, 1989). Adicionalmente, conforme afirmam Cirilo *et al.* (2020) e Feitoza (2021), há a necessidade de se investigar melhor a representação das regiões áridas e semiáridas pelos modelos hidrológicos, uma vez que a performance desses modelos tende a cair conforme se aumenta a aridez da região.

Uma grande quantidade de modelos hidrológicos está documentada na literatura. A Tabela 4.12 apresenta de forma resumida a revisão bibliográfica acerca das aplicações de modelagem hidrológica chuva-vazão no semiárido nordestino, onde está inserida a maior parte da área de

drenagem da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. Esta revisão subsidiou a escolha de um modelo hidrológico capaz de gerar as séries de vazão pseudo-históricas de maneira regionalizada para toda a bacia hidrográfica.

Tabela 4.12 - Estudos de modelagem hidrológica na região semiárida do nordeste brasileiro

| Fonte | Área de Estudo | Modelo Hidrológico | Disponibilidade do modelo utilizado |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Silva, 2012 | 63 açudes monitorados pela AESA no semiárido da Paraíba | SMAP | Planilha Eletrônica (não disponível) |
| Cirilo <i>et. al.</i> , 2020 | Bacia dos rios Pajeú, Capibaribe, Mundaú e Ipojuca (PE) | CAWM IV | Planilha Eletrônica (não disponível) |
| Virões, 2018 | Semiárido Nordestino (Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Ceará) | MODHAC | Programa executável (não disponível) |
| Moura, 2007 | Rio Piranhas-Açu (PB/RN) | MODHISA | x |
| Feitoza, 2021 | 45 sub-bacias no semiárido nordestino | CAWM IV | Planilha Eletrônica |
| Silans <i>et. al.</i> , 2000 | Rio do Peixe | AÇUMOD | x |
| Felix & Paz, 2016 | Rio Piancó (PB) | MGB | Programa executável e interface GIS |
| Negreiros e Medeiros, 2017 | Rio Seridó (PB/RN) | MGB | Programa executável e interface GIS |
| Silva e Medeiros, 2018 | Rio Piranhas-Açu (PB/RN) | MGB | Programa executável e interface GIS |
| PERH-PB, 2022 | Sub-bacias do Estado da Paraíba | SMAP | Planilha Eletrônica (não disponível) |

Fonte: Cobrape (2024).

Todos os estudos apresentados na Tabela 4.12 mostram algumas das aplicações de modelos hidrológicos para diversas bacias do semiárido brasileiro. O modelo SMAP desenvolvido por (Lopes *et. al.*, 1981) é um modelo simples de poucos parâmetros e amplamente utilizado, inclusive na região do semiárido (Silva, 2012; Alves, 2008; Rampinelli e Costa, 2015; Sousa, 2022). O Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (2022) utilizou o modelo SMAP para geração das séries pseudo-históricas de vazões afluentes aos pontos de interesse para gestão de recursos hídricos, mas relatou uma série de dificuldades na aplicação do modelo e na representação do comportamento hidrológico das bacias hidrográficas.

A dificuldade de representação do comportamento hidrológico das bacias do semiárido é uma constante nos estudos de modelagem hidrológica, de modo que vários autores propõem diferentes modelos para a análise do comportamento da região. Alguns desses modelos são apresentados na Tabela 4.12, como o AÇUMOD (Silans *et al.*, 2000) e o MODHISA (Moura, 2007). Esses modelos têm poucas aplicações relatadas em literatura, embora bem-sucedidas. Uma razão para o pouco uso desses modelos talvez seja a dificuldade de acesso aos programas e planilhas dos modelos, bem como um manual de usuário, para aplicação em outras áreas de estudo.

Nesse mesmo sentido, o modelo MODHAC (Schwarzbach e Lanna, 1989), desenvolvido para aplicação tanto em bacias de rios perenes como em bacias do semiárido brasileiro, também não possui um manual técnico ou programa executável de fácil obtenção. O MODHAC, entretanto, tem mais aplicações documentadas em artigos e com bons resultados (Virões, 2018; Virões e

Cirilo, 2019; Silva, 2012). O modelo CAWM IV (Cirilo *et al.*, 2020) tem aplicações recentes para 45 sub-bacias do semiárido nordestino (Feitoza, 2021). Esse modelo foi desenvolvido especificamente para bacias do semiárido, pela Universidade Federal de Pernambuco e é um dos poucos que se encontra disponível para uso.

Dentre as sub-bacias em que foi aplicado o CAWM IV, no estudo de Feitoza (2021), três estão na bacia do rio Paraíba e são definidas pelos postos fluviométricos 38850000 (Rio Taperoá), 38830000 e 38860000 (Rio Paraíba). Assim como no trabalho de Virões (2018) os resultados para a regionalização de parâmetros hidrológicos nas sub-bacias definidas pelos postos fluviométricos 38830000 e 38860000 (ambas no curso principal do rio Paraíba) os resultados não foram satisfatórios. No estudo foi aplicado também o modelo MODHAC, e não se obteve bons resultados possivelmente pela presença dos açudes a montante das estações fluviométricas (Feitoza, 2021).

Tem-se também estudos com aplicação do MGB para sub-bacias na região semiárida. O MGB é um modelo amplamente utilizado no país, e embora existam poucas aplicações na região semiárida, os resultados obtidos foram satisfatórios de acordo com os autores (Felix e Paz, 2016; Silva e Medeiros, 2018).

Por fim, sabe-se da dificuldade de representação do comportamento hidrológico das bacias como a bacia do rio Paraíba, que tem grande parte de sua área de drenagem em uma região de características muito particulares, no semiárido nordestino. O regime intermitente dos canais principais e os elevados picos de vazão em estações de chuva são característicos dessas regiões e um desafio computacional por parte da modelagem desses processos. Levando em conta os resultados relatados no PERH-PB (2022) acerca da aplicação do modelo SMAP e também a disponibilidade dos modelos hidrológicos já aplicados para a região semiárida, optou-se por aplicar o MGB para os estudos de disponibilidade hídrica no PRH-RPB.

Outro critério que foi observado nessa escolha do modelo hidrológico, foi a necessidade de se representar a heterogeneidade da bacia hidrográfica como um todo. Isso envolve a representação dos diferentes tipos de uso e cobertura da terra, tipo de relevo e outras características físicas e climáticas que variam espacialmente em uma bacia. Para tal fez-se a escolha por um modelo hidrológico distribuído, como muitos dos estudos apresentados ressaltam ser importante para a análise de regiões extensas e com variabilidade espacial e climática relevantes.

Em geral, esses modelos distribuídos, como o MGB, são acoplados a uma ferramenta de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e permitem uma melhor integração e manipulação dessas diversas informações espacializadas, facilitando e melhorando o processo de obtenção e análise da disponibilidade hídrica no contexto da gestão de recursos hídricos (Machado, 2002; Santos *et al.*, 2006; Fan e Collischonn, 2014; Morad e Pérez, 2001) especialmente para a regionalização dos resultados para regiões sem monitoramento hidrológico.

4.2.2 Modelo de Grandes Bacias (MGB)

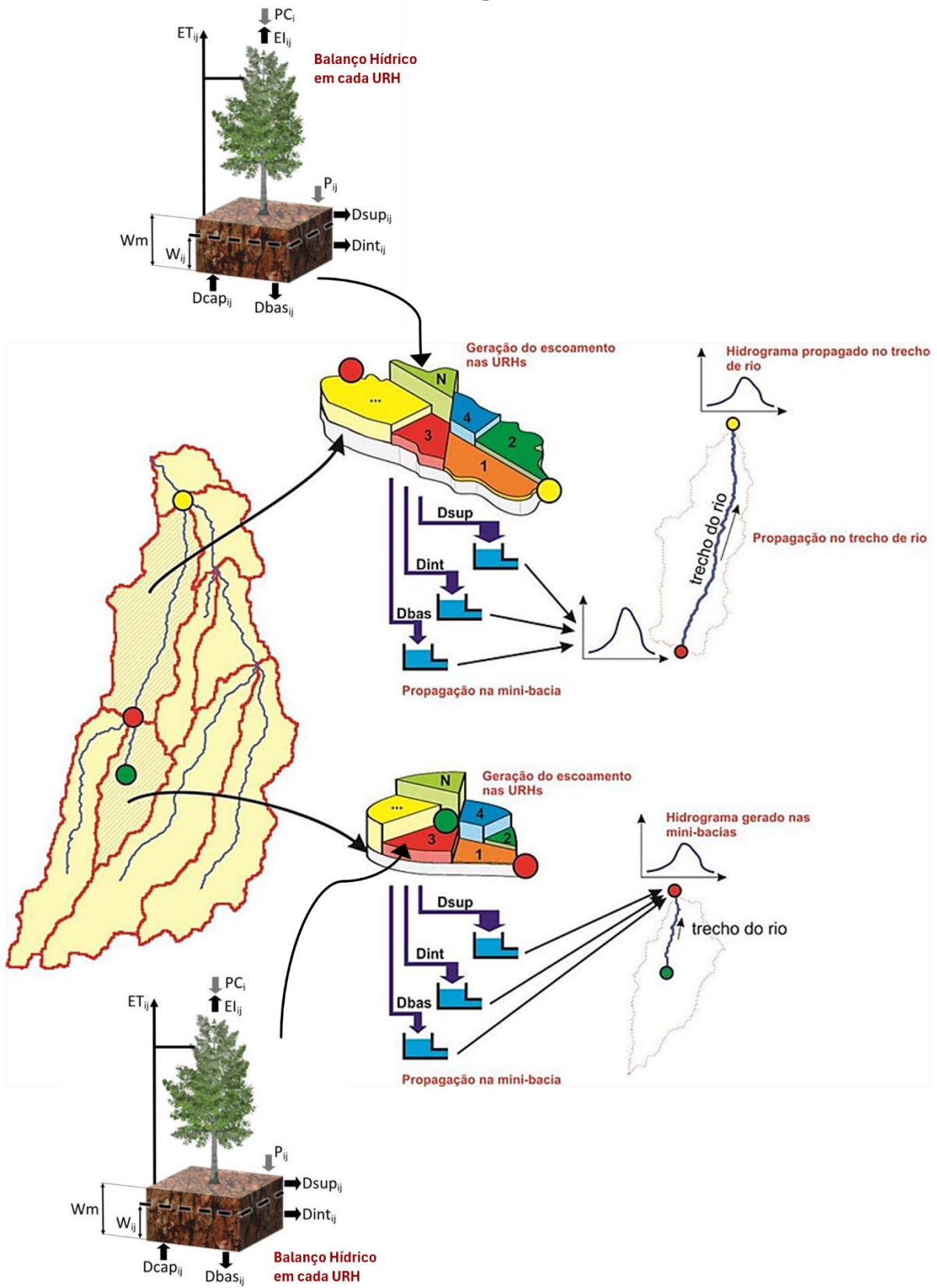
O Modelo de Grandes Bacias (MGB) é um modelo chuva-vazão que, com base nas equações físicas e conceituais, simula os processos hidrológicos na superfície terrestre (Collischonn *et al.*, 2020). Desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), este modelo tem sido utilizado em estudos com os mais diversos objetivos, como prever vazões de cheias, avaliar impactos decorrentes de mudanças no uso do e ocupação da terra, planejamento do uso de recursos hídricos, dentre outros (Collischonn *et al.*, 2020).

Seu funcionamento consiste em dividir a bacia hidrográfica, a partir de seu relevo, em unidades espaciais menores, chamadas de minibacias pelo modelo. Como em uma única minibacia podem existir diversas características físicas, essa variabilidade interna precisa ser reproduzida para que o modelo seja capaz de representar adequadamente seus processos hidrológicos. No MGB, essa variabilidade é implementada a partir do conceito das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), em que as minibacias são divididas em unidades menores que correspondem às combinações de diferentes informações, que permite que os parâmetros do modelo sejam associados a tais classes de URHs (Collischonn *et al.*, 2020).

Segundo Collischonn *et al.* (2020), nas URHs é que o modelo calcula a evapotranspiração e o balanço hídrico no solo, resultando na parcela de água que corresponde aos fluxos de escoamento em diferentes camadas do solo. Cada um desses escoamentos internos da minibacia são acumulados até atingir o principal trecho de rio da minibacia, e então são propagados como em um reservatório linear ao longo do trecho de rio, de seu ponto inicial até o exutório em outra minibacia, simulando os hidrogramas de vazões naturalizadas para cada delas. Um resumo do esquema do processamento do MGB descrito é ilustrado na Figura 4.44.

Por fim, ressalta-se que as URHs são definidas a partir da combinação principalmente de características do solo: a profundidade, a declividade do terreno e a cobertura da terra. Dessa forma, é incorporada a variabilidade espacial da bacia na modelagem hidrológica.

Figura 4.44 - Esquema do MGB



FONTE: Adaptado de Collischonn *et al.* (2020).

4.2.3 Aplicações do MGB no Semiárido

Para verificar a empregabilidade do modelo no PRH-RPB, foi verificada a aplicação do MGB em algumas regiões do Brasil análogas à Bacia do Rio Paraíba. Nesse sentido, identificou-se que o modelo foi aplicado para a bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu, que tem a maior parte de sua área localizada dentro do estado da Paraíba, simulando o período entre 1963 e 2015. Neste caso, Silva e Medeiros (2018) destacam os problemas de estabelecer o comportamento hidrológico dentro da região do semiárido do Nordeste e a importância da aplicação de modelos para definir este comportamento. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios pelos autores (Silva e Medeiros, 2018).

O MGB também foi aplicado na bacia hidrográfica do Rio São Francisco por Silva, Collischonn e Tucci (2004) para um projeto de pesquisa com o objetivo de prever vazões afluentes em reservatórios hidrelétricos. O estudo compreendeu os anos de 1977 a 1997, com os primeiros 9 anos para calibração do modelo, e os demais 11 anos para verificação. Para os autores, os resultados da modelagem foram bons, com destaque para os ajustes obtidos nos hidrogramas observados e simulados, ressaltando que o MGB poderia ser uma ferramenta com grande potencial para ser utilizada no contexto da tomada de decisão na gestão de recursos hídricos da bacia.

Negreiros e Medeiros (2017) aplicaram o MGB na bacia do Rio Seridó, localizada no semiárido nordestino, para avaliar o desempenho do modelo em uma bacia de rio intermitente, avaliando o período entre 1990 e 2000. Os resultados apontaram que o modelo reproduziu bem a sazonalidade da bacia, bem como a distinção entre os anos com maiores e menores precipitações. Contudo, ressaltaram que os hidrogramas gerados apresentaram tendência em superestimar as vazões observadas, o que é justificado pelo fato de o modelo simular vazões naturalizadas, ou seja, sem a influência de dispositivos de regularização, enquanto o que se verifica é a presença de diversos reservatórios de regularização na bacia do Seridó. Estes acumulam grandes volumes de água, de modo que os fluxos de água esperados na simulação não chegam a atingir a rede de drenagem, gerando a disparidade entre a vazão observada e a simulada.

Com intenção de investigar mais sobre o desempenho do MGB em rios intermitentes, Felix e Paz (2016) aplicaram o modelo na bacia hidrográfica do Rio Piancó localizado no semiárido paraibano. Para isso, a área de estudo foi definida para a região a montante do posto fluviométrico Piancó, por ser um local sem influência dos reservatórios localizados na porção alta da bacia. A calibração foi realizada para o período entre 1970 e 2011. Semelhante ao estudo de Negreiros e Medeiros (2017), o modelo conseguiu representar a sazonalidade da bacia e os processos hidrológicos referentes à transformação chuva-vazão. No entanto, houve algumas dificuldades na simulação dos rios intermitentes, algo esperado pelos autores, já que a modelagem de rios com essas características é bastante complexa.

Ao buscar por estudos que contemplem a modelagem hidrológica na região do semiárido brasileiro, é possível perceber duas principais dificuldades: (i) a limitação e falta de dados observados, problema comum no semiárido e com grande implicação em simulações

hidrológicas; e (ii) a modelagem da intermitência e do escoamento no semiárido, não apenas com o MGB, mas outros diversos modelos hidrológicos que apresentaram dificuldades semelhantes (Santos e Fontes, 2014; Felix e Paz, 2016; Sousa, Costa e Paula, 2017; Lima *et al.*, 2022).

Nesse sentido, pode-se ressaltar que o semiárido possui características peculiares que não são representadas adequadamente pela grande maioria dos modelos hidrológicos. Esses modelos reproduzem os processos de separação do escoamento no solo como expressões matemáticas de decaimento exponencial. Tal formulação matemática não é capaz de representar a intermitência dos corpos hídricos do semiárido.

Somado a isso, a capacidade de armazenamento do solo da região é muito baixa, em suas camadas superficiais por conta da alta evapotranspiração, e nas camadas inferiores devido à presença da formação geológica do Cristalino.

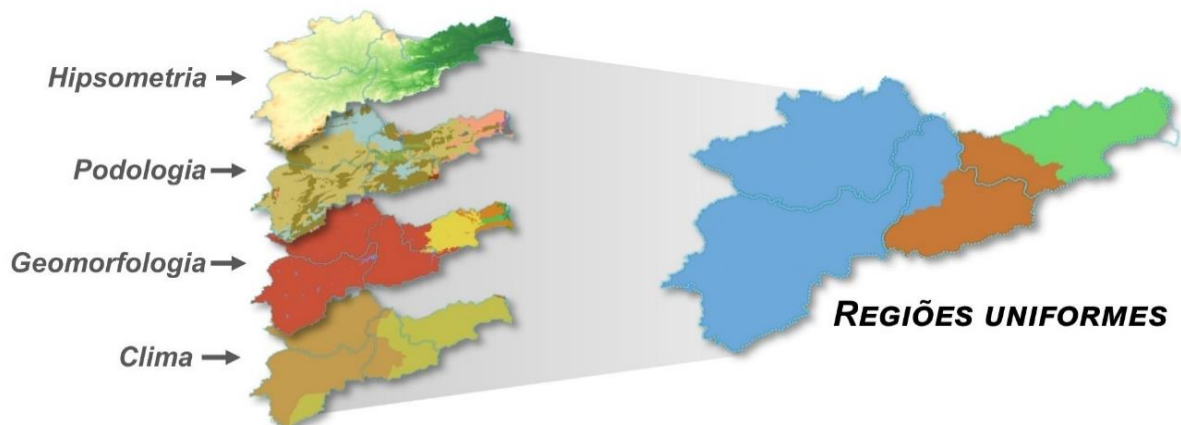
Portanto, não há um modelo que esteja completamente adaptado a representar satisfatoriamente este comportamento hidrológico. Entretanto, tendo ciência de tais limitações, os modelos hidrológicos ainda são a melhor ferramenta para estudos hidrológicos de regiões complexas, heterogêneas e pouco monitoradas.

4.2.4 MGB para o PRH-RPB

Ao observar as características físicas e climáticas da Bacia do Rio Paraíba, é possível identificar que há três regiões, mostradas na Figura 4.45, com características espacialmente semelhantes principalmente quanto a hipsometria, geomorfologia e clima: a primeira é composta pelas sub-bacias do Alto Paraíba e Taperoá; a segunda região compreende a porção mais baixa do Médio Paraíba e parte mais a montante do Baixo Paraíba; enquanto o restante do Baixo Paraíba compõe a terceira e última região.

Dessa forma, para as estimativas e análises da disponibilidade hídrica da bacia no âmbito do PRH-RPB, foi utilizado o Modelo de Grandes Bacias (MGB), que se trata de um modelo chuva-vazão com operação acoplada ao *software* de SIG *Quantum GIS* (QGIS) (Collischonn *et al.*, 2020), cuja síntese de sua metodologia é apresentada a seguir.

Figura 4.45 - Regiões com características uniformes da Bacia do Rio Paraíba



FONTE: Cobrape (2024).

O *plugin* e toda a documentação do MGB, tanto os manuais de referência teórica como de aplicação do modelo, estão disponibilizados na página *online* do Grupo de Pesquisa de Hidrologia de Grande Escala, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (HGE IPH/UFRGS¹).

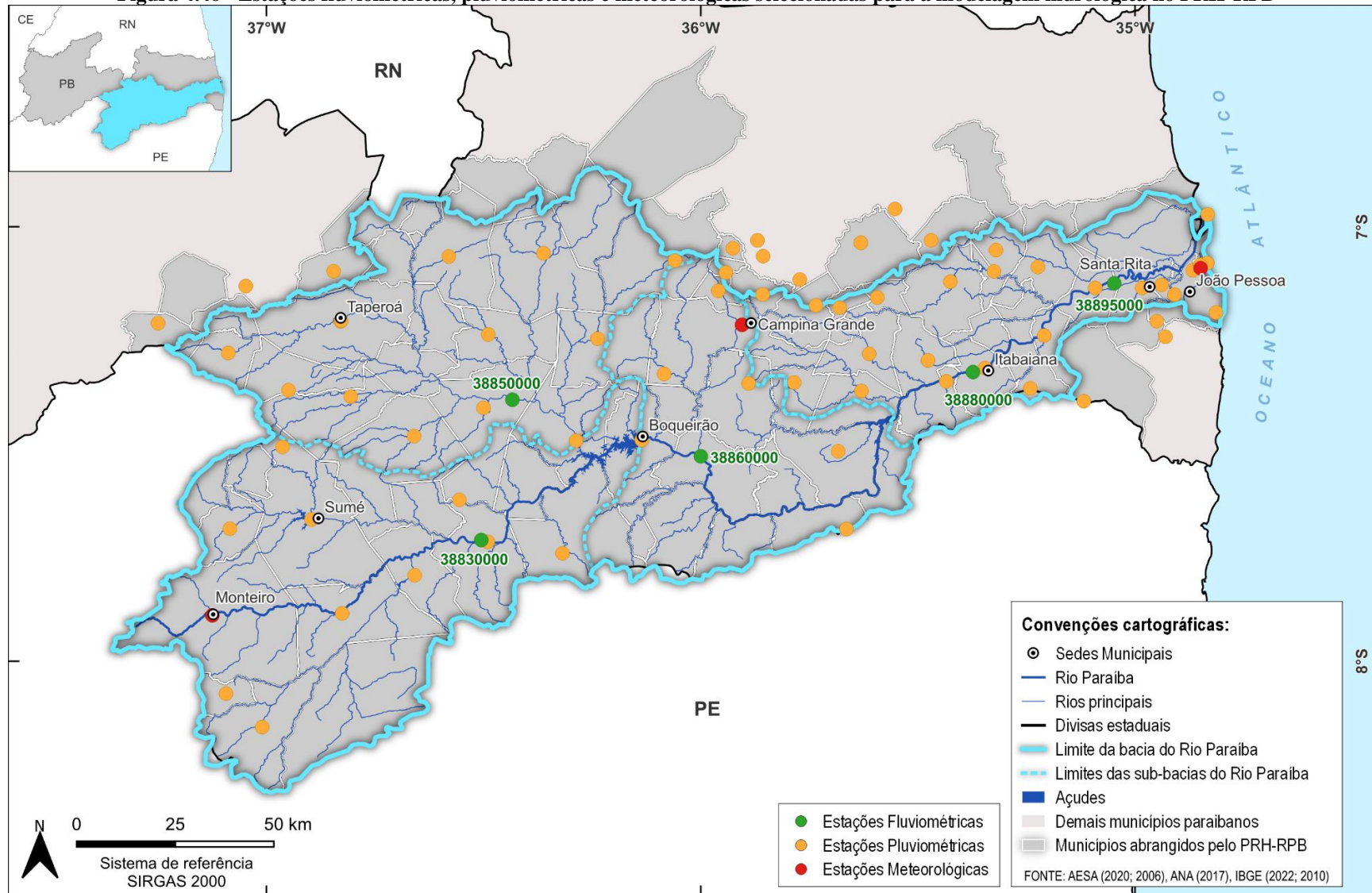
Primeiramente, para a utilização do modelo, é necessário o pré-processamento de informações espaciais para a obtenção dos dados que serão utilizados no modelo. No caso da Bacia do Rio Paraíba, esta etapa inicial foi realizada utilizando as seguintes bases de dados:

- Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017 5k (BHO 2017 5k), disponibilizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA, 2017), e que já vem sendo utilizada no PRH-RPB e se trata da unidade adotada para a análise de disponibilidade hídrica no presente estudo;
- As URHs foram obtidas a partir da ferramenta *Hydrological Landscape Classes (HLC) Generator* (Barbedo *et al.*, 2022), utilizando o *shapefile* de uso e ocupação do solo do Mapbiomas (2023), cuja análise já foi realizada e apresentada no RP-02; e o Modelo Digital de Elevação *Multi-Error-Removed Improved-Terrain (MERIT DEM)* 90m.

Ademais, foram utilizados os dados das 5 estações fluviométricas e das 70 estações pluviométricas selecionadas para as análises hidrológicas na bacia, conforme descrito no capítulo 4.1, bem como os dados das normais climatológicas das estações Campina Grande (00082795), João Pessoa (00082798) e Monteiro (00082792) do INMET (1992), disponíveis na base interna do MGB. A distribuição espacial das estações citadas pode ser verificada na Figura 4.46.

¹Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/mgb-iph/>>.

Figura 4.46 - Estações fluviométricas, pluviométricas e meteorológicas selecionadas para a modelagem hidrológica no PRH-RPB



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de ANA (2024).

Com isso, foi iniciado o processo de modelagem e calibração do modelo, tomando o período entre os anos de 1994 e 2019 como base, uma vez que compreende um número maior de estações com dados do período mais recente e com menor índice de falhas.

Ressalta-se que, uma vez que a disponibilidade hídrica é a parcela da vazão que pode ser utilizada pela sociedade para o seu desenvolvimento, sem comprometer o meio ambiente (Cruz e Tucci, 2008), seu conceito é caracterizado por uma vazão mínima tida como referência na gestão de recursos hídricos. Portanto, no caso da modelagem hidrológica com fins de estimativa de disponibilidade hídrica, o objetivo principal consiste na caracterização adequada de vazões com grande permanência, ou seja, vazões garantidas na maior parte do tempo. Dessa forma, a modelagem realizada no âmbito do PRH-RPB teve tal propósito e foco.

Com isso, o resultado da modelagem pode ser conferido no Anexo C do RP-03, onde estão apresentados os hidrogramas das vazões observadas nas estações fluviométricas selecionadas e das vazões simuladas para as ottobacias correspondentes, e as curvas de permanência das respectivas vazões observadas e simuladas. Destaca-se nas figuras que a escala vertical (vazão em m^3/s) está diferente entre as janelas de períodos apresentados.

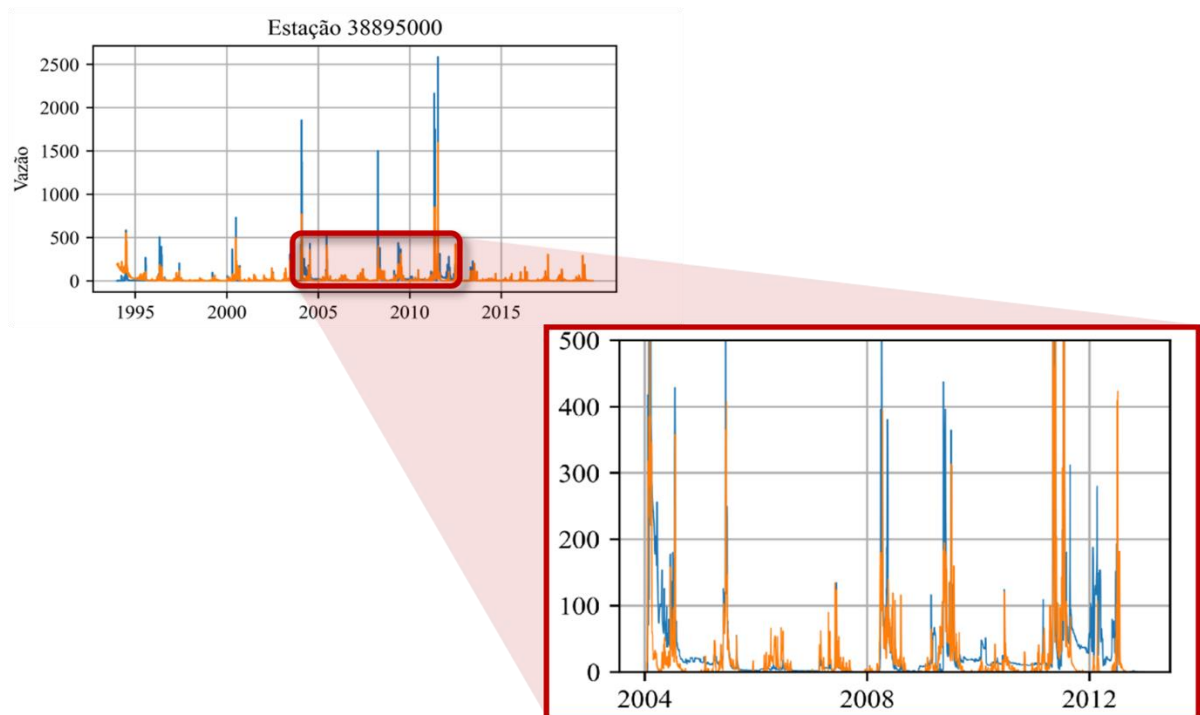
Como já comentado, é possível perceber, tanto nos hidrogramas como nas curvas de permanência, a dificuldade da modelagem hidrológica em rios intermitentes. Tal situação ocorre notavelmente na região das sub-bacias do Alto Paraíba (estação 38830000) e do Taperoá (estação 38850000), onde as vazões observadas são nulas em 66% e 84% do período de tempo observado.

A partir da sub-bacia do Médio Paraíba (estação 38860000), em que vazões nulas caem para cerca de 30%, os hidrogramas respondem melhor às precipitações, porém ainda com dificuldade de representação dos picos de vazões observados. Contudo, as curvas de vazões observadas e simuladas se aproximam, demonstrando uma maior adaptação da modelagem a partir de então.

Destaca-se, ainda, a curva de permanência da estação 38880000, já no Baixo Paraíba, que apresenta um comportamento que indica certa regularização das vazões, o que também fica mais evidente no destaque do hidrograma da estação 38895000, apresentado na Figura 4.47. Neste caso, as chuvas ocorridas em 2004 e 2008, mas principalmente em 2012, resultam em valores acima de zero por um período de tempo no hidrograma, demonstrando que os reservatórios a montante, provavelmente Acauã e Boqueirão, exerceram algum efeito de regularização nesse período.

Por fim, o MGB foi rodado para toda a Bacia do Rio Paraíba, de maneira que foram geradas séries de vazões simuladas para cada uma das ottobacias da região, o que permitiu que fossem calculadas as curvas de permanência dessas ottobacias. A seguir são apresentadas tais informações espacializadas.

Figura 4.47 - Destaque do hidrograma da estação 38895000, com comportamento de regularização de vazão (m³/s)



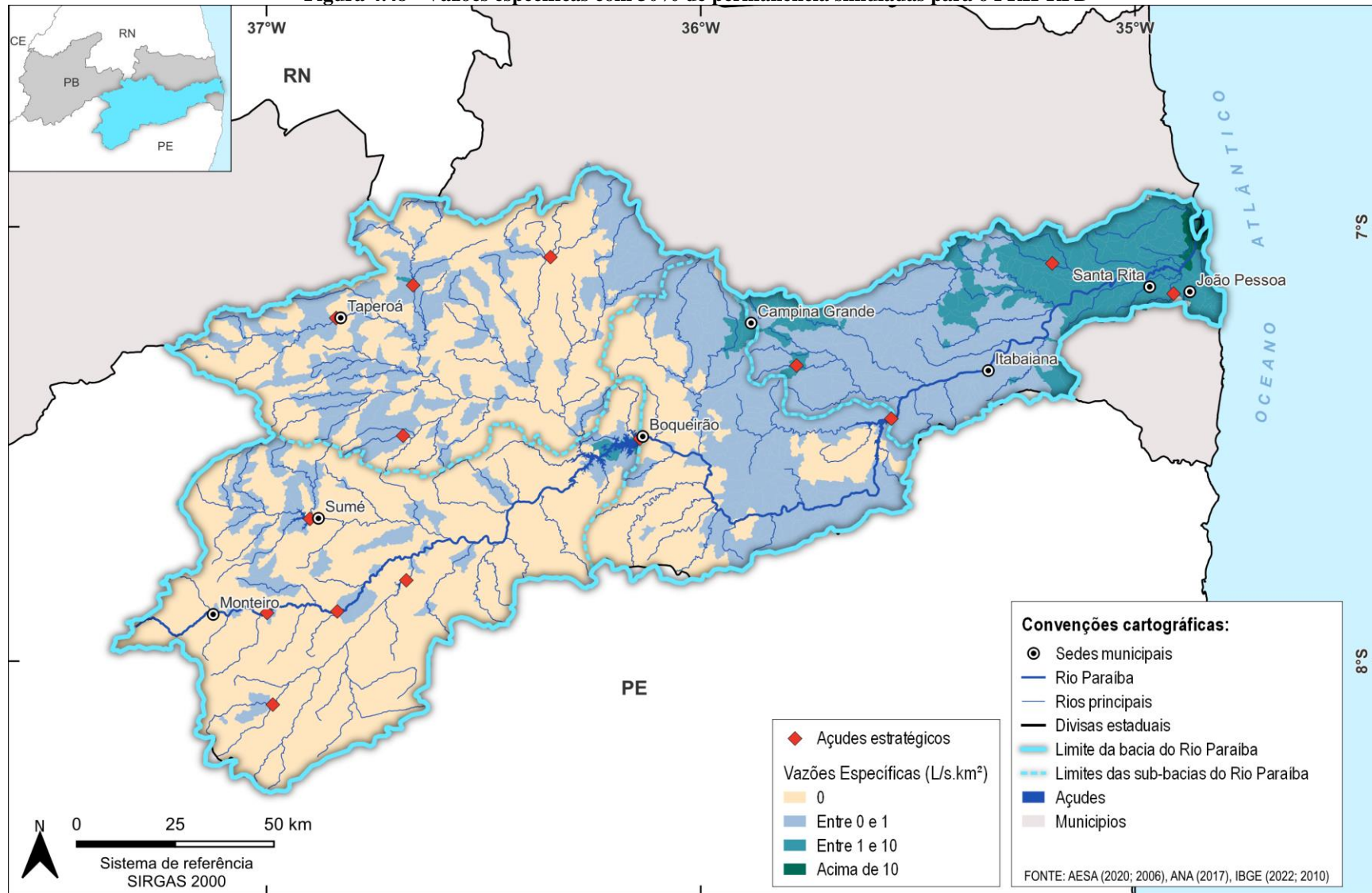
Fonte: Cobrape (2024).

Na Figura 4.48 são apresentadas as vazões específicas com 30% de permanência ($Q_{30\%}$), onde é possível identificar que uma significativa parte da porção oeste da bacia já apresenta vazões nulas, abrangendo principalmente as sub-bacias Taperoá e Alto Paraíba, e se estendendo com menor intensidade no Médio Paraíba. A partir da jusante do Médio Paraíba até as proximidades da sede de Santa Rita, a $Q_{30\%}$ é estimada, em média, em 30 L/s ou 2,3 L/s.km², sendo verificadas vazões em torno de 150 L/s apenas na proximidade da foz do Rio Paraíba, onde a $Q_{30\%}$ chega a 850 L/s, que corresponde a 34 L/s.km². A superfície de vazões específicas e as respectivas isolinhas com 30% de permanência podem ser visualizadas na Figura 4.51.

As vazões específicas com 50% de permanência ($Q_{50\%}$) podem ser observadas na Figura 4.49 e a superfície dessas vazões e as respectivas isolinhas na Figura 4.52, sendo identificadas vazões nulas até as proximidades do município de Itabaiana. A jusante deste município, a $Q_{50\%}$ fica em torno de 5 L/s ou 0,3 L/s.km², sendo o maior valor observado também na otobacia da foz do Rio Paraíba, de 340 L/s, que corresponde a 14 L/s.km².

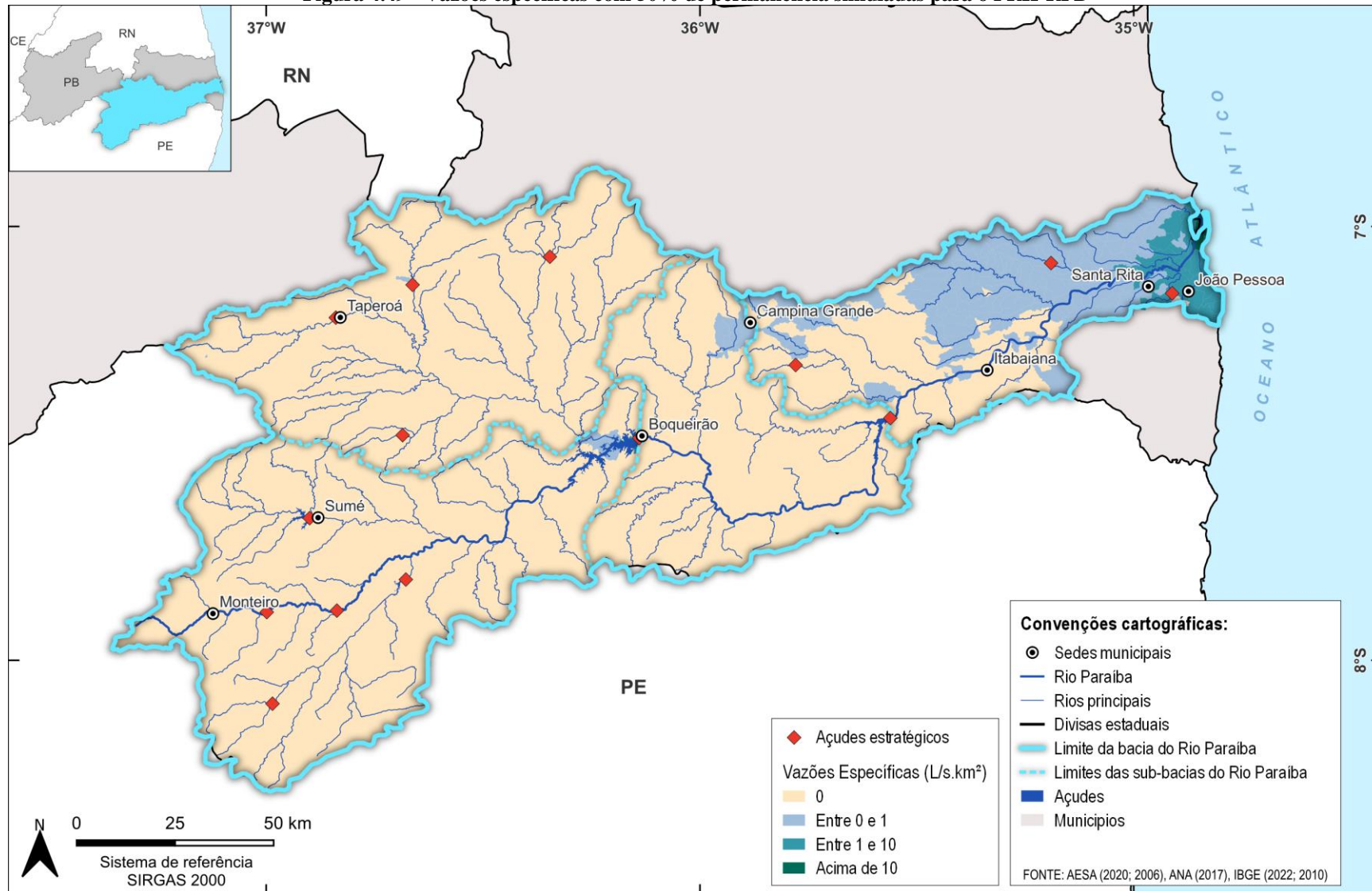
Por fim, são apresentadas as vazões específicas com 90% de permanência ($Q_{90\%}$) na Figura 4.50, ou seja, que são garantidas em 90% do período observado e que são os valores de referência para a disponibilidade hídrica propriamente dita. A superfície dessas vazões e as respectivas isolinhas podem ser visualizadas na Figura 4.53. Nessa permanência, praticamente a totalidade das vazões simuladas são nulas, com poucos trechos de rio com valores acima de zero, de modo que o maior valor estimado é 30 L/s ou 1,2 L/s.km², na foz.

Figura 4.48 - Vazões específicas com 30% de permanência simuladas para o PRH-RPB



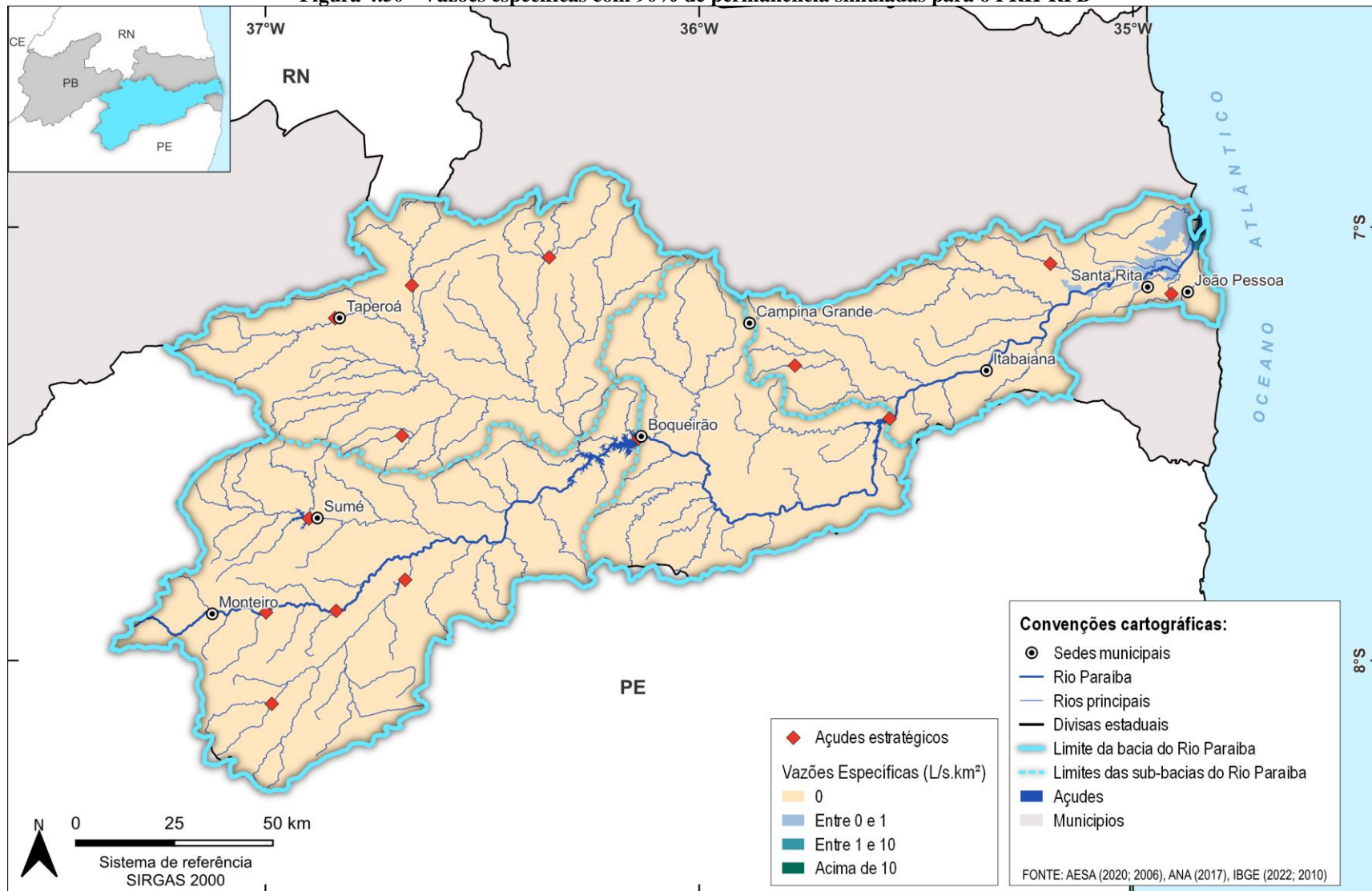
Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.49 - Vazões específicas com 50% de permanência simuladas para o PRH-RPB



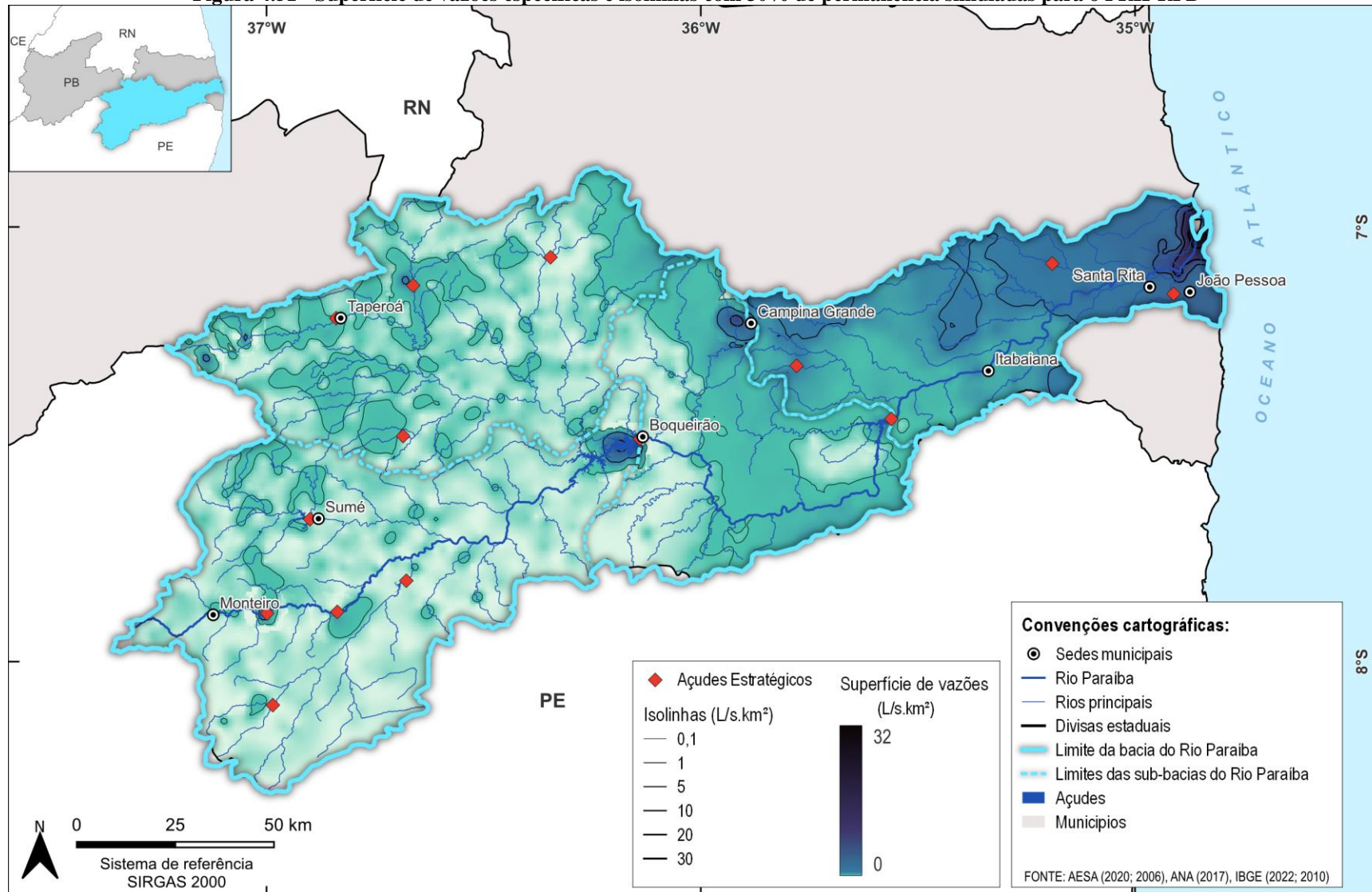
Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.50 - Vazões específicas com 90% de permanência simuladas para o PRH-RPB



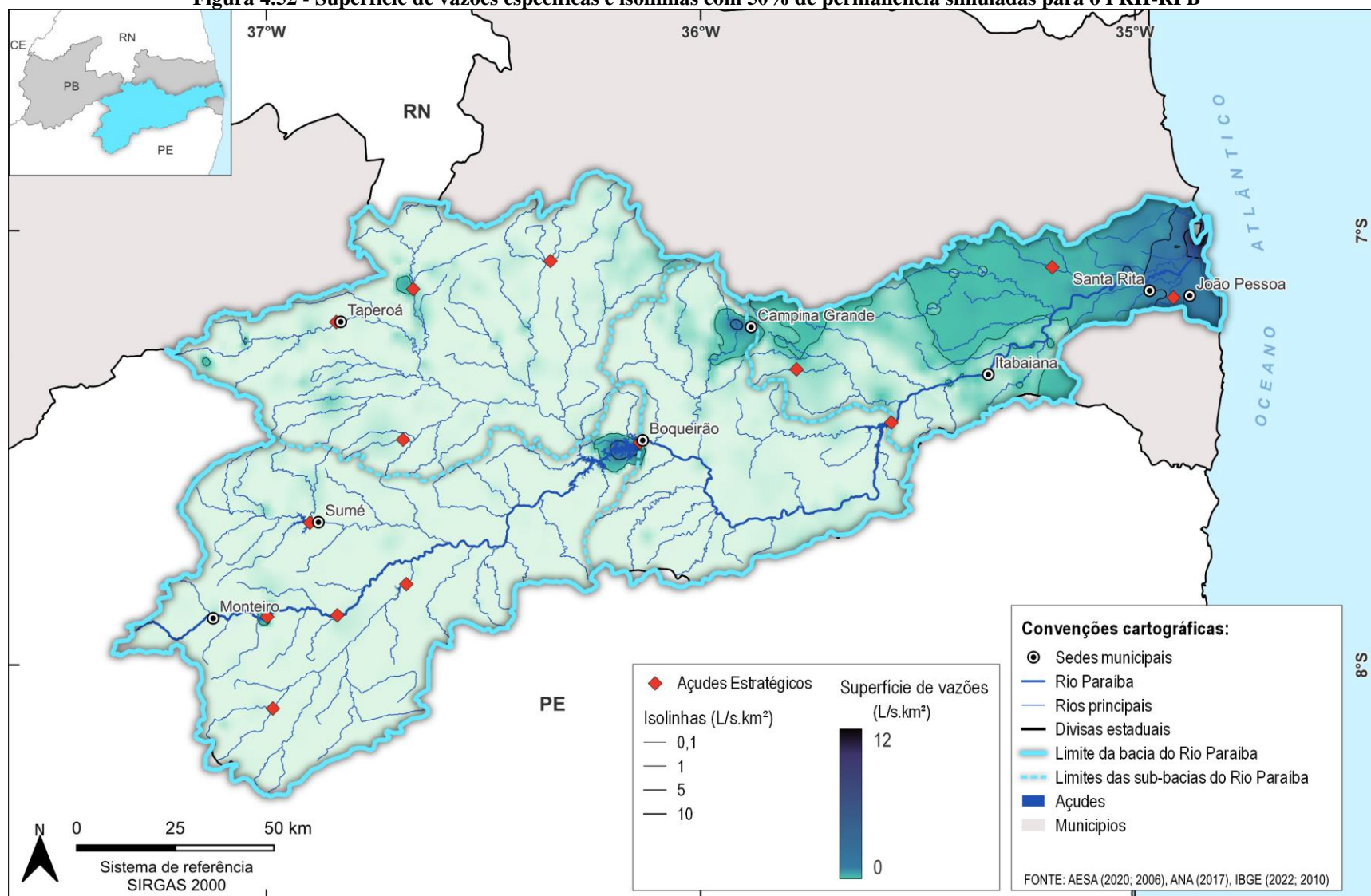
Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.51 - Superfície de vazões específicas e isolinhas com 30% de permanência simuladas para o PRH-RPB



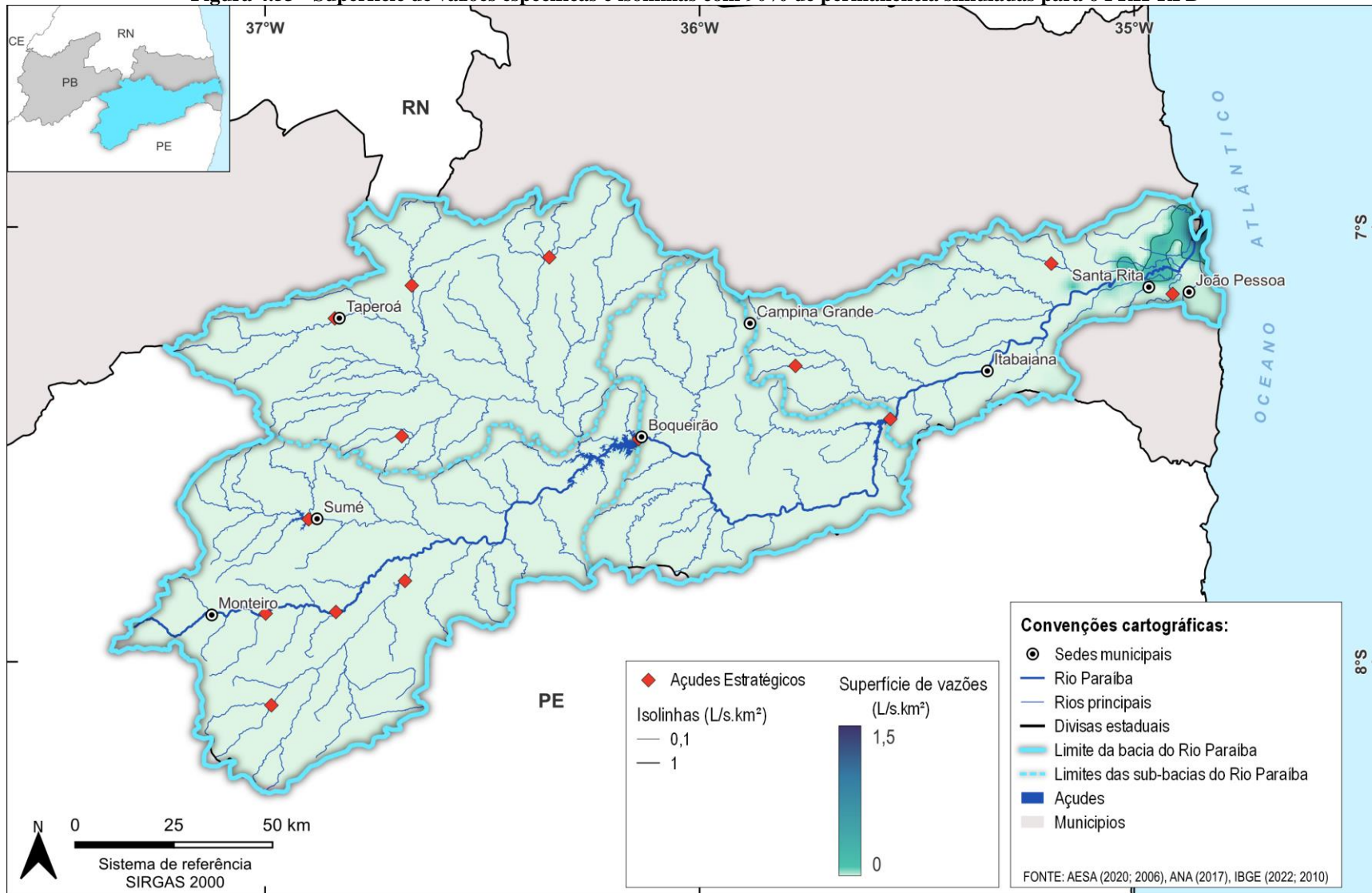
Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.52 - Superfície de vazões específicas e isolinhas com 50% de permanência simuladas para o PRH-RPB



Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.53 - Superfície de vazões específicas e isolinhas com 90% de permanência simuladas para o PRH-RPB



Fonte: Cobrape (2024).

Uma vez que o modelo utilizado simula vazões naturalizadas para a bacia, em seu processamento são consideradas as características naturais da região, sem a influência de infraestruturas hídricas que possam alterar seu comportamento hidrológico. Diante disso, os resultados da modelagem hidrológica para o PRH-RPB confirmam que a disponibilidade hídrica superficial da Bacia do Rio Paraíba está atrelada à capacidade artificial de armazenamento de seus reservatórios e açudes.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS

A seguir é apresentada a caracterização dos reservatórios localizados dentro da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, sendo primeiramente identificados os açudes considerados pelo PERH-PB na área do estudo, e posteriormente os reservatórios monitorados pela AESA, bem como caracterizados os açudes a serem considerados como estratégicos no âmbito do PRH-RPB.

4.3.1 Inventário dos Reservatórios do PERH-PB

Os reservatórios são estruturas projetadas para armazenar volumes de água, sendo formadas por meio da construção de barragens. Segundo informações da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA) e do Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba (PERH-PB), os reservatórios abrangidos pelo PRH-RPB são representados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Açudes por Sub-bacias

| Sub-bacia | Açudes | Município | Tipo |
|---------------|--------------------------------|----------------------------|-------------|
| Alto Paraíba | Bichinho | Barra de São Miguel | Estratégico |
| | Camalaú | Camalaú | Estratégico |
| | Campos | Caraúbas | Estratégico |
| | Cordeiro | Congo | Estratégico |
| | Epitácio Pessoa | Boqueirão | Estratégico |
| | Ouro Velho | Ouro Velho | Estratégico |
| | Pocinhos | Monteiro | Interanual |
| | Poções | Monteiro | Estratégico |
| | Prata II | Prata | Estratégico |
| | Santo Antônio | São Sebastião do Umbuzeiro | Estratégico |
| | Serrote | Monteiro | Estratégico |
| | Sumé | Sumé | Estratégico |
| | São Domingos | São Domingos do Cariri | Estratégico |
| | São José II | Monteiro | Estratégico |
| | São Paulo | Prata | Estratégico |
| | Curimatã | Caraúbas | Interanual |
| | Ipueira | Camalaú | Interanual |
| Juvêncio | Camalaú | Interanual | |
| Médio Paraíba | Acauã (Argemiro de Figueiredo) | Itatuba | Estratégico |
| | Milhã (Evaldo Gonçalves) | Puxinanã | Estratégico |
| | Riacho de Santo Antônio | Riacho de Santo Antônio | Estratégico |
| | Bodocongó | Campina Grande | Interanual |
| | Gangorra | Queimadas | Interanual |
| | Quixaba | Campina Grande | Interanual |
| | São Pedro | Campina Grande | Interanual |
| Baixo Paraíba | Chã dos Pereiras | Ingá | Estratégico |
| | Gavião | Fagundes | Estratégico |

| Sub-bacia | Açudes | Município | Tipo |
|-----------|---------------------------------|------------------------|-------------|
| | José Rodrigues | Campina Grande | Estratégico |
| | Marés | João Pessoa | Estratégico |
| | Olho d'Água | Mari | - |
| | São Salvador | Sapé | Estratégico |
| | Dos Reis | Cruz do Espírito Santo | Interanual |
| | Ipanema | Riachão do Poço | Interanual |
| | Itanhém | Sapé | Interanual |
| | Pacatuba | Cacimba de Dentro | Interanual |
| Taperoá | Coronel Jueca | Cacimbas | - |
| | Gurjão | Gurjão | Estratégico |
| | Jeremias | Desterro | Estratégico |
| | Lagoa do Meio | Taperoá | Interanual |
| | Livramento (Russos) | Gurjão | Estratégico |
| | Mucutu | Juazeirinho | Estratégico |
| | Namorado | São João do Cariri | Estratégico |
| | Olivedos | Olivedos | Estratégico |
| | Serra Branca I | Serra Branca | Estratégico |
| | Serra Branca II | Serra Branca | Estratégico |
| | Soledade | Soledade | Estratégico |
| | São José III | São José dos Cordeiros | - |
| | Taperoá II (Manoel Marcionílio) | Taperoá | Estratégico |
| | Lagoa de Cima | Serra Branca | Interanual |
| Salitre | Livramento | Interanual | |

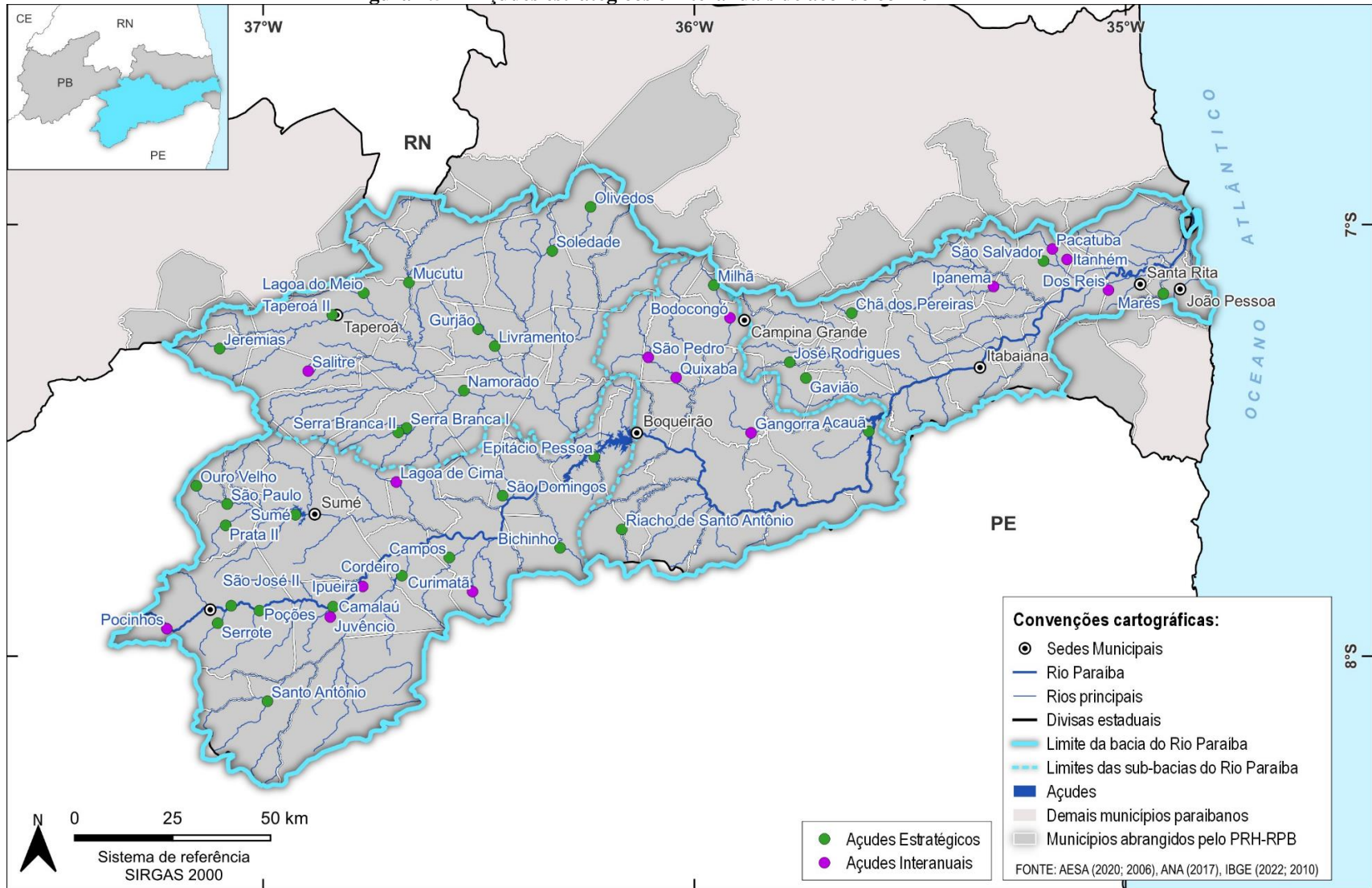
Fonte: PERH-PB (2022); AESA (2018).

O PERH-PB (2022) caracteriza os açudes estratégicos por uma capacidade de volume superior a 10 hm³, incluindo também aqueles com volumes menores que são utilizados por empresas de saneamento para o abastecimento, de modo que, para a região da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, constam 33 açudes considerados como estratégicos para o PERH-PB. Para esses reservatórios, as maiores capacidades de armazenamento na região são o Eptácio Pessoa, com mais de 400,00 hm³ e situado no município de Boqueirão, e o Acauã, localizado no município de Itatuba e com a capacidade superior a 250,00 hm³. O açude Milhã (Evaldo Gonçalves), localizado nos municípios de Puxinanã, destaca-se por sua menor capacidade de armazenamento, totalizando apenas 0,80 hm³.

O PERH-PB também inclui açudes não estratégicos, podendo alguns deles serem caracterizados como açudes interanuais. No entanto, devido à complexidade na dinâmica de armazenamento, a operação desses açudes torna-se complexa (ALEXANDRE; FILHO; CAMPOS, 2013). A maioria dos açudes não estratégicos são interanuais, com exceção dos açudes Olho d'Água, Coronel Jueca e São José III, que, de acordo com os dados da AESA, não estão classificados como estratégicos ou interanuais.

Ademais, a localização dos reservatórios estratégicos e interanuais na Bacia do Rio Paraíba pode ser observada na Figura 4.54.

Figura 4.54 - Açudes estratégicos e interanuais de acordo com o PERH-PB



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de AESA (2018).

4.3.2 Reservatórios Monitorados pela AESA

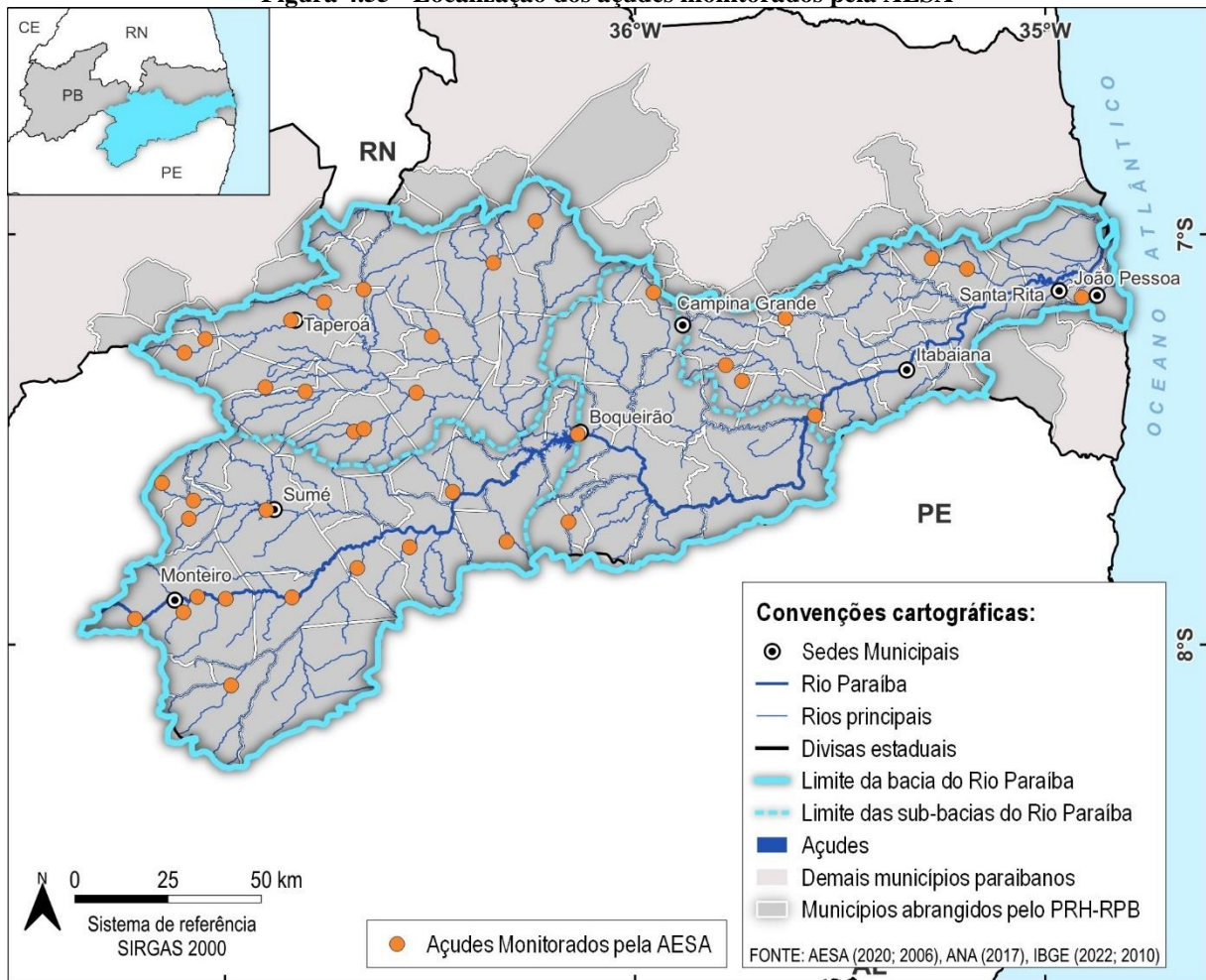
A AESA apresenta os açudes paraibanos monitorados pela mesma em seu portal *online*, totalizando 135 reservatórios, sendo que 37 estão localizados dentro dos limites da Bacia do Rio Paraíba. O portal apresenta dados de capacidade máxima do açude e registros atualizados de volume atual para cada reservatório. Os açudes Epitácio Pessoa e Acauã são os maiores reservatórios em capacidade da região do PRH-RPB, e ocupam o terceiro e quinto lugar no âmbito estadual, respectivamente. Os açudes monitorados pela AESA são apresentados na Tabela 4.14 e estão representados espacialmente na Figura 4.55.

Tabela 4.14 - Açudes monitorados pela AESA

| Sub-bacia | Açudes | Município |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Alto Paraíba | Bichinho | Barra de São Miguel |
| | Camalaú | Camalaú |
| | Campos | Caraúbas |
| | Cordeiro | Congo |
| | Epitácio Pessoa | Boqueirão |
| | Pocinhos | Monteiro |
| | Poções | Monteiro |
| | Prata II | Prata |
| | Ouro Velho | Ouro Velho |
| | Santo Antônio | São Sebastião do Umbuzeiro |
| | São Domingos | São Domingos do Cariri |
| | São José II | Monteiro |
| | São Paulo | Prata |
| | Serrote | Monteiro |
| Sumé | Sumé | |
| Médio Paraíba | Acauã (Argemiro de Figueiredo) | Itatuba |
| | Milhã (Evaldo Gonçalves) | Puxinanã |
| | Riacho de Santo Antônio | Riacho de Santo Antônio |
| Baixo Paraíba | Chã dos Pereiras | Ingá |
| | Gavião | Fagundes |
| | José Rodrigues | Campina Grande |
| | Marés | João Pessoa |
| | Olho d'Água | Mari |
| | São Salvador | Sapé |
| | Coronel Jueca | Cacimbas |
| Taperoá | Gurjão | Gurjão |
| | Jeremias | Desterro |
| | Lagoa do Meio | Taperoá |
| | Livramento (Russos) | Gurjão |
| | Mucutu | Juazeirinho |
| | Namorado | São João do Cariri |
| | Olivedos | Olivedos |
| | São José III | São José dos Cordeiros |
| | Serra Branca I | Serra Branca |
| | Serra Branca II | Serra Branca |
| | Soledade | Soledade |
| Taperoá II (Manoel Marcionilo) | Taperoá | |

Fonte: AESA (2024)

Figura 4.55 - Localização dos açudes monitorados pela AESA



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de AESA (2024).

4.3.3 Reservatórios Estratégicos para o PRH-RPB

Dentro do contexto do PRH-RPB, foram considerados como açudes estratégicos aqueles com capacidade de volume superior a 10 hm³. Adicionalmente, o Açude Marés foi também incluído como estratégico em virtude da outorga de usos neste açude para o sistema integrado que compõe o sistema de abastecimento de João Pessoa, onde se concentra o maior contingente populacional do estado.

Dessa forma, totalizou-se 13 açudes com capacidades maiores que 10 hm³, além do açude de Marés, totalizando 14 açudes classificados como estratégicos para os estudos do PRH-RPB, os quais estão detalhados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Reservatórios estratégicos no âmbito do PRH-RPB

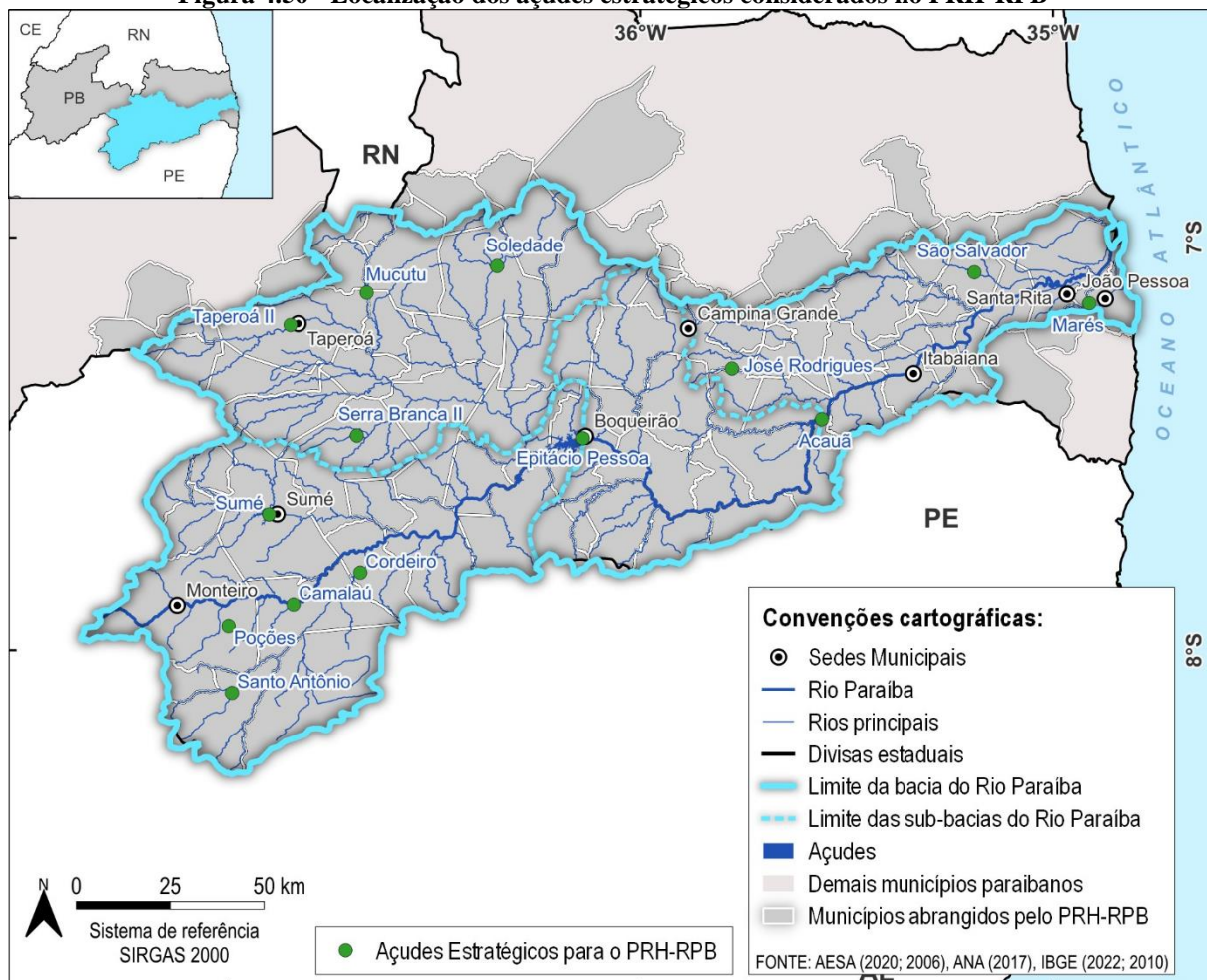
| Sub-bacia | Açudes | Município | Capacidade Máxima (hm ³) | Volume Morto (hm ³) |
|--------------|-----------------|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Alto Paraíba | Camalaú | Camalaú | 46,44 | 2,32 |
| | Cordeiro | Congo | 69,97 | 1,53 |
| | Epitácio Pessoa | Boqueirão | 466,53 | 28,24 |
| | Poções | Monteiro | 29,86 | 0,58 |
| | Santo Antônio | São Sebastião do Umbuzeiro | 24,42 | 0,49 |
| | Sumé | Sumé | 44,86 | 0,19 |

| Sub-bacia | Açudes | Município | Capacidade Máxima (hm ³) | Volume Morto (hm ³) |
|---------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Médio Paraíba | Acauã (Argemiro de Figueiredo) | Itatuba | 253,14 | 14,5 |
| Baixo Paraíba | José Rodrigues | Campina Grande | 22,33 | 2,23 |
| | Marés | João Pessoa | 2,14 | 0,04 |
| | São Salvador | Sapé | 12,66 | 0,63 |
| Taperoá | Mucutu | Juazeirinho | 25,37 | 0,49 |
| | Serra Branca II | Serra Branca | 14,04 | 0,93 |
| | Soledade | Soledade | 27,06 | 3,52 |
| | Taperoá II (Manoel Marcionilo) | Taperoá | 14,80 | 0,30 |

Fonte: AESA (2024).

A Secretaria da Infraestrutura e dos Recursos Hídricos é a responsável pela implantação da maioria dos açudes estratégicos, enquanto o órgão fiscalizador para todos os açudes citados na Tabela 4.15 é a AESA. Na Figura 4.56 estão representados espacialmente os açudes estratégicos considerados no âmbito do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba.

Figura 4.56 - Localização dos açudes estratégicos considerados no PRH-RPB



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de AESA (2024).

Segundo o relatório de Reservatórios do Semiárido Brasileiro, da ANA (2017), destaca-se os Açudes Epitácio Pessoa e Acauã, os quais desempenham um papel fundamental atendendo

aproximadamente 80% das demandas da região, com volumes totais registrados de 288,71 e 179,53 hm³, respectivamente (AESAs, 2024).

A AESA disponibiliza, em seu portal *online*, dados mais recentes sobre os volumes dos açudes, classificando-os quanto à situação destes conforme o volume total, ou seja, o volume atual ocupado em relação ao volume máximo. Assim, se os reservatórios estiverem acima da capacidade máxima, são classificados como sangrando, aqueles com menos de 20% do volume total são considerados em situação que necessita de observação, e os reservatórios com menos de 5% estão em situação crítica. A Tabela 4.16 apresenta os volumes atuais e totais dos açudes estratégicos do PRH-RPB, além da classificação da situação dos reservatórios na data do último registro disponibilizado no momento de elaboração deste relatório.

Tabela 4.16 - Volumes atuais e situação dos reservatórios estratégicos do PRH-RPB em maio/2024

| Sub-bacia | Açudes | Volume Atual (hm ³) | Volume Total (%) | Situação |
|---------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------|
| Alto Paraíba | Camalaú | 46,14 | 99,36 | Em normalidade |
| | Cordeiro | 48,36 | 69,12 | Em normalidade |
| | Epitácio Pessoa | 288,71 | 61,89 | Em normalidade |
| | Poções | 30,48 | 102,07 | Sangrando |
| | Santo Antônio | 8,73 | 35,73 | Em normalidade |
| | Sumé | 3,92 | 8,74 | Em observação |
| Médio Paraíba | Acauã (Argemiro de Figueiredo) | 179,53 | 70,92 | Em normalidade |
| Baixo Paraíba | José Rodrigues | 4,42 | 19,78 | Em observação |
| | Marés | 1,85 | 86,38 | Em normalidade |
| | São Salvador | 12,37 | 97,7 | Em normalidade |
| Taperoá | Mucutu | 10,11 | 39,85 | Em normalidade |
| | Serra Branca II | 2,52 | 17,91 | Em observação |
| | Soledade | 3,13 | 11,56 | Em observação |
| | Taperoá II (Manoel Marcionilo) | 0,55 | 3,68 | Em situação crítica |

Fonte: AESA (2024).

Nesse contexto, os açudes Camalaú (99,36%) e o de São Salvador (97,7%) se encontram praticamente cheios, próximos de suas capacidades máximas. Além disso, destaca-se o açude de Poções, que possui um volume atual maior do que sua capacidade máxima, sendo classificado como sangrando. Os reservatórios com necessidade de observação (que estão com menos de 20% do volume máximo) são os de Sumé, José Rodrigues, Serra Branca II e Soledade. Nota-se que a maior parte dos reservatórios com necessidade de observação estão localizados na sub-bacia do Taperoá, incluindo o açude Taperoá II, tido como estratégico para este PRH-RPB, classificado atualmente em situação crítica.

4.3.3.1 Dados de Volume

A AESA disponibiliza, em seu portal *online*, dados de série histórica dos volumes dos açudes monitorados. Esta análise possibilita compreender o comportamento hidrológico dos reservatórios para auxiliar no planejamento e gestão dos recursos hídricos, incluindo a distribuição de água para consumo humano, agricultura e outros tipos de uso da água, além de auxiliar nos estudos de eventos extremos, como cheias e secas.

Para os reservatórios estratégicos localizados no Alto Paraíba, apresentados na Figura 4.57, destaca-se o Açude Epitácio Pessoa que possui os dados de volume mais elevados entre os

reservatórios do PRH-RPB, os menores valores chegaram em 3% da capacidade máxima no ano de 2017, e os mais altos foram registrados entre os anos de 1967 e 1989, com aproximadamente 550 hm³ e que extrapolam a sua capacidade máxima. Além disso, nota-se que em 2004, 2009 e em 2020 são observados picos no volume do reservatório devido às fortes chuvas registradas nesses anos.

Na Região do Médio Curso do Rio Paraíba, o Açude Acauã é o único reservatório estratégico no âmbito do PRH-RPB. A média para o período entre 2002 e 2024 é de 118,6 hm³, tendo seu maior registro de 262,4 hm³ no ano de 2008, superando a capacidade total em 3,6%. Em contrapartida, o menor valor ocupou 3% da capacidade máxima e ocorreu no ano de 2018. Conforme pode-se observar na Figura 4.58, entre os anos de 2013 e 2022, o Açude Acauã registrou valores inferiores a 100 hm³ devido ao período de estiagem.

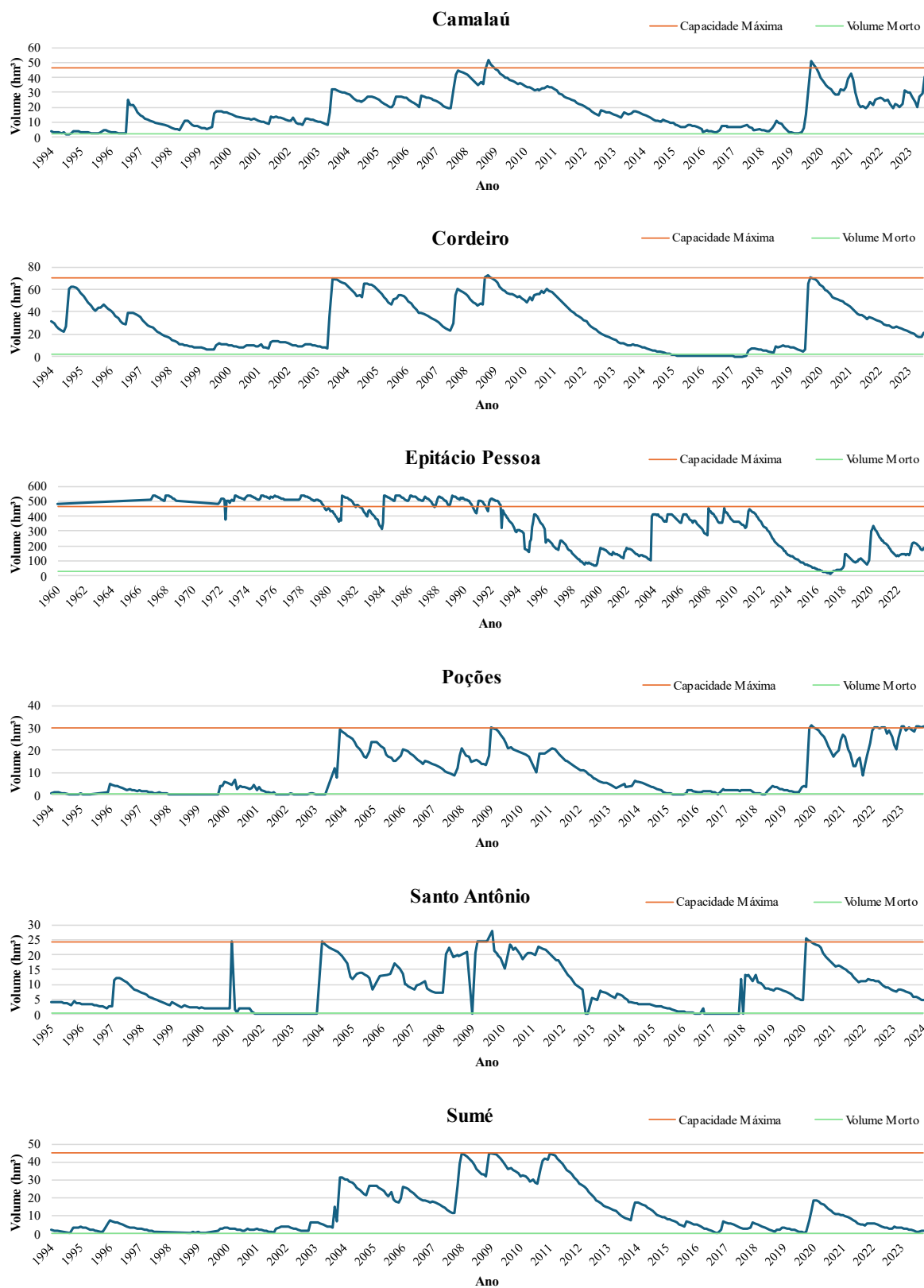
No Baixo Paraíba, o Açude José Rodrigues alcançou quase sua capacidade máxima no ano de 2011 com um volume de 21,5 hm³, mas desde então o volume total registrado no reservatório vem diminuindo, com registros no último ano que variam entre 3 e 4 hm³, equivalendo a menos de 20% da sua capacidade máxima.

De forma contrária, o Açude São Salvador não registrou valores muito baixos, com exceção dos anos de 1999 a 2000, que registraram valores inferiores à 5 hm³. O Açude Marés é o único reservatório analisado com capacidade inferior à 10 hm³, tendo seu volume médio registrado igual a 1,79 m³, valor bem próximo de sua capacidade máxima, e não tendo registrados valores menores que 1 hm³. Na Figura 4.59 estão representados os gráficos para os açudes no Baixo Paraíba.

A sub-bacia do Taperoá abrange o Açude Taperoá II, que é o único reservatório classificado em situação crítica. Entre os anos de 2013 e 2017, nota-se que a região teve um período prolongado de estiagem, sendo evidenciado em todos os reservatórios, com o volume armazenado se aproximando de zero. O Açude Soledade encontra-se com seu volume inferior ao volume morto praticamente o período inteiro entre 2014 e 2023.

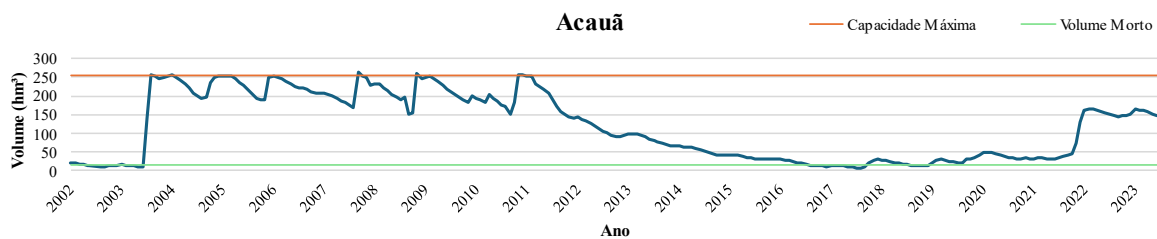
Assim como em outras regiões, em 2011 ocorreu um pico no volume devido às chuvas intensas que atingiram o estado paraibano, sendo que o Açude Mucutu ultrapassou a capacidade máxima do reservatório em cerca de 15.4%. Na Figura 4.60 são apresentadas as séries históricas de volume para os açudes da sub-bacia do Taperoá.

Figura 4.57 - Série histórica de volume dos reservatórios estratégicos do Alto Paraíba



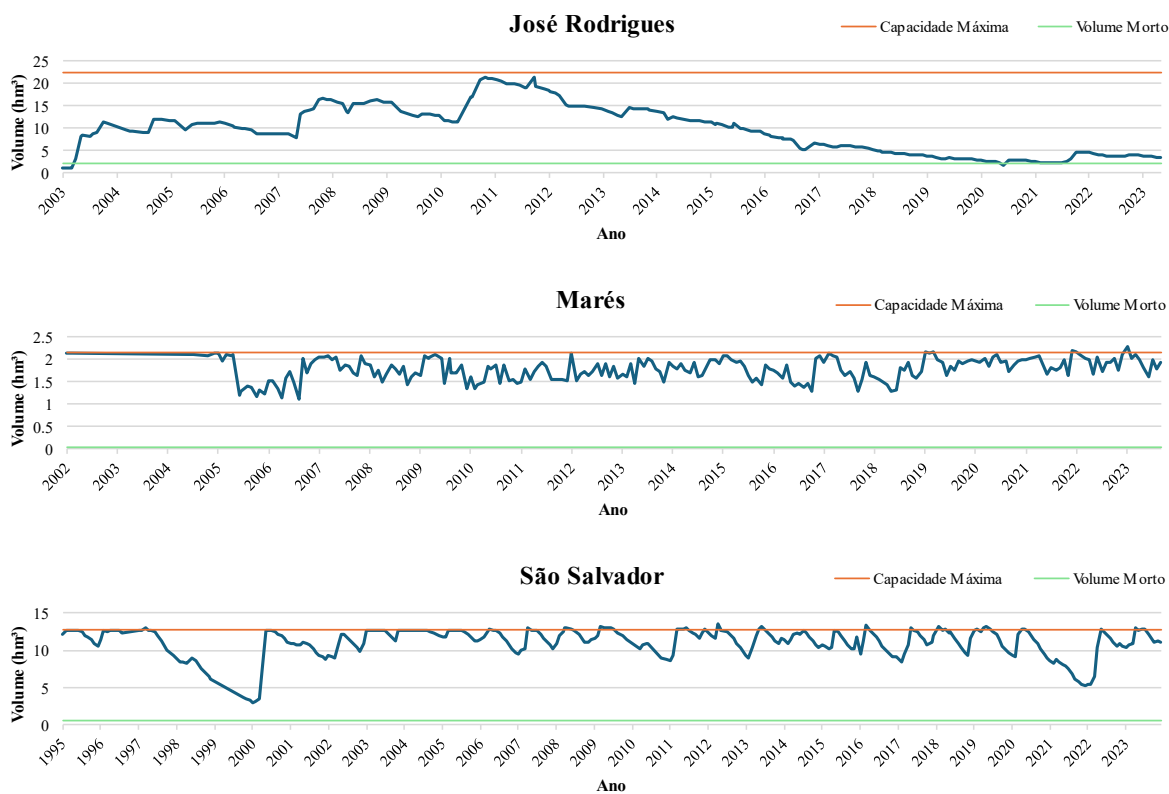
Fonte: AESA (2024).

Figura 4.58 - Série histórica de volume dos reservatórios estratégicos do Médio Paraíba em hm³



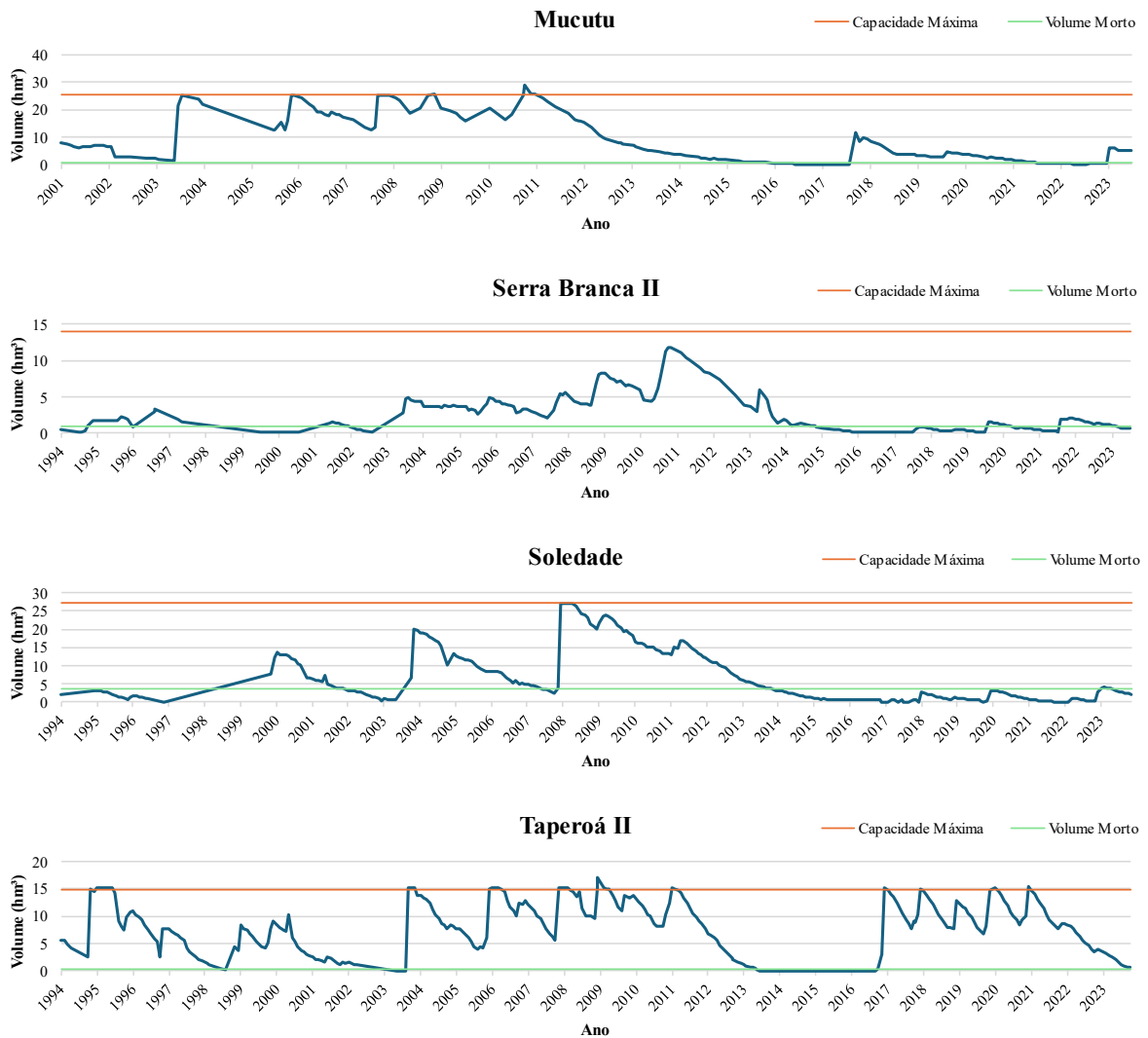
Fonte: AESA (2024).

Figura 4.59 - Série histórica de volume dos reservatórios estratégicos do Baixo Paraíba em hm³



Fonte: AESA (2024).

Figura 4.60 - Série histórica de volume dos reservatórios estratégicos da sub-bacia Taperoá em hm³



Fonte: AESA (2024).

Com exceção dos açudes de Marés e São Salvador no Baixo Paraíba, é possível perceber os efeitos da seca que acometeu o nordeste brasileiro a partir de 2011, considerada a mais grave das últimas décadas (Zani, 2023; Marengo *et al.*, 2016).

Segundo Medeiros e Brito (2017), a mesorregião paraibana mais afetada foi a do Borborema, que abrange principalmente a sub-bacia do Médio Paraíba, onde se encontra o açude de Acauã. Na Figura 4.58, que mostra os volumes deste açude, fica evidente os reflexos da seca nessa região, mesmo já recebendo água do PISF em 2017 e 2018 ainda que em regime não regular (CBHSF/AGB, 2018), voltando a ter registro de volumes maiores apenas em 2022. Por fim, comportamento semelhante é observado nos açudes na sub-bacia do Taperoá, com volumes ainda muito baixos até 2023, sendo a exceção o açude Taperoá II.

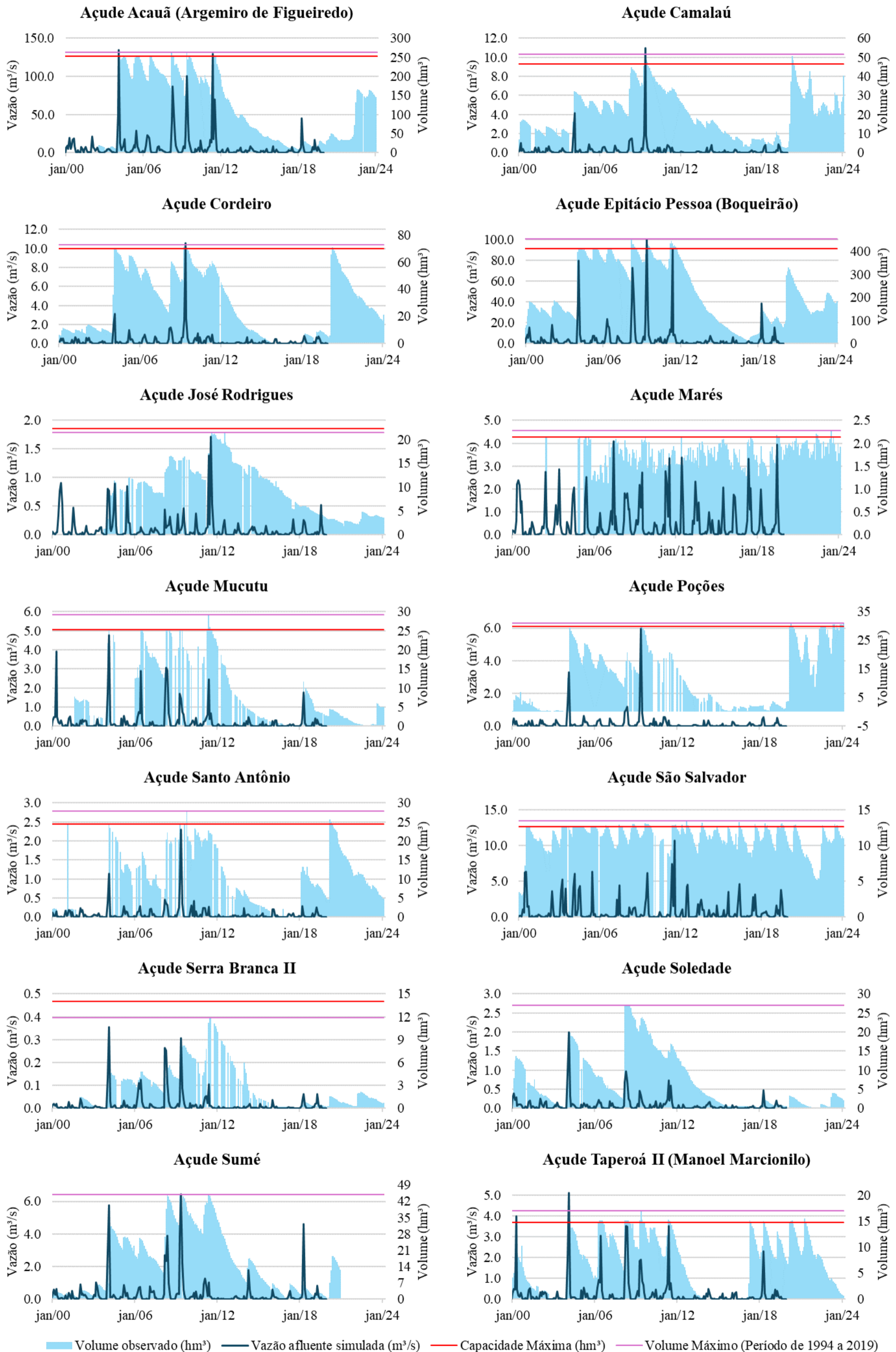
4.4 DISPONIBILIDADE HÍDRICA NOS AÇUDES ESTRATÉGICOS DO PRH-RPB

4.4.1 Análise das afluições simuladas e dos volumes registrados

A Figura 4.61 mostra a comparação dos volumes nos açudes estratégicos do PRH-RPB com a série pseudo-histórica de vazões afluentes geradas pelo modelo MGB. No mesmo gráfico, as retas horizontais na parte superior indicam a capacidade máxima do reservatório, relativa ao nível máximo normal e o volume máximo atingido no mesmo período.

O gráfico mostra que há compatibilidade entre as vazões simuladas e os volumes observados. Importante também observar que a ocorrência de uma severa estiagem no período simulado, entre 2011 e 2017 aproximadamente, confere representatividade à série gerada pelo modelo para a obtenção das disponibilidades hídricas. Caso a série gerada não contivesse um período de estiagem representativo, as disponibilidades hídricas poderiam ser estimadas de forma menos realista. Os gráficos para os todos os reservatórios, em maior tamanho, também podem ser encontrados no Anexo D do RP-03.

Figura 4.61 - Volumes observados e vazões afluentes simuladas



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com dados de AESA (2024).

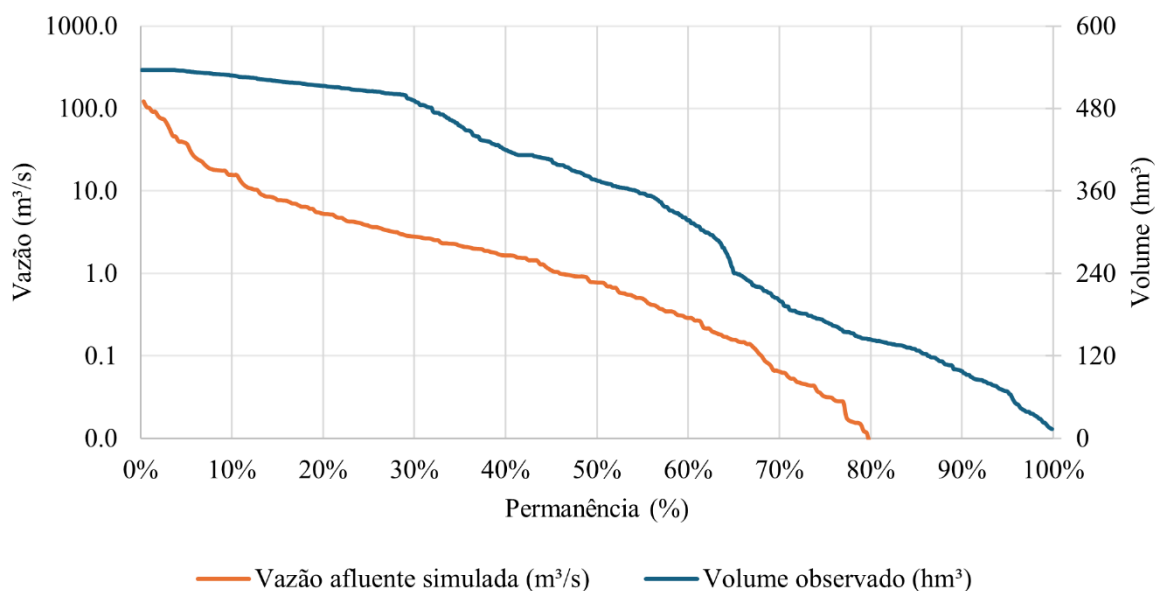
4.4.2 Análise da Permanência dos Volumes Observados

A Figura 5.47 mostra as curvas de permanência dos volumes observados e das vazões afluentes simuladas pelo modelo MGB, para o reservatório Epitácio Pessoa. Nota-se na figura que a forma da curva de permanência das vazões é compatível com as curvas de permanência das séries de vazões observadas nos postos fluviométricos (Figura 7.28) no trecho do Rio Paraíba considerado.

Nota-se no gráfico que as vazões mínimas são nulas a partir de 80% de permanência, enquanto a curva de permanência dos volumes mostra a função principal do reservatório, que é manter volumes de acumulação nas estiagens, como é observado no trecho inferior da curva.

Os gráficos para os demais reservatórios podem ser encontrados no Anexo D do RP-03.

Figura 4.62– Volumes observados e vazões afluentes simuladas - Açude Epitácio Pessoa



Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com dados de AESA (2024).

4.4.3 Estudo de Regularização de vazões para os Açudes Estratégicos

A regularização das vazões afluentes é a principal função de um reservatório. Isso permitirá com que os diferentes usos para os quais um reservatório é projetado sejam atendidos adequadamente. O termo regularizar vem da ideia de compensar os déficits, ou de “regular” a série de vazões afluentes. O hidrograma das vazões defluentes regularizadas é menos volátil que as vazões afluentes que estão chegando no reservatório. Esse efeito permite manter uma regularidade no fornecimento de água para os diversos usos do reservatório.

A quantidade de água que pode ser regularizada em um rio está condicionada a um limite superior denominado vazão máxima regularizável. A vazão máxima regularizável é igual à vazão média do rio no qual se deseja instalar o reservatório. Esta vazão média é conhecida como vazão média de longo termo, ou MLT. Em outras palavras, a capacidade máxima de

regularização de um reservatório, independentemente de onde ele for instalado, é igual à MLT do rio em questão.

Na prática, é impossível a construção de um reservatório que consiga fornecer uma vazão regularizada igual à MLT por tempo indefinido, devido ao fato de que o volume de reservatório necessário para a regularização de uma dada vazão se torna cada vez maior à medida que se aproxima da MLT. Esta característica é conhecida como “rendimento marginal decrescente” do reservatório, ou seja, para se conseguir um pequeno acréscimo na vazão regularizável os volumes necessários se tornam cada vez maiores, resultando em reservatórios excessivamente grandes e antieconômicos.

4.4.3.1 Diagrama de massa (Método de Rippl)

O diagrama de massa foi proposto pelo engenheiro austríaco W. Rippl, ainda no século XIX (Rippl, 1883). Trata-se de um método intuitivo, no qual se busca o maior déficit hídrico do histórico de aflúências disponível em um local. Em outras palavras, o histórico possui vários momentos de déficits hídricos; o volume útil do reservatório necessário para garantir uma dada vazão regularizável (também conhecida como vazão firme) será calculado com base no maior deles, o qual recebe o nome de máximo déficit acumulado.

No presente estudo foi aplicada a técnica da Análise Sequencial de Picos, muito similar ao método original e que produz o mesmo resultado. A diferença é que nessa técnica os superávits das diferenças acumuladas entre as vazões afluentes e a demanda são desconsiderados. A justificativa reside no fato de que, ao dimensionar um reservatório, o interesse está nas faltas de água e não nas sobras. Como consequência, o volume do reservatório pode ser inferido diretamente pelas diferenças acumuladas resultantes.

A análise sequencial de picos considera um volume inicial (V_0) nulo para o reservatório e a cada passo de tempo calcula o volume necessário para regularizar uma dada vazão a partir da equação:

$$V_t = \begin{cases} Q_f - Q_t + V_{t-1} & : \text{ se positivo} \\ 0 & : \text{ se negativo} \end{cases}$$

em que: V_0 é o volume inicial, V_t é o volume do reservatório em um instante t , Q_t é a vazão afluente no instante de tempo t , Q_f é a vazão regularizável (vazão firme) e Δt é o intervalo de tempo da série de vazões (mês, por exemplo).

O volume do reservatório (V_u) será dado pela equação:

$$V_u = \max(|V_t|) \cdot \Delta t$$

Por se assemelhar a um processo de simulação da operação de um reservatório, a análise sequencial de picos permite estabelecer os diferentes estados resultantes a cada novo intervalo de tempo. Tipicamente, considera-se que na transição de um intervalo a outro, o nível de água do reservatório pode ter subido ou descido (deplecionado); ainda, caso ele esteja em seu nível máximo, ele pode ter vertido (ou extravasado).

4.4.3.2 Curva de regularização

A curva de regularização é uma ferramenta muito útil para o projeto de um reservatório. A curva fornece todas as relações possíveis entre diferentes volumes úteis e suas respectivas vazões regularizadas no ponto em que se deseja construir o empreendimento.

Para montar a curva de regularização, são atribuídos diversos valores de vazões a serem regularizadas e calculados os volumes úteis respectivos a elas. Nesse ínterim, diz-se que a vazão que pode ser atendida por um volume útil determinado é a vazão firme ou regularizada.

O fato de a curva atender a todas as relações possíveis de volumes e vazões firmes em um local, decorre novamente da limitação superior da máxima vazão regularizável. Como visto anteriormente, esse valor limite é a própria vazão média de longo termo do local.

Matematicamente, trabalha-se com o índice de regularização (δ), o qual é definido pela equação:

$$\delta = \frac{Q_f}{\bar{Q}}$$

onde: Q_f é a vazão regularizável (vazão firme) e \bar{Q} é a vazão média de longo termo (MLT). Portanto, sabendo que a vazão firme não excede a vazão média de longo termo e não assume valores menores do que zero, conclui-se que os valores do índice de regularização variam entre zero e um. Ou seja, ao variar os valores de δ , pode-se estabelecer os diferentes volumes úteis para regularização parcial ($\delta < 1$) ou regularização total ($\delta = 1$) do reservatório.

4.4.3.3 Análise das curvas de regularização dos açudes estratégicos

As curvas de regularização dos 14 reservatórios estratégicos selecionados (aqueles com capacidades acima de 10 hm³) foram obtidas para índices de regularização de 10% a 100% da vazão média de longo termo da série de vazões afluentes ao local do açude., obtendo-se os volumes necessários para regularizar cada vazão firme hipotética. Os locais dos reservatórios podem ser vistos na Figura 4.56 do item 4.3.3.

As tabelas com os resultados e as curvas para os 14 açudes estão contidas no Anexo D do RP-03. A título de ilustração, a Tabela 4.17 e a Figura 4.63 mostram os resultados para o açude Epitácio Pessoa. No caso do açude em questão, a curva de regularização obtida indica que a capacidade máxima atual do reservatório (411,69 hm³) corresponde aproximadamente a um índice de regularização de 47%, ou seja, seria suficiente para a obtenção de uma vazão regularizável de aproximadamente 2,90 m³/s.

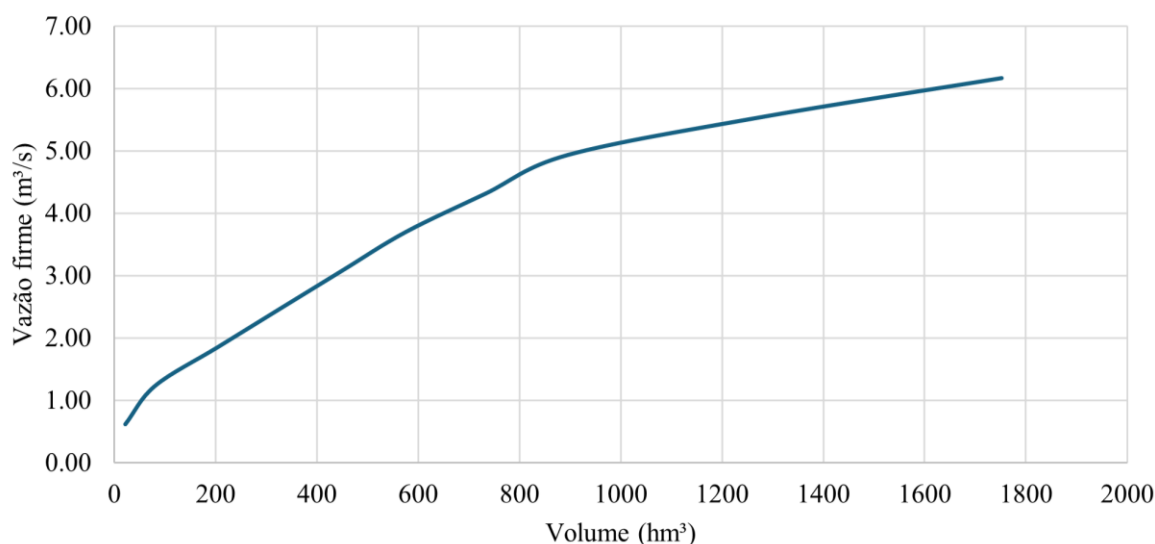
A limitação dessa análise advém de alguns fatores. A construção do reservatório acarreta uma maior perda por evaporação a partir da superfície líquida do lago artificial, em relação à taxa de evapotranspiração existente antes da sua construção. Essa diferença é denominada evaporação líquida, conforme exposto no item 4.1.3.3.

Dessa forma, as vazões firmes estimadas pela análise sequencial de picos não contêm esta estimativa de perdas por evaporação, as quais podem reduzir a disponibilidade hídrica em cada um dos reservatórios em questão.

Tabela 4.17 - Curva de regularização do açude Epitácio Pessoa

| Índice de regularização | Vazão firme (m ³ /s) | Volume (hm ³) |
|-------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 100% | 6,17 | 1752,32 |
| 90% | 5,55 | 1283,81 |
| 80% | 4,94 | 894,90 |
| 70% | 4,32 | 733,40 |
| 60% | 3,70 | 575,52 |
| 50% | 3,08 | 450,39 |
| 40% | 2,47 | 326,49 |
| 30% | 1,85 | 203,37 |
| 20% | 1,23 | 80,24 |
| 10% | 0,62 | 21,32 |

Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.63 - Curva de Regularização do Açude Epitácio Pessoa

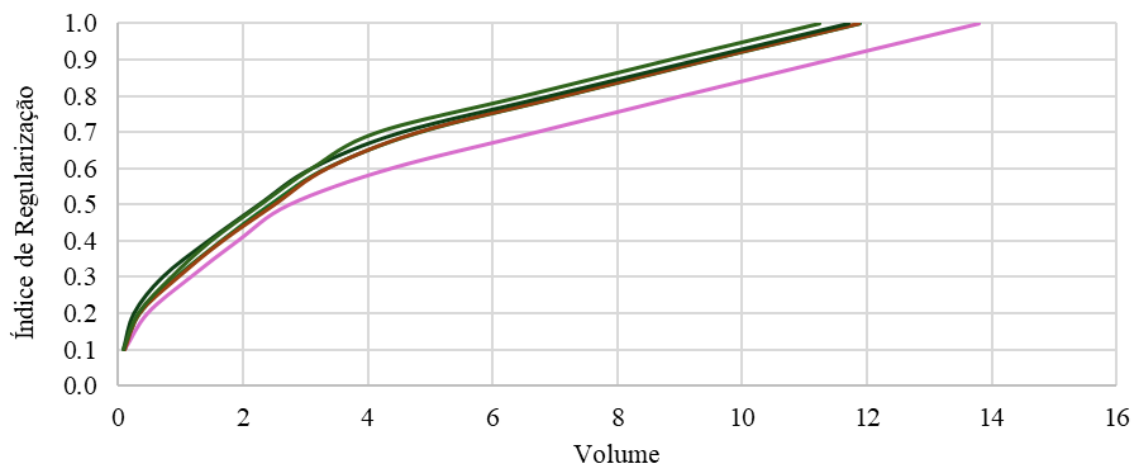
Fonte: Cobrape (2024).

Uma análise adicional foi realizada para permitir a comparação das curvas de regularização obtidas pela análise sequencial de picos. Esta comparação foi realizada por meio das curvas de regularização adimensionais, as quais são obtidas pela divisão das vazões firmes pela vazão média de longo termo do local em análise, resultando nos próprios índices de regularização (de 10% a 100%) e os volumes são adimensionalizados pela sua divisão pelo deflúvio anual médio (volume resultante da vazão média em um ano).

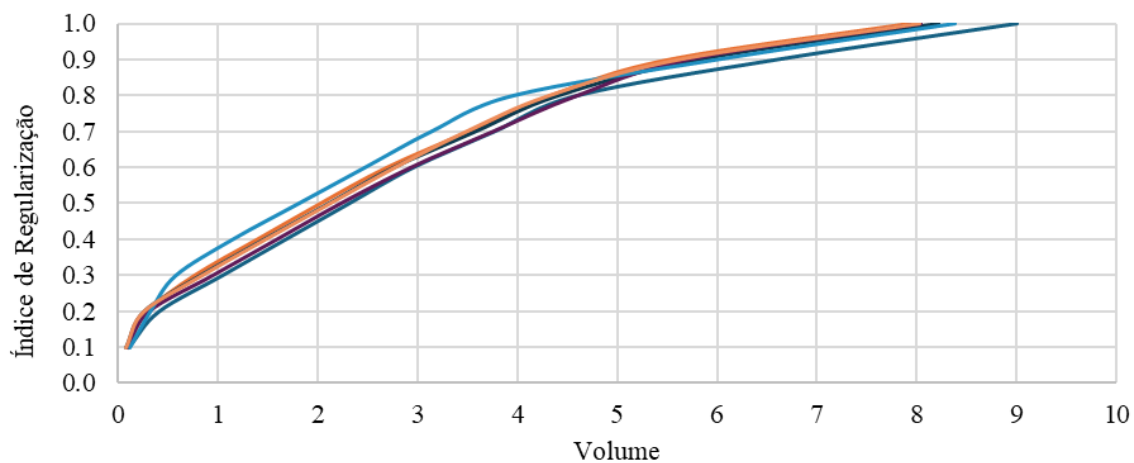
As curvas de regularização adimensionais são instrumentos que possibilitam a regionalização das curvas de regularização para locais prováveis de futuros reservatórios. Uma vez conhecida a vazão média estimada no local de interesse, é possível obter a curva de regularização do reservatório hipotético pela multiplicação do índice de regularização pela vazão média e os volumes pelo deflúvio anual médio do local.

Assim, foram obtidas e comparadas as curvas adimensionais para os açudes estratégicos, conforme mostra a Figura 4.64. As curvas foram agrupadas por similaridade, notando-se que grande parte das curvas mostram um padrão similar em relação a outros reservatórios.

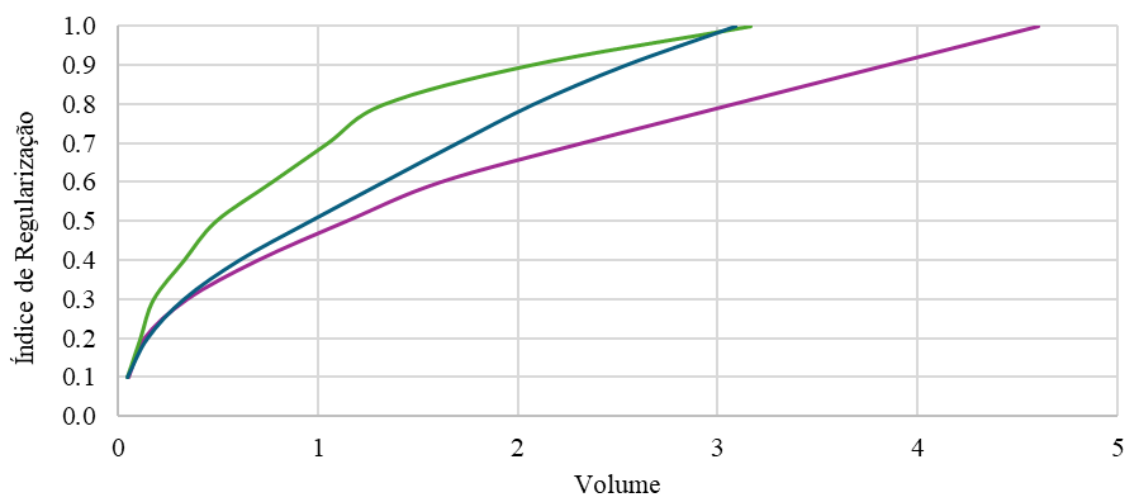
Figura 4.64 - Curvas de Regularização Adimensionais



— Açude Camalaú — Açude Cordeiro — Açude Poções
 — Açude Santo Antônio — Açude Soledade



— Açude Boqueirão — Açude Acauã — Açude Mucutu
 — Açude Serra Branca II — Açude Sumé — Açude Taperoá II



— Açude José Rodrigues — Açude Marés — Açude São Salvador

Fonte: Cobrape (2024).

4.4.3.4 Vazões regularizáveis associadas a garantias nos açudes estratégicos

Conforme descrito no item anterior, a análise sequencial de picos fornece uma estimativa de vazão regularizável baseada na simulação da série histórica do local, adotando a hipótese de que a série histórica seja representativa do comportamento hidrológico local. As análises foram realizadas a partir das vazões naturais geradas pelo modelo MGB, ou seja, vazões que não consideram a existência de reservatórios instalados na bacia.

O estudo Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação (ANA, 2017) estimou as vazões associadas a garantias em 12 reservatórios da bacia do Rio Paraíba. O estudo partiu da definição das séries de vazões naturais médias mensais afluentes aos reservatórios, a partir da aplicação do modelo MODHAC; e definiu vazões regularizáveis para de 70%, 80%, 90%, 95% e 99%, realizada mediante a resolução da equação do balanço hídrico, que contabiliza todas as afluições ou aportes aos reservatórios, bem como todas as retiradas ou eventuais vertimentos/evaporações.

O Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (PERH, 2022), adotou metodologia similar para traçar as curvas de garantia associadas a cada um dos açudes estratégicos no âmbito do PERH (2022). No PERH (2022) as séries de vazões naturais médias mensais afluentes aos reservatórios foram obtidas pela simulação com o modelo chuva-vazão SMAP.

A Tabela 4.18, para os açudes estratégicos do PRH-RPB, apresenta as vazões regularizáveis associadas a cada nível de garantia, de acordo com os estudos da ANA (2017) e o PERH (2022). Para a maior parte dos açudes, as vazões associadas a cada nível de garantia são menores no PERH (2022), em relação aos resultados da ANA (2017). A metodologia utilizada nos dois estudos é similar, mas as séries temporais utilizadas no estudo da ANA, não consideram o último período hidrológico crítico, de 2012 a 2017. Este período, entretanto, é considerado na série utilizada no PERH-PB (2022).

Tabela 4.18 - Vazões regularizáveis para garantias de 70% a 99% (m³/s)

| Açudes | ANA (2017) | | | | | PERH (2022) | | | | |
|------------------------|------------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|
| | 70% | 80% | 90% | 95% | 99% | 70% | 80% | 90% | 95% | 99% |
| Acauã | 4,28 | 3,92 | 3,33 | 2,76 | 1,50 | 2,90 | 2,57 | 2,18 | 1,92 | 1,65 |
| Camalaú | 0,59 | 0,47 | 0,36 | 0,29 | 0,24 | 0,36 | 0,29 | 0,22 | 0,19 | 0,13 |
| Cordeiro | 1,17 | 0,94 | 0,69 | 0,58 | 0,42 | 0,93 | 0,78 | 0,64 | 0,58 | 0,36 |
| Epitácio Pessoa | 5,25 | 4,32 | 3,44 | 2,92 | 2,57 | 3,44 | 2,95 | 2,53 | 2,16 | 1,88 |
| José Rodrigues | 0,21 | 0,18 | 0,14 | 0,12 | 0,10 | 0,14 | 0,12 | 0,10 | 0,07 | 0,05 |
| Marés | * | * | * | * | * | 0,13 | 0,11 | 0,09 | 0,07 | 0,05 |
| Mucutú | 0,38 | 0,30 | 0,23 | 0,18 | 0,13 | 0,17 | 0,14 | 0,11 | 0,09 | 0,06 |
| Poções | 0,59 | 0,46 | 0,33 | 0,27 | 0,20 | 0,18 | 0,13 | 0,09 | 0,07 | 0,04 |
| Santo Antônio | 0,20 | 0,15 | 0,11 | 0,09 | 0,06 | 0,35 | 0,28 | 0,20 | 0,16 | 0,12 |
| São Salvador | ** | ** | ** | ** | ** | 0,36 | 0,31 | 0,25 | 0,20 | 0,13 |
| Serra Branca II | * | * | * | * | * | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | ** |
| Soledade | 0,23 | 0,17 | 0,11 | 0,08 | 0,02 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,12 | 0,12 |

| Açudes | ANA (2017) | | | | | PERH (2022) | | | | |
|-------------------|------------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|
| | 70% | 80% | 90% | 95% | 99% | 70% | 80% | 90% | 95% | 99% |
| Sumé | 1,09 | 0,82 | 0,61 | 0,48 | 0,33 | 0,75 | 0,59 | 0,46 | 0,39 | 0,29 |
| Taperoá II | 0,35 | 0,27 | 0,19 | 0,14 | 0,10 | 0,58 | 0,48 | 0,33 | 0,23 | 0,12 |

* Este açude não foi considerado no estudo de ANA (2017).

** Este açude não tem capacidade de regularização associada à garantia de 70% ou mais.

Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de PERH-PB (2022) e ANA (2017).

Neste ponto, é importante destacar que a garantia de fornecimento de uma certa vazão regularizável depende de diversos fatores, tais como a aleatoriedade intrínseca das vazões, incluindo a possibilidade de não estacionariedade das séries hidrológicas causada pelas mudanças climáticas. Também têm influência a existência e cumprimento de regras de operação dos açudes, estado de manutenção dos reservatórios, por exemplo se há problemas de assoreamento, crescimento de vegetação, entre outros.

Portanto, as estimativas de garantias apresentadas pelos estudos da ANA (2017) e do PERH (2022) são importantes para a análise de uma faixa operativa de cada reservatório dentro de níveis de garantia satisfatórios. E as diferenças apresentada entre as garantias de um e outro estudo apontam para o impacto que a variabilidade climática e hidrológica tem sobre essas estimativas, sugerindo que as curvas de garantia devem ser permanentemente revisadas ao longo do tempo, de forma a incorporar diferentes cenários hidrológicos nas séries temporais utilizadas nas simulações.

No que compete ao PRH-RPB, as vazões firmes obtidas a partir do método da Análise Sequencial de Picos, para cada um dos reservatórios estratégicos definidos no âmbito do estudo, demonstrou coerência em relação aos valores obtidos pelos estudos da ANA (2017) e do PERH (2022) ao indicar que as vazões regularizáveis associadas às capacidades máximas dos reservatórios já construídos (vazão firme) se encontram em faixas de elevado nível de garantia.

A vazão firme associada à capacidade máxima, em volume, do açude Epitácio Pessoa é de 2,90 m³/s. Esta é a vazão regularizável pelo açude, que nas curvas de garantia fornecidas pela ANA (2017) ou pelo PERH (2022), estaria associada a uma garantia de aproximadamente 95%, como se pode inferir pela Tabela 4.18. O mesmo raciocínio pode ser aplicado para os demais reservatórios. Nesse sentido, a Tabela 4.19 apresentada as vazões firmes de cada um dos açudes estratégicos do PRH-RPB e as vazões associadas à garantia de 90%, estimadas pelos dois diferentes estudos já citados, o da ANA (2017), e o PERH-PB (2022).

Tabela 4.19 - Análise da garantia associada a capacidade máxima de armazenamento dos reservatórios estratégicos do PRH-RPB

| Açudes | Vazão firme PRH-RPB (L/s) | Vazão com garantia de 90% (L/s) | |
|-----------------|---------------------------|---------------------------------|-------------|
| | | ANA (2017) | PERH (2022) |
| Acauã | 2.851,8 | 3.330,0 | 2.175,7 |
| Camalaú | 256,6 | 360,0 | 224,2 |
| Cordeiro | 315,1 | 690,0 | 639,6 |
| Epitácio Pessoa | 2.891,8 | 3.440,0 | 2.530,1 |
| José Rodrigues | 97,0 | 140,0 | 96,5 |
| Marés | 115,8 | * | 86,5 |

| Açudes | Vazão firme PRH-RPB (L/s) | Vazão com garantia de 90% (L/s) | |
|-----------------|---------------------------|---------------------------------|-------------|
| | | ANA (2017) | PERH (2022) |
| Mucutú | 172,0 | 230,0 | 109,8 |
| Poções | 159,2 | 330,0 | 92,3 |
| Santo Antônio | 94,5 | 110,0 | 199,7 |
| São Salvador | 268,0 | * | 249,2 |
| Serra Branca II | 19,3 | ** | 4,5 |
| Soledade | 106,7 | 110,0 | 127,8 |
| Sumé | 301,5 | 610,0 | 463,9 |
| Taperoá II | 126,8 | 190,0 | 327,9 |

* Este açude não foi contemplado no estudo realizado por ANA (2017).

** Este açude não tem capacidade de regularização associada à garantia de 70% ou mais de acordo com ANA (2017)

Fonte: Elaborado por Cobrape (2024), com informações de PERH-PB (2022) e ANA (2017).

Da Tabela 4.19 é possível observar que as vazões obtidas pela aplicação do método da Análise Sequencial de Picos, estão muito próximas às vazões associadas a garantia de 90% obtidas pelos estudos da ANA (2017) e do PERH (2022) para a maior parte dos açudes. Os açudes que fogem a esta regra são os de Cordeiro, Santo Antônio, Sumé e Taperoá II. Para estes quatro açudes, como as vazões estimadas pelo PRH-RPB são menores, as garantias associadas acabam sendo próximas a de 99% (Tabela 4.18).

De acordo com a CAGEPA (2020), as reservas do açude Cordeiro sucumbiram a última estiagem de cinco anos, mesmo as demandas do sistema sendo bastante menores que a vazão regularizada pelo açude. A época, a garantia associada a vazão de regularização do açude estimada pelo Plano Estadual era de 100%. No mesmo relatório, a CAGEPA cita ainda o Açude Taperoá II (Manoel Marcionilo), uma vez que o açude não foi capaz de fornecer a vazão garantida conforme estabelecido no Plano Estadual (2006).

O Plano Estadual mais recente (PERH, 2022) atualizou estas curvas de garantia, já considerando o período crítico mais recente, que se deu a partir de 2012. Além disso, apresenta resultados coerentes com o estudo apresentado para os reservatórios do Semiárido apresentados pela ANA (2017), com vazões mais baixas associadas às garantias de operação do sistema, tendo em vista a incorporação da crise hídrica mais recente na série de dados observada. Por esta razão, tendo-se comparado as vazões firmes obtidas pelo presente estudo às vazões de garantias igual ou superior a 90%, o PRH-RPB decidiu seguir com estas vazões para fins de balanço hídrico entre disponibilidade e demandas hídricas no que concerne ao prosseguimento do estudo para a bacia do rio Paraíba.

Cabe destacar que esta decisão se respalda na concordância dos resultados obtidos com os apresentados pelo PERH (2022) e ANA (2017), apresentada na Tabela 4.19, que se utilizaram de modelos diferentes para a estimativa das séries pseudo-históricas de vazões afluentes aos açudes, bem como a diferentes períodos de dados analisados e convergem para uma estimativa semelhante.

4.4.4 Síntese da Estimativa da Disponibilidade Hídrica Superficial

A primeira avaliação a ser considerada em estudos de disponibilidade hídrica é a rede de monitoramento instalada, uma vez que os dados observados são as informações primordiais para que a modelagem hidrológica condiga com a realidade da bacia.

Assim, a análise da rede de monitoramento pluviométrico se demonstrou suficiente conforme os padrões da Organização Meteorológica Mundial (WMO, em inglês), em relação a quantidade de estações. Porém quando avaliada a quantidade de medições e período monitorado, foram identificadas falhas de períodos em diversas estações, prejudicando o diagnóstico mais preciso da precipitação na região.

Da mesma forma, quando analisada a quantidade de estações fluviométricas existentes, estas também são suficientes conforme os padrões de densidade de estações, mas poucas destas estão operantes, impactando diretamente nos resultados de modelagem hidrológica.

Contudo, a escassez de dados hidrológicos observados não é uma realidade apenas na região da bacia do Rio Paraíba, mas em todo o semiárido. Essa lacuna de informações é apresentada por diversos autores como uma das dificuldades da modelagem hidrológica na região, juntamente com a reprodução do regime intermitente dos corpos hídricos, acompanhados de elevados picos de vazão em estações chuvosas, o que é característico do semiárido.

Por esse motivo, foram levantados diversos estudos de modelagem hidrológica na região semiárida, bem como analisado os resultados e a aplicabilidade dos modelos empregados para subsidiar a escolha do modelo a ser adotado no âmbito do PRH-RPB. Diante dessa revisão bibliográfica, optou-se por utilizar o MGB, que já foi empregado para áreas similares a do estudo e com resultados satisfatórios.

Os resultados da modelagem hidrológica por trecho de rio demonstraram que já nas vazões específicas com 30% de permanência ($Q_{30\%}$) é identificada uma parte significativa da porção oeste da bacia com vazões nulas, abrangendo principalmente as sub-bacias Taperoá e Alto Paraíba. Essa área com rios de vazões nulas expande até as proximidades do município de Itabaiana quando observadas as vazões específicas com 50% de permanência ($Q_{50\%}$), e observada praticamente na totalidade da bacia quando avaliada as vazões específicas com 90% de permanência ($Q_{90\%}$), ou seja, as vazões que são garantidas em 90% do período observado e que são os valores de referência para a disponibilidade hídrica propriamente dita.

Tais resultados demonstram que a disponibilidade hídrica superficial da Bacia do Rio Paraíba está atrelada à capacidade artificial de armazenamento de seus reservatórios e açudes, uma vez que o modelo utilizado simula vazões naturalizadas para a bacia. Isso porque o MGB considera apenas as características naturais da região em seus processos, sem a influência de infraestruturas hídricas que possam alterar seu comportamento hidrológico.

Diante disso, também foram realizadas estimativas das disponibilidades hídricas provenientes dos açudes do PRH-RPB. Para tanto, a análise foi iniciada com a verificação das séries pseudo-históricas de vazões afluentes geradas pelo modelo MGB com o histórico de volumes registrados nos reservatórios, o que demonstrou haver compatibilidade e validou a modelagem.

A quantidade de água que pode ser regularizada pelos açudes é uma fração da vazão média de longo termo (MLT) do rio onde o açude está instalado, sendo proporcional ao máximo volume armazenável. Essa vazão é denominada vazão firme ou regularizada, supondo que essa vazão estará disponível 100% do tempo na saída do reservatório. Foram realizadas simulações, a partir das séries de vazões afluentes aos açudes geradas pelo modelo MGB, para diversas hipóteses de vazões firmes, obtendo-se os volumes necessários correspondentes. Assim foram construídas as curvas de regularização dos reservatórios, permitindo associar os volumes dos açudes às vazões firmes que estes podem oferecer hipoteticamente.

Por fim, as vazões firmes obtidas para cada um dos açudes estratégicos para o PRH-RPB foram comparadas com as vazões associadas à garantia de 90%, estimadas por dois diferentes estudos: “Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação”, da ANA (2017), e o PERH-PB (2022). As vazões resultaram em valores coerentes, mesmo com metodologias e o período de dados modelados diferentes.

Portanto, como os três resultados apontam para uma mesma grandeza, pode-se associar tais vazões firmes também à garantia de 90%, que consiste na disponibilidade hídrica dos açudes. Dessa forma, para os cálculos de balanço hídrico do PRH-RPB, a ser apresentado no *RP-04: Diagnóstico da Bacia*, serão utilizadas as vazões firmes aqui apresentadas.

4.5 ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA

Este item tem por finalidade caracterizar os domínios hidrogeológicos existentes na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, bem como seus subsistemas aquíferos, inserindo-os em seus respectivos contextos geológicos e geomorfológicos, bem como apresentar os cálculos finais das reservas ativas e disponibilidades hídricas subterrâneas, realizados como subsídio ao Plano de Recursos Hídricos do Estado da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, além de mapas técnicos de apoio, como o mapa de risco à contaminação das águas subterrâneas.

O Relatório de Planejamento das Ações (RP-01) apresentado já compreendeu a metodologia proposta e as técnicas de cálculo a serem utilizadas no projeto, desta forma, este relatório tem por objetivo a apresentação dos resultados obtidos e das condicionantes hidrogeológicas que balizaram o estudo.

4.5.1 Introdução metodológica

Este tópico, além de caracterizar os ambientes hidrogeológicos hospedeiros, tem por objetivo o detalhamento da metodologia utilizada para o cálculo das reservas hídricas subterrâneas - com destaque para a sua parcela renovável ou ativa, que é considerada por muitos estudos como a mais adequada e de rápida resposta para a gestão dos recursos hídricos, em especial no âmbito da integração entre as componentes superficiais e subterrâneas - bem como trazer os resultados calculados para a reserva ativa e conseqüentemente para a disponibilidade hídrica subterrânea por ambiente hidrogeológico.

A presente metodologia foi inicialmente proposta por Costa (1998), no que tange ao cálculo da reserva ativa, também chamada de reserva reguladora ou renovável, sendo também

posteriormente empregada pela ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, mais especificadamente no relatório de “Avaliação da Disponibilidade Hídrica na Bacia do Rio Paranapanema (2014)”, onde se demonstrou adequada, não só em função da comparação e equivalência dos resultados apresentados com aqueles calculados por outros métodos, para as mesmas áreas de levantamento, em outros trabalhos realizados pela Cobrape, mas porque também considera condicionantes de vazão superficial para a determinação das vazões subterrâneas adequadas de utilização.

Também pode-se destacar que esta metodologia possui como vantagem adicional, uma relativa facilidade na obtenção dos dados secundários que compõem a sua matriz de cálculo, já que se baseia em históricos da pluviometria, porosidade média do solo e dados básicos de vazão superficial, e que representem, de forma conjunta, os diversos domínios hidrogeológicos estudados na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba.

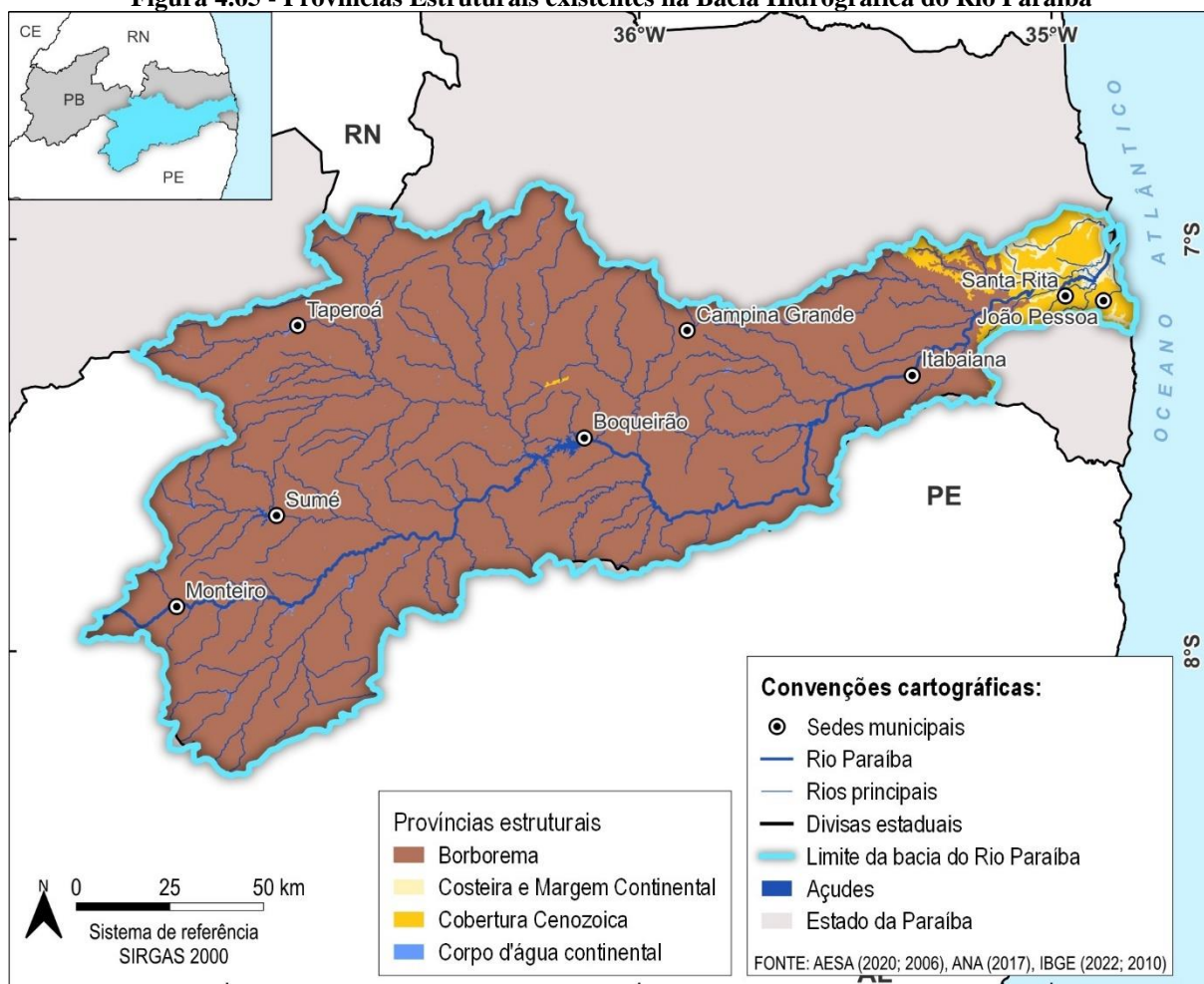
4.5.2 Caracterização dos Sistemas Aquíferos

Os contínuos avanços nas pesquisas geológicas e geocronológicas já nos possibilitam o conhecimento de boa parte da história geológica da crosta terrestre, reservando ao ambiente em estudo, uma série de acontecimentos tectônicos de relevância.

São diversos os estudos que retratam a geologia do estado da Paraíba, e também especificadamente da região da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, com destaque para levantamentos do CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

A área de estudo é composta predominantemente por rochas pré-cambrianas, vinculados à Província Borborema (Figura 4.65), de idades do arqueano ao paleoproterozóico em sua porção sul, compostas por granitóides e rochas supracrustais, e de idade mesoproterozóica na porção norte, também compostas por rochas supracrustais e granitóides, com migmatitos. Dispersas por toda a bacia hidrográfica se verifica a presença de rochas neoproterozóicas (vinculadas ao Brasileiro), também compostas por granitóides e rochas supracrustais.

Figura 4.65 - Províncias Estruturais existentes na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba



Como a geologia local é que determina o tipo de ambiente hidrogeológico correspondente, cabe destacar que no presente relatório, cada domínio hidrogeológico a seguir listado, teve conjuntamente um resumo de sua geologia hospedeira envolvida, sem no entanto adentrar às minúcias da geocronologia e da estratigrafia, devido à escala e foco do projeto, sendo que estes dados podem ser minunciosamente acessados em diversos documentos técnicos disponíveis, com destaque em estudos realizados no âmbito do Ministério de Minas e Energia e da Secretaria de Minas e Metalurgia, realizados no ano de 2006, e da CPRM, datados de 2022.

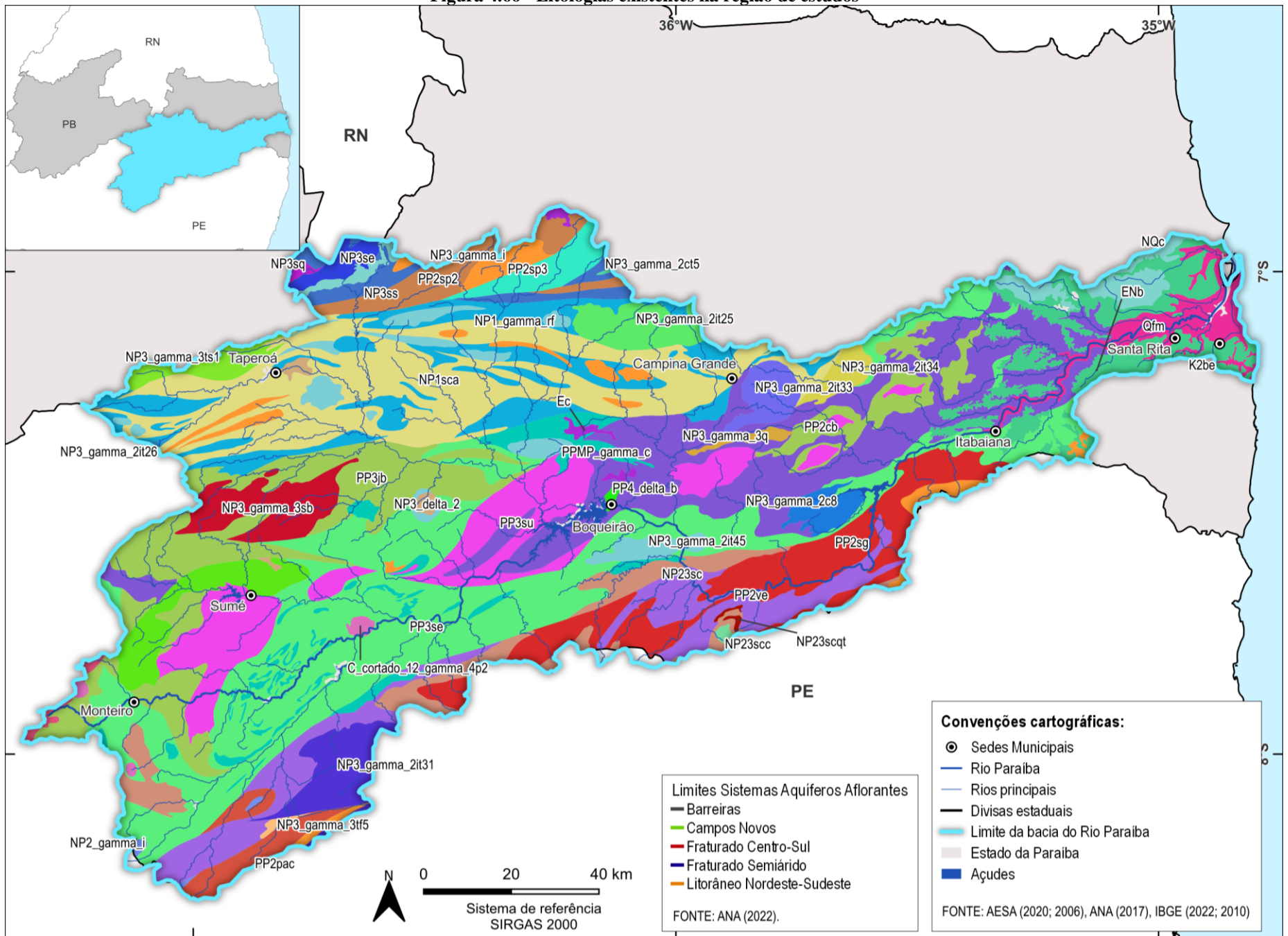
A geologia da bacia hidrográfica pode ser observada respectivamente Figura 4.66, onde se observa sua grande variabilidade em termos litológicos, que são, por sua vez, agrupados, para comporem os sistemas hidrogeológicos de interesse. Se agruparmos estes diversos litotipos nas classes de tipo de rochas, a saber, ígneas, metamórficas e sedimentares, tal reagrupamento pode ser observado na Figura 4.67.

Apesar de poderem existir subdivisões e nomenclaturas diferentes para os sistemas aquíferos existentes nos limites geográficos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, classificações estas considerando abordagens mais locais e/ou regionais, no presente trabalho optou-se pela utilização das delimitações e denominações utilizadas pela ANA, em especial pelo fato de tal classificação permitir a utilização de índices já determinados pela mesma, os quais são

fundamentais para os cálculos de disponibilidade hídrica subterrânea valendo-se da metodologia proposta pela própria ANA.

Neste sentido, no que diz respeito propriamente dito à hidrogeologia local, segundo a ANA, na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba podem ser individualizados cinco Sistemas Hidrogeológicos de maior representatividade, sendo eles: 1) Sistema Aquífero Fraturado Semiárido, 2) Sistema Aquífero Barreiras, 3) Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul, 4) Sistema Aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste, e 5) Sistema Aquífero Campos Novos (Figura 4.68). Estes sistemas estão detalhados a seguir, no que tange a sua composição geológica e dados hidrogeológicos de interesse.

Figura 4.66 - Litologias existentes na região de estudos

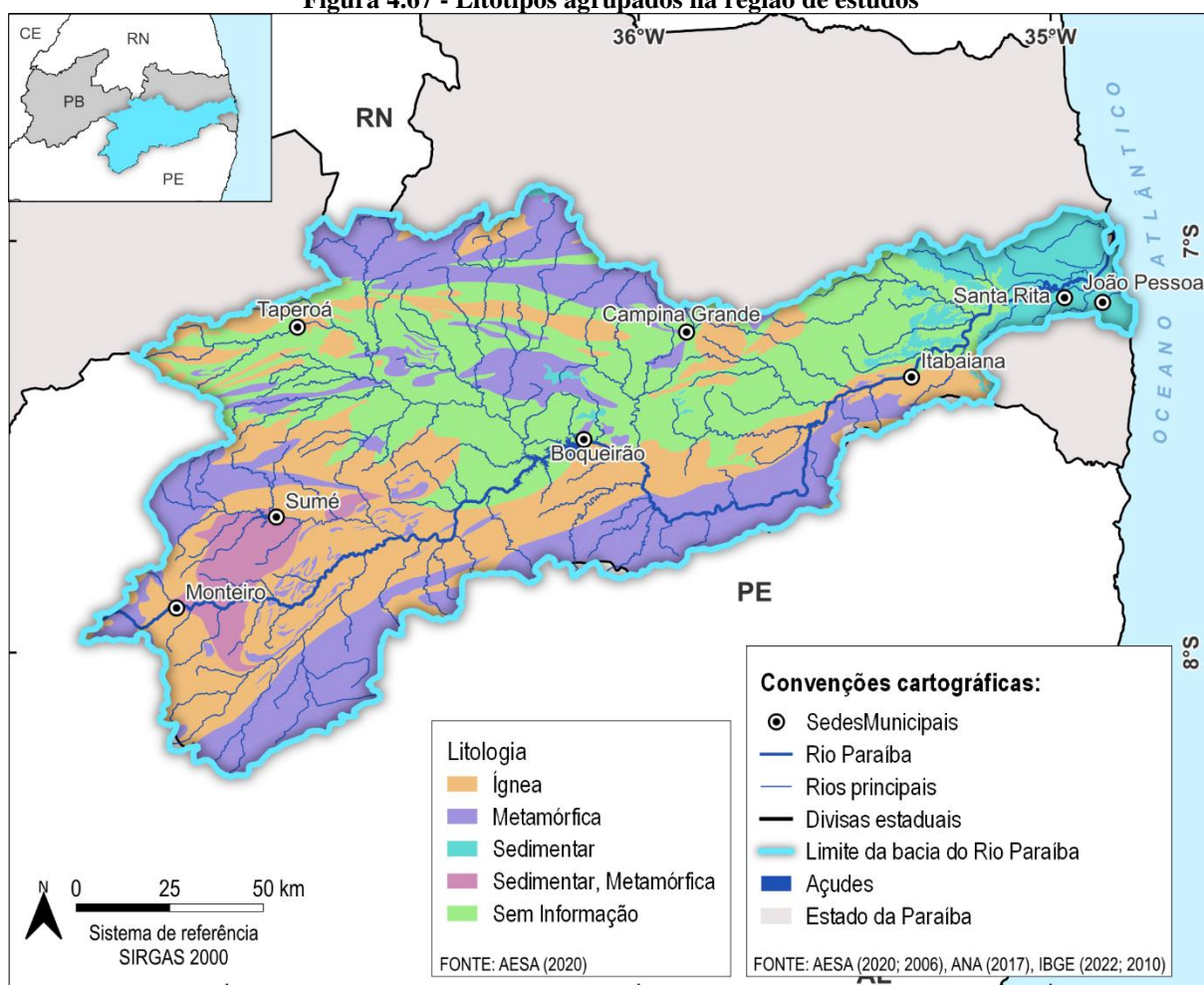


Formações Geológicas (Sigla - Unidade - Litotipos)

- C_cortado_12_gamma_4p1 - Corpo Plúton Prata - Biotita sienogranito, Diorito, Monzodiorito, Monzogranito, Norito, Quartzo monzodiorito
- C_cortado_12_gamma_4p2 - Corpo Plúton sem denominação - Biotita sienogranito, Diorito, Monzodiorito, Monzogranito, Norito, Quartzo monzonito
- Ec - Formação Campos Novos - Arenito, Argilito
- ENb - Grupo Barreiras - Arenito, Arenito conglomerático, Argilito, Argilito arenoso, Conglomerado, Siltito
- K2be - Formação Beberibe - Arenito
- NP1_gamma_rf - Suíte intrusiva Recanto - Riacho do Forno - Augen gnaiss, Metagranito, Metamonzogranito, Metassienito, Metassienogranito, Migmatito
- NP1_sca - Complexo São Caetano - Biotita gnaiss, Biotita-muscovita-quartzo xisto, Mármore, Metabasalto, Metachert, Metadacito, Metagabro, Metagrauvaca, Metapsamito, Metarriodacito, Metarritmito, Metavulcanoclástica, Migmatito, Ortognaiss granítico,
- NP2_gamma_i - Corpo Granitóides indiscriminados - Metagranito, Metagranodiorito, Metamonzodiorito, Metatonalito, Ortognaiss
- NP23sc - Complexo Surubim - Caroolina - Granada-biotita gnaiss, Mármore, Muscovita quartzito, Paragnaiss, Rocha calcissilicática, Xisto pelítico
- NP23scc - Litofácies Surubim - Caroolina, calcário - Mármore
- NP23sccqt - Litofácies Surubim - Caroolina, quartzito - Gnaiss quartzo-feldspático, Muscovita quartzito, Quartzito, Rocha calcissilicática
- NP3_delta_2 - Suíte intrusiva Máfica a intermediária - Diorito, Gabro, Gabronorito, Granodiorito, Monzodiorito, Quartzo diorito, Tonalito
- NP3_gamma_2c8 - Corpo Plúton Aroeiras - Biotita granito, Diorito, Granito, Granodiorito, Monzodiorito, Monzogranito, Monzonito
- NP3_gamma_2ct5 - Corpo Plúton Sem Denominação - Monzogranito, Sienogranito
- NP3_gamma_2it25 - Corpo Plúton Puxinanã - Diorito, Granito, Granodiorito, Monzogranito, Quartzo monzonito
- NP3_gamma_2it26 - Corpo Plúton Brejinho (Itapetim) - Diorito, Granito, Granodiorito, Monzogranito, Monzonito
- NP3_gamma_2it30 - Corpo Plúton Serra Gado Bravo (Serra Jabitacá) - Diorito, Granito, Granodiorito, Monzonito
- NP3_gamma_2it31 - Corpo Plúton Serra da Jararaca - Diorito, Granito, Granodiorito, Monzonito
- NP3_gamma_2it33 - Corpo Plúton Campina Grande - Diorito, Granito, Granodiorito, Monzodiorito, Monzonito, Quartzo monzodiorito
- NP3_gamma_2it34 - Corpo Plúton Serra Redonda - Diorito, Granito, Granodiorito, Monzonito
- NP3_gamma_2it45 - Corpo Plúton Sem Denominação - Diorito, Granito, Granodiorito, Monzonito
- NP3_gamma_3q - Corpo Granitóide Queimadas - Monzogranito, Sienogranito
- NP3_gamma_3sb - Corpo Granitóide Serra Branca - Biotita sienogranito, Granodiorito, Leucogranito, Monzogranito, Quartzo diorito, Sienito, Tonalito
- NP3_gamma_3tf5 - Corpo Plúton Sem Denominação - Alkali-feldspato granito, Quartzo álcali-feldspato sienito
- NP3_gamma_3ts1 - Corpo Plúton Teixeira - Granito, Granodiorito, Quartzo monzonito
- NP3_gamma_i - Corpo Granitóides indiscriminados brasileiros - Biotita granito, Granito pórfiro, Granitóide, Granodiorito, Metagranito, Monzogranito, Quartzo diorito, Quartzo monzonito, Sienogranito, Tonalito
- NP3se - Formação Equador - Metaconglomerado, Muscovita quartzito
- NP3sq - Formação Serra dos Quintos - Clorita xisto, Formação ferrífera bandada, Gnaiss, Mármore, Metabasalto, Quartzito ferruginoso, Rocha metaltramáfica, Tremolita-clorita xisto, Xisto
- NP3ss - Formação Seridó - Biotita-quartzo xisto, Clorita xisto, Filito, Granada-biotita xisto, Mármore, Metavulcânica básica, Quartzito, Xisto aluminoso
- NQc - Depósitos colúvio-eluviais - Areia, Argila, Cascalho, Laterita
- PP2cb - Unidade Cabaceiras - Migmatito, Ortognaiss granítico, Ortognaiss granodiorítico
- PP2pac - Complexo Pão de Açúcar - Metadiorito, Metagranito, Metagranodiorito, Metatonalito, Migmatito, Ortognaiss granodiorítico
- PP2sg - Complexo Salgadinho - Anfibólito, Metadiorito, Metagabro, Ortognaiss, Quartzo monzodiorito
- PP2sp2 - Unidade Serrinha - Pedro Velho, Unidade 2 - Augen gnaiss, Migmatito, Ortognaiss granodiorítico
- PP2sp3 - Unidade Serrinha - Pedro Velho, Unidade 3 - Metagranito, Migmatito
- PP2ve - Complexo Vertentes - Anfibólito, Ortognaiss
- PP3jb - Complexo Serra de Jabitacá - Metagranodiorito, Metatonalito, Migmatito
- PP3se - Complexo Sertânia - Anfibólito, Granada-biotita gnaiss, Mármore calcítico, Mármore dolomítico, Paragnaiss, Paramigmatito, Rocha calcissilicática, Rocha metavulcânica
- PP3su - Complexo Sumé - Formação ferrífera bandada, Granulito, Mármore, Metagabro, Metapiroxenito, Ortognaiss, Paragnaiss, Rocha calcissilicática
- PP4_delta_b - Suíte Boqueirão - Diorito, Gabro, Metadiorito, Metagabro, Metanortosito, Piroxenito, Rocha metaltramáfica
- PPMP_gamma_c - Suíte intrusiva Camalaú - Augen gnaiss, Metagranito, Metamonzonito, Metassienito, Metatonalito, Metatondjemito, Ortognaiss, Ortognaiss monzogranítico
- Qfm - Depósitos flúvio-marinhos - Areia, Argila, Silte

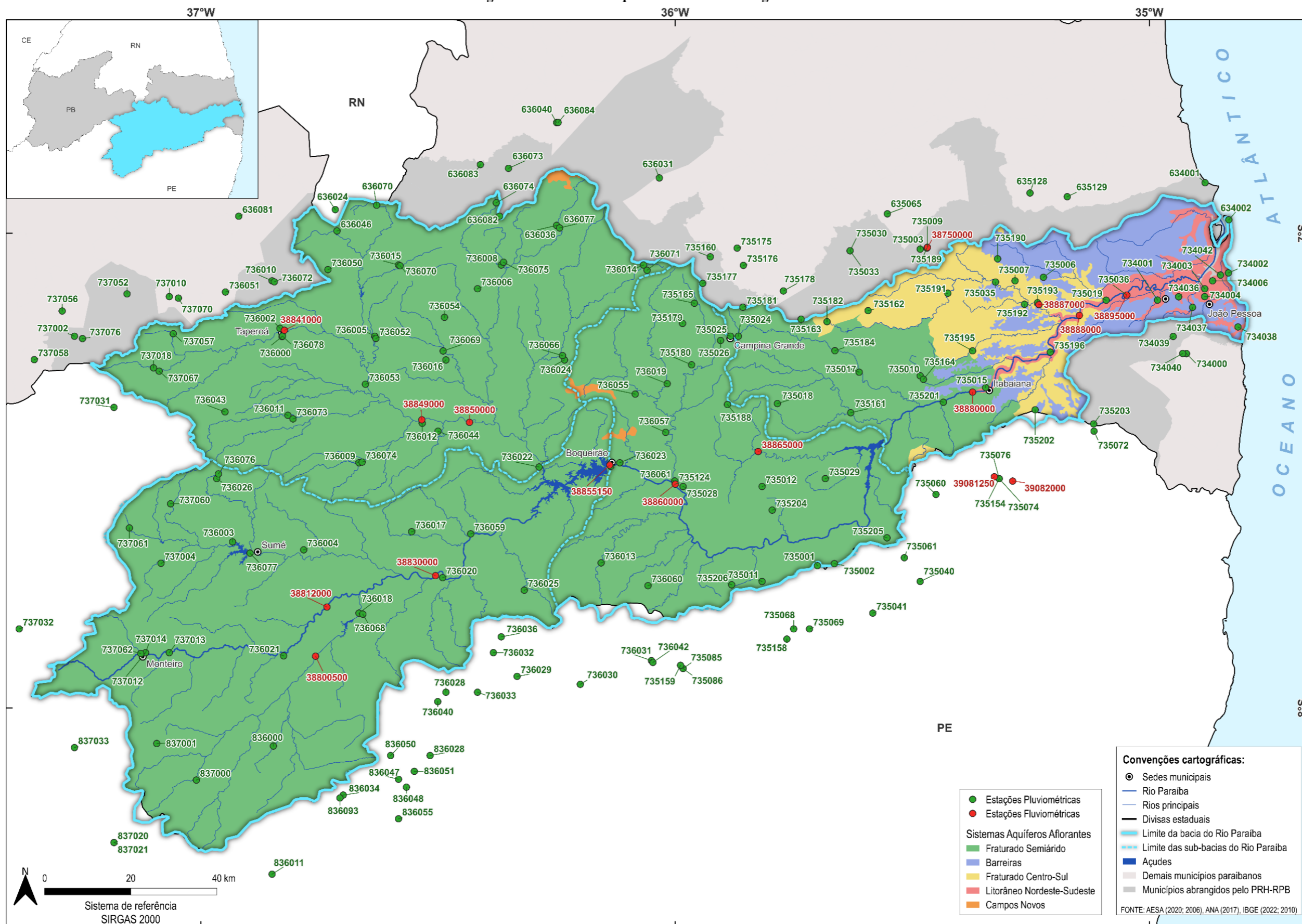
Fonte: CPRM (2024).

Figura 4.67 - Litotipos agrupados na região de estudos



Fonte: AESA (2020).

Figura 4.68 - Sistemas Aquíferos existentes na região de estudos



Fonte: Adaptado de ANA (2021).

A interpolação de Níveis de Água Subterrânea em geral não é uma prática simples, e que representa ainda mais complexidade em ambientes fraturados. Para ambientes sedimentares relativamente homogêneos e onde o ambiente é entendido como uma estrutura espacial contínua e estacionária de dados, é comum se valor da técnica da Krigagem, conceitualmente aceita como uma das técnicas que melhor representa a continuidade das superfícies potenciométricas.

Já a escolha do melhor método de interpolação para profundidades de níveis de água subterrânea em ambientes fraturados é uma questão complexa e que depende de diversos fatores, incluindo:

- Heterogeneidade do meio: a presença de fraturas induz uma alta variabilidade espacial na condutividade hidráulica, o que pode levar a gradientes hidráulicos locais e complexos padrões de fluxo.
- Densidade e distribuição das amostras: a quantidade e a distribuição espacial dos pontos de amostragem influenciam diretamente a qualidade da interpolação.
- Objetivos do estudo: a precisão requerida para o estudo e a escala espacial de análise são fatores importantes a serem considerados.

Em ambientes geológicos fraturados, a suposição da existência de uma estrutura espacial contínua e estacionária de dados pode não ser válida devido à alta heterogeneidade e à presença de descontinuidades.

Desta forma, a utilização de outras técnicas de interpolação, que levem em conta a variação entre os dados, considerando a maior ou menor proximidade entre os mesmos como um fator de peso, podem ser utilizadas, sendo chamadas de “métodos de vizinhança”.

Dentre estas, destaca-se a técnica chamada IDW – Inverso da Distância Ponderada, que atribui pesos aos pontos de dados com base na distância, sendo mais simples e menos sensível a outliers (pontos “fora da curva”). Outra técnica de vizinhança passível de utilização é aquela baseada em Kernel, onde valendo-se de funções Kernel a atribuem pesos aos pontos de dados, oferecendo mais flexibilidade na definição da vizinhança.

Outros métodos podem ainda ser utilizados, mas que requerem um nível de complexidade computacional e aprofundamento ainda maior na validação dos dados, e que se valeriam das chamadas “redes neurais artificiais”, que são capazes de aprender padrões complexos nos dados, incluindo não linearidades e interações entre variáveis, ou baseados em “métodos de simulação”, e que permitem gerar múltiplas realizações do campo de variáveis, capturando a incerteza associada à interpolação, mas que não se aplicariam ao presente estudo, devido a seu grau de foco e sofisticação.

É importante destacar que a interpolação de dados de ambientes fraturados é inerentemente incerta, e que mesmo após a análise exploratória dos dados, com a detecção dos chamados outliers, bem como valendo-se das devidas considerações das informações geológicas, essa incerteza pode se manter de forma considerável, sendo importante quantificá-la e apresentá-la nos resultados.

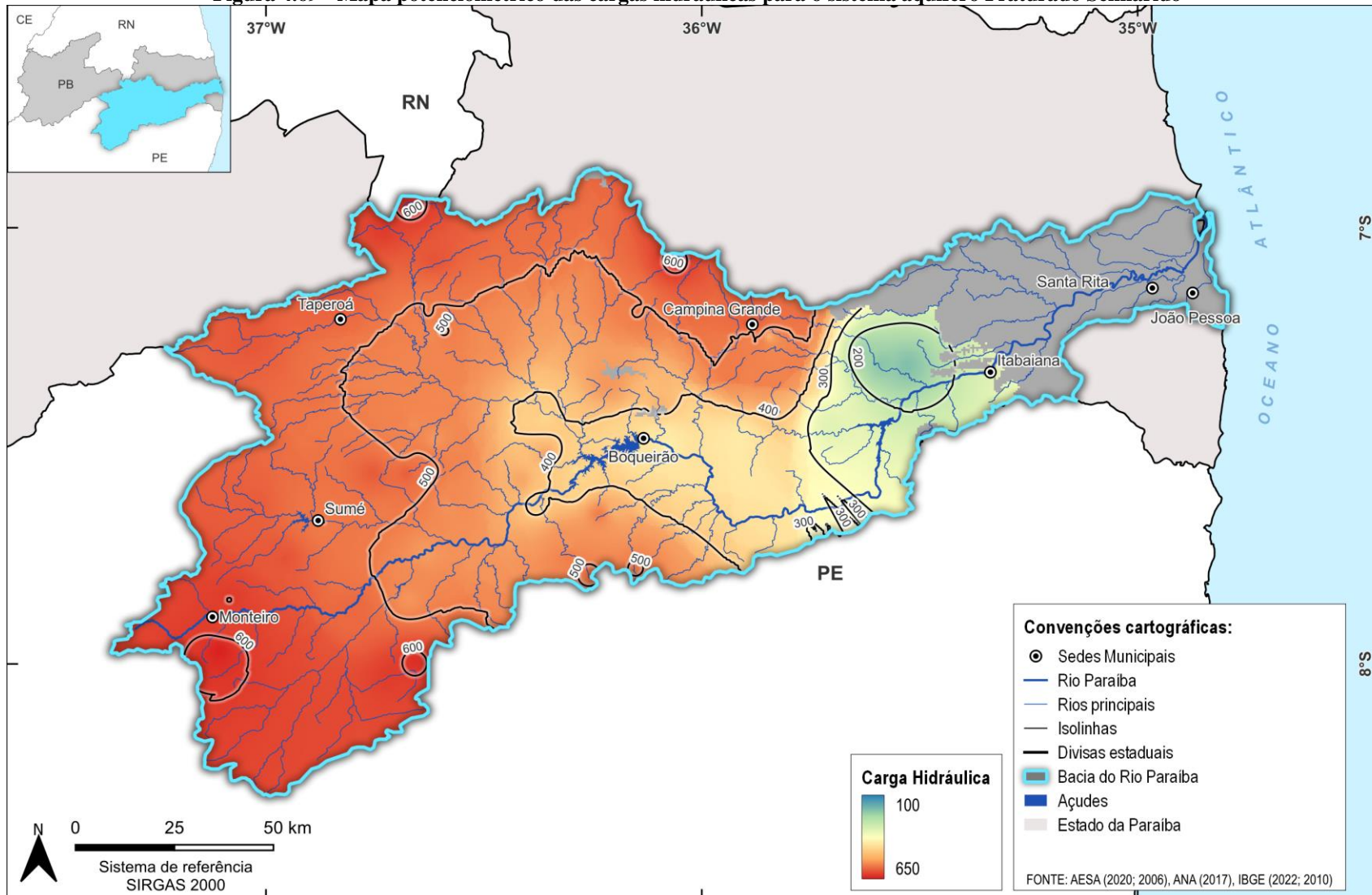
Da Figura 4.69 a Figura 4.72 são retratados os mapas potenciométricos por sistema aquífero, onde é possível também se observar as chamadas linhas isopotenciométricas - que correspondem às linhas de mesma carga hidráulica. Cabe destacar que não foi possível apresentar o mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Campos Novos, uma vez que não foram encontrados dados suficientes para tal.

Para elaborar os mapas potenciométricos foram utilizados 623 poços com dados suficientes para a interpolação que constam no banco de dados fornecido pela AESA (2024).

Cabe ainda detalhar que as chamadas cargas hidráulicas que aqui se demonstram interpoladas, gerando por sua vez uma superfície potenciométrica, nada mais são do que as cotas dos níveis estáticos dos poços utilizados, e que foram interpoladas entre si, através da técnica da krigagem para ambientes sedimentares e pelo método IDW para ambientes fraturados. Dessa forma, quando calculada a carga hidráulica para o sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste, devido ao fato de o aquífero estar localizado em terreno com cotas mais baixas, a cota da boca dos poços é menor do que a profundidade do poço, e por esse motivo, as cargas resultaram negativas.

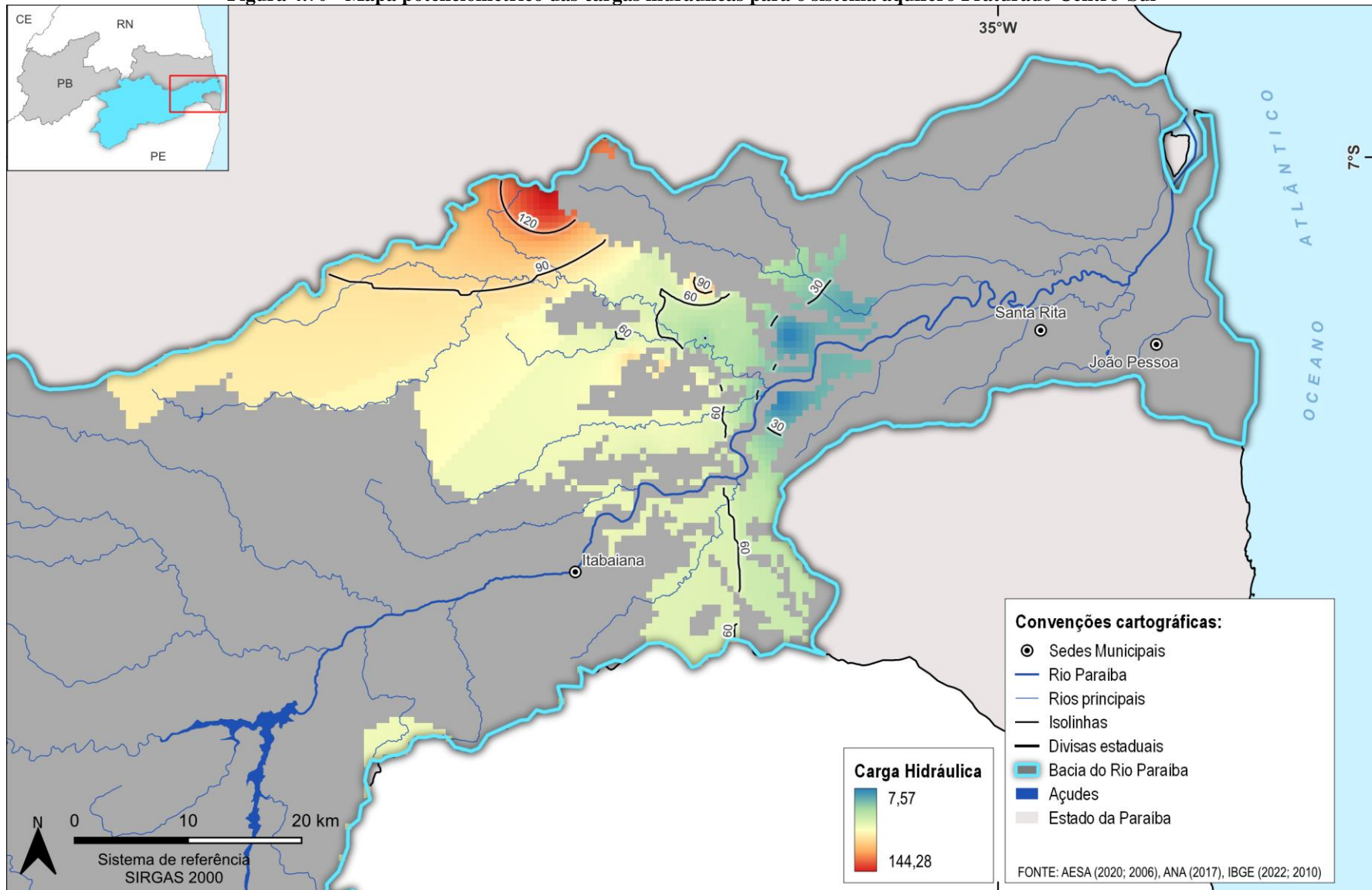
Para que estes níveis estáticos do aquífero freático pudessem ser correlacionados a um mesmo Datum de referência, visando a sua interpolação, foram utilizadas as informações disponíveis nos bancos de dados oficiais, e que forneceram tanto a cota topográfica da boca do poço (em metros), quanto a profundidade medida em metros, a partir da boca do poço, até o nível de água estático. Desta forma, pode-se calcular a cota de elevação real do aquífero freático, em metros, a partir de um Datum conhecido, que neste caso é o nível médio do mar.

Figura 4.69 - Mapa potenciométrico das cargas hidráulicas para o sistema aquífero Fraturado Semiárido



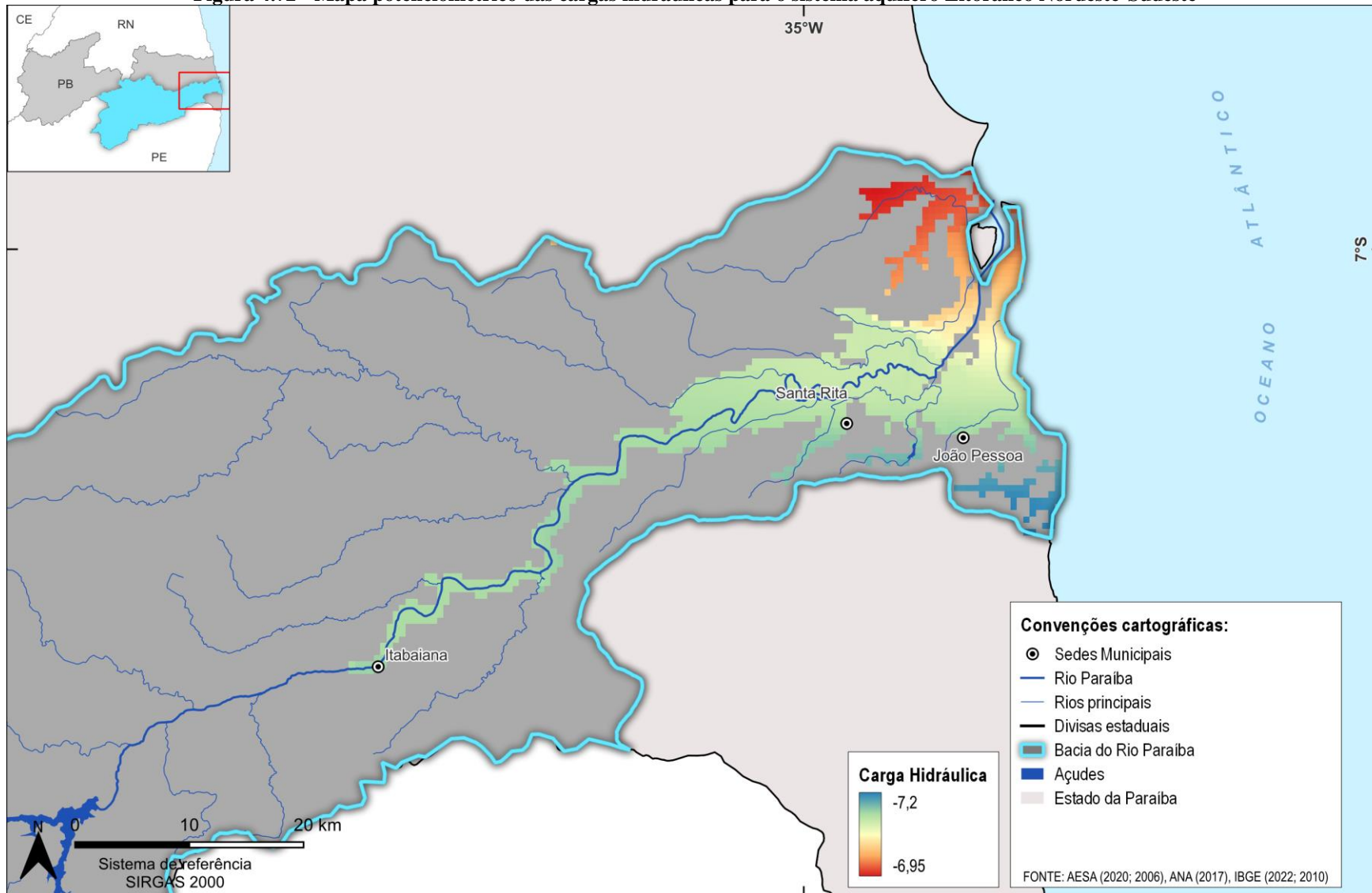
Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.70 - Mapa potenciométrico das cargas hidráulicas para o sistema aquífero Fraturado Centro-Sul



Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.72 - Mapa potenciométrico das cargas hidráulicas para o sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste



Fonte: Cobrape (2024)

4.5.2.1 Domínios Hidrogeológicos

Abaixo estão descritos os 5 Sistemas Hidrogeológicos existentes na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, segundo classificação da ANA - Agência Nacional de Águas.

- *Sistema Aquífero Fraturado Semiárido*

Este domínio hidrogeológico é o predominante na área da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, e está vinculado a terrenos geologicamente antigos, tanto do Arqueano, e preponderantemente ao Proterozóico, reunindo rochas diversas, como migmatitos, ortognaisses, gnaisses e granitos do embasamento. Dentre as rochas do Mesoproterozóico e Neoproterozóico, destacam-se gnaisses, mármore, xistos, quartzitos, filitos e metavulcânicas; além de rochas granitoides associadas às supracrustais. Trata-se de um ambiente tectonicamente mais complexo, apresentando evidências de polideformações estruturais, com a superposição de eventos deformacionais variados.

Na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, as principais feições vinculadas aos ambientes Paleo, Meso e Neoproterozóicos estão associadas ao Complexo São Caetano (NP1sca) e ao Complexo Sertânia (PP3se). Já as principais feições vinculadas aos granitoides estão associadas à Suíte Intrusiva Recanto-Riacho do Forno (NP1_gamma-rf), ao Corpo Plutônico Puxinanã (NPs_gamma_2it25), Corpo Plutônico Campina Grande (NP3_gamma_2it33) e ao Complexo Vertentes (Pp2ve).

Geomorfologicamente este sistema aquífero está associado ao Planalto da Borborema, que da mesma forma, ocupa cerca de noventa por cento da bacia hidrográfica, com uma área de aproximadamente 17.658 km². As rochas que compõem este sistema fazem parte do “domínio fraturado,” pelo fato das rochas hospedeiras terem sido submetidas a tectonismo pretérito que propiciou a geração de falhas e fraturas, já que as rochas graníticas e metamórficas que o compõem praticamente não apresentam porosidade primária.

Em geral, a baixa transmissividade desse sistema aquífero e a ausência de fluxos regionais subterrâneos pode condicionar a formação de unidades independentes de menor dimensão, com regimes de escoamento particularizados - sem relacionar-se a áreas mais distantes dentro da própria bacia. No entanto, os dados disponíveis de vazão superficial inerentes à sua região geográfica de afloramento sustentam a informação de que o escoamento básico de rios e riachos que drenam esses terrenos não é sustentado pelos aportes subterrâneos, uma vez que a chamada vazão Q90 - e que pode ser correlacionada ao escoamento de base - é praticamente nula nesta porção da bacia hidrográfica.

Seu potencial hídrico é limitado à ocorrência dessas zonas favoráveis à recarga e acumulação, o que resulta em grande variação das condições de produção, com valores de vazões médias de 2,5 m³/h, com uma mediana de 1,8 m³/h; e vazões específicas médias de 0,45 m³/h/m com uma mediana de 0,14 m³/h/m. Os dados de vazão foram obtidos a partir dos dados fornecidos pela AESA (2024), e passaram por uma avaliação prévia de consistência. Com base nesses dados, foram calculados os valores médios apresentados acima, e esse mesmo procedimento foi adotado para os demais sistemas aquíferos.

Os poços existentes neste sistema possuem uma profundidade do nível de água subterrânea estabilizado médio de 6,8 metros, e uma profundidade do nível dinâmico médio (com a operação de um sistema de bombeamento operante) de 22,5 metros.

Apesar de ocupar uma significativa extensão areal, devido ao fato de este tipo de ambiente apresentar baixos coeficientes de infiltração (0,5%), e também baixos coeficientes de armazenamento e transmissibilidade, acabam por não serem uma fonte significativa em termos de recarga, acúmulo e transmissão de água subterrânea, o que os torna, nesta porção da bacia hidrográfica um sistema aquífero de baixa potencialidade, apesar do grande número de poços nele localizados. O Sistema Aquífero Paraíba-Pernambuco não se limita à Formação Barreiras; ele também inclui a Formação Beberibe. Além disso, o sistema possui partes livres e confinadas. A Formação Itamaracá não está incluída nesse sistema.

- *Sistema Aquífero Barreiras (também chamado de Sistema Paraíba-Pernambuco)*

Este sistema aquífero aflora de forma contínua na região leste da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. Possui caráter livre, daí também a sua maior vulnerabilidade, já que não são incomuns as detecções de nitratos oriundos de fossas e sumidouros, por vezes fruto da inexistência de redes de esgoto em certas regiões.

Nesta região da bacia hidrográfica, as principais feições vinculadas a este ambiente sedimentar estão correlacionadas aos depósitos colúvio-eluviais, compostos por areia, argila, cascalhos e até por laterita (NQc), bem como por rochas do chamado Grupo Barreiras, como arenitos, argilitos, conglomerados e siltitos (ENb). De forma mais restrita, se verifica a presença de calcários sotopostos, pertencentes à Formação Gramame, e arenitos calcíferos da Formação Itamaracá.

Ainda nesta região geográfica de ocorrência do Sistema Aquífero Barreiras, se verifica a existência de porções mais profundas, e com graus diversos de confinamento variável, hospedados em arenitos quartzosos e/ou calcíferos da Formação Beberibe, que não se encontra descrita em detalhes no presente estudo, devido à sua diminuta presença dentro da área específica de estudos.

O Grupo Barreiras possui espessura média de sessenta metros, mas os níveis mais favoráveis à exploração são aqueles onde predominam as camadas arenosas sobre as camadas argilosas, o que em geral ocorrem entre as profundidades de trinta a cinquenta metros. Geomorfologicamente está associado ao Domínio Geomorfológico Tabuleiros Costeiros, com uma área de aproximadamente 1.034 km².

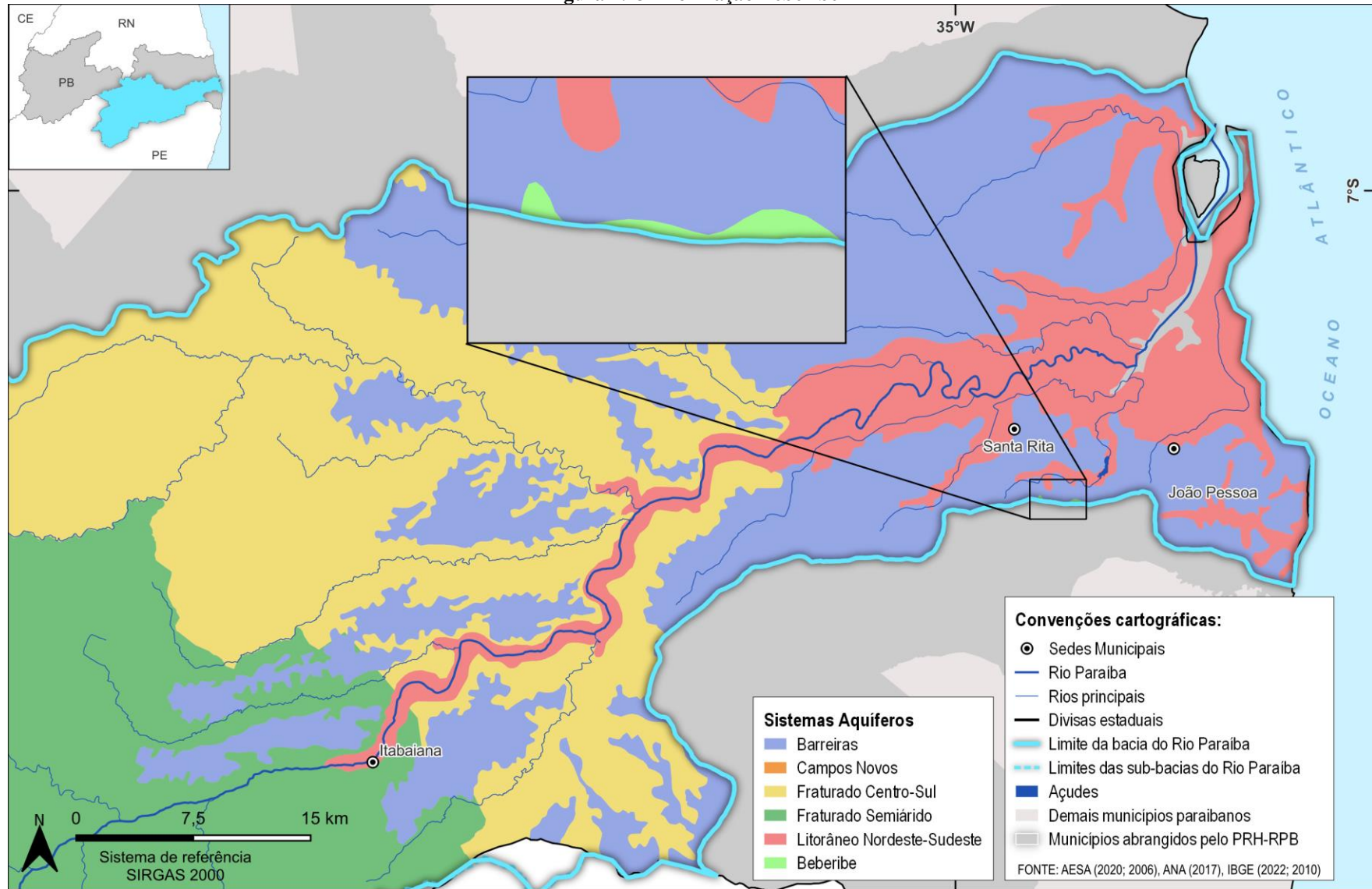
É muito utilizado no leste da Paraíba, com ampla distribuição para a população. Em geral possui uma profundidade do nível d'água raso, girando em torno de 5 metros – em especial nas regiões próximas à costa - podendo ser até subaflorante, o que torna o seu grau de vulnerabilidade ainda maior. Suas porções mais confinadas por sua vez, possuem níveis d'água mais profundos, podendo alcançar até oitenta metros de profundidade, alcançando em certas situações geográficas, profundidades ainda maiores.

Sua vazão específica gira em torno de 1 m³/h/m nos níveis mais superficiais, passando para valores mais significativos, de até 15 m³/h/m nas profundidades mais favoráveis (trinta e cinquenta metros). Em geral apresenta vazões médias de 19 m³/h, com uma mediana de 10 m³/h; e vazões específicas médias de 1,3 m³/h/m com uma mediana de 0,86 m³/h/m (AESAs, 2024).

Os poços existentes neste sistema possuem uma profundidade do nível de água subterrânea estabilizado médio de 7,5 metros, e uma profundidade do nível dinâmico médio (com a operação de um sistema de bombeamento operante) de 15,8 metros.

Cabe destacar que o Sistema Aquífero Paraíba-Pernambuco também abrange a Formação Beberibe. Contudo, a Formação Beberibe não foi incluída devido ao seu tamanho reduzido, uma vez que sua área dentro da bacia é de apenas 0,5 km², tornando-a pouco representativa em relação à escala geral da bacia, como pode ser observado na Figura 4.73. Além disso, entre as localizações dos poços nos dados fornecidos pela AESA (2024), nenhum estava situado dentro dos limites da Formação Beberibe.

Figura 4.73 - Formação Beberibe



- *Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul*

O Sistema Aquífero Fratura Centro-Sul, possui as mesmas litologias do Sistema Aquífero Semiárido, com a exceção de não conter os chamados granitóides, e de também apresentar um coeficiente de infiltração mais elevado, na ordem de 4%.

Este domínio hidrogeológico ocupa uma pequena área no centro leste da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba - mais precisamente a jusante do Sistema Aquífero Semiárido e a montante do Sistema Aquífero Barreiras - estando vinculado a terrenos geologicamente antigos, preponderantemente ao Proterozóico, reunindo rochas diversas, como migmatitos, ortognaisses e gnaisses. Com já explicitado, dentre as rochas do Mesoproterozóico e Neoproterozóico, destacam-se gnaisses, mármore, xistos, quartzitos, filitos e metavulcânicas.

Também se trata de um ambiente tectonicamente complexo, e onde as deformações estruturais permitiram uma ambientação hidrogeológica um pouco mais favorável do que no Sistema Aquífero Semiárido, e suas principais feições vinculadas aos ambientes Paleo, Meso e Neoproterozóicos estão associadas ao Complexo São Caetano (NP1sca) e ao Complexo Sertânia (PP3se). Geomorfologicamente está associado à chamada Depressão Sertaneja, que se localiza entre o Planalto da Borborema e os Tabuleiros Costeiros, com uma área de aproximadamente 1.009 km².

De forma geral, esta porção do Domínio Hidrogeológico Cristalino apresenta uma similar favorabilidade hidrogeológica ao sistema fraturado semiárido, e mesmo possuindo um coeficiente de infiltração superior, por vezes demonstra uma menor vazão específica, a depender do grau de falhamento do terreno e da possibilidade de geração de armadilhas hidrogeológicas potenciais, correlacionadas à interconectividade das discontinuidades estruturais, e que por sua vez, permitem uma maior ou menor disponibilidade hídrica subterrânea.

A recarga natural deste sistema aquífero se dá em decorrência principalmente das chuvas que ocorrem na bacia hidrográfica, e que escoam através das camadas de rocha alterada e zonas fraturadas, sendo dessa forma armazenada num primeiro momento na reserva ativa, e num maior intervalo temporal, na reserva secular ou permanente. Muito menos significativa, recargas também podem eventualmente ocorrer através do próprio curso d'água, em especial em momentos de maior vazão superficial, e em especial quando o corpo hídrico porventura cruza algumas destas estruturas acima citadas.

Em geral, este sistema demonstra uma camada superior intemperizada, o que favorece uma recarga contínua - através de drenança vertical descendente - das camadas mais íntegras e por vezes mais confinadas, localizadas estratigraficamente em níveis mais profundos.

Seu potencial hídrico, apesar de possuir uma vazão média similar ao fraturado semiárido, ainda também é limitado à ocorrência de zonas mais favoráveis à recarga e transmissão, com valores de vazões médias de 2,51 m³/h, com uma mediana de 2 m³/h; e vazões específicas médias de 0,36 m³/h/m e com uma mediana de 0,17 m³/h/m (AESAs, 2024).

Os poços existentes neste sistema possuem uma profundidade do nível de água subterrânea estabilizado médio de 7,3 metros, e uma profundidade do nível dinâmico médio (com a operação de um sistema de bombeamento operante) de 19,7 metros.

- *Sistema Aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste*

Este sistema aquífero é ocupado por sedimentos mais recentes, em geral inconsolidados, de idade quaternária, e depositados por sistemas fluviais em contextos deposicionais vinculados aos ambientes fluviolacustres e de várzeas, atingindo extensão areal linear ao longo do Rio Paraíba, especificadamente na planície costeira. Este sistema também pode ser denominado de Sistema Aluvial.

Na região da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, este sistema aquífero pode ser descrito como sendo composto pelos próprios depósitos fluviolacustrinos, e também pelas planícies e terraços aluvionares - que os precedem - ocorrendo expressivamente na região leste da bacia.

Os pacotes sedimentares inconsolidados são compostos principalmente por camadas de argila, areia e silte, a depender da energia pretérita de arraste e deposição dos sedimentos, geralmente com espessura inferior a vinte metros nas planícies aluvionares, mas podendo chegar a mais de cem metros nos terraços aluvionares, em áreas de maior de depressão do assoalho geológico de suporte. Geomorfologicamente está associado às formas agradacionais atuais e subatuais interioranas, com uma área de aproximadamente 375 km².

Em geral apresenta significativa favorabilidade hidrogeológica, com águas de boa qualidade, quando não captadas em horizontes mais ricos em ferro ou matéria orgânica, o que também é relativamente comum.

Trata-se de aquíferos superficiais a subsuperficiais, mas com grande importância para a região onde se inserem, fornecendo água para comunidades diversas, com vazões girando em torno de 15 m³/hora, quando localizados nas planícies aluvionares, alcançando magnitudes superiores de até 30 m³/h quando nos terraços aluvionares.

Quanto ao seu grau de vulnerabilidade, por fim vale salientar que quando apresentam a camada superior constituída por argilas, em geral demonstram uma menor vulnerabilidade, frisando que muitas vezes se localizam em áreas passíveis de sofrerem alagamentos em partes do ano, quando não localizadas em terraços de maior cota topográfica. Em geral apresenta vazões médias de 31 m³/h, com uma mediana de 15 m³/h; e vazões específicas médias de 2,28 m³/h/m com uma mediana de 1,27 m³/h/m (AESAs, 2024).

Os poços existentes neste sistema possuem uma profundidade do nível de água subterrânea estabilizado médio de 18,6 metros, e uma profundidade do nível dinâmico médio (com a operação de um sistema de bombeamento operante) de 37,8 metros.

- *Sistema Aquífero Campos Novos (também chamado Sistema Serra dos Marins)*

Este sistema aquífero possui pequena extensão areal, e corresponde ao chamado domínio poroso, e se encontra disposto em meio aos materiais sedimentares mais antigos e que sofreram diagênese, gerando rochas sedimentares como arenitos e argilitos pertencentes à Formação

homônima Campos Novos (Ec). Os arenitos podem ser finos, médios ou grosseiros, com espessuras variadas, e são intercalados por argilitos, de espessuras e profundidades também variáveis.

Constituem-se de aquíferos intergranulares, sendo classificados como livres ou parcialmente confinados localmente, a depender da profundidade de exploração e seu grau de confinamento. Ou seja, as camadas hospedeiras mais superficiais são em geral de caráter livre - e onde a sua superfície potenciométrica se encontra sob pressão atmosférica - com relativo grau de confinamento em profundidades maiores (em geral superiores a cinquenta metros), devido à existência de camadas impermeáveis entre os extratos sedimentares.

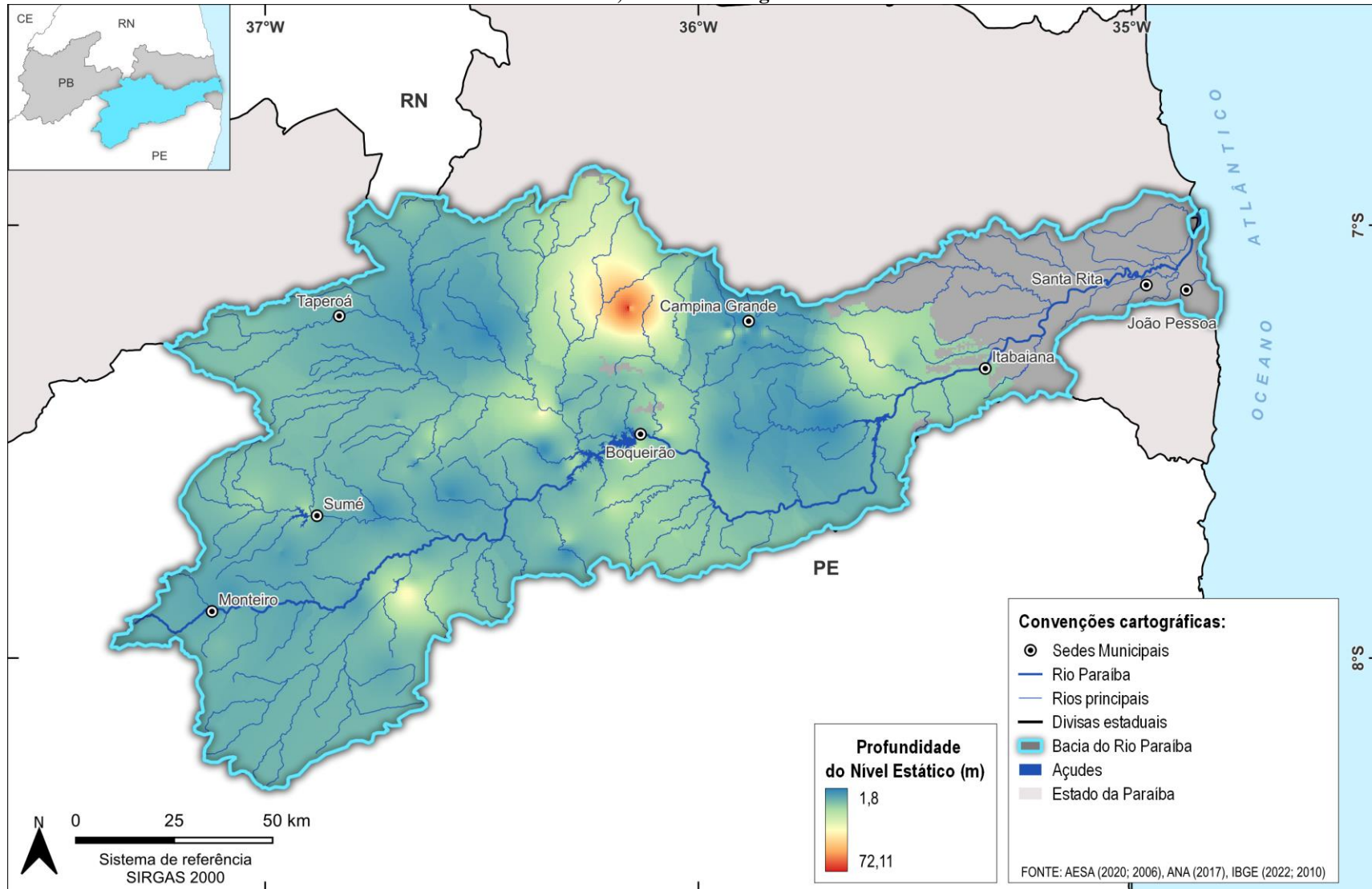
Geomorfologicamente é um sistema aquífero descontínuo, e ocorre nos aplainamentos residuais do domo da Borborema e nas “serras”, daí também seu nome ser Sistema Serra dos Marins, e a sua espessura de sedimentos varia muito a depender de sua posição geográfica, podendo variar entre 19 metros e mais de 50 metros.

Em geral apresenta vazões médias de 3,85 m³/h, com uma mediana de 4 m³/h e vazões específicas médias de 1 m³/h/m e mediana de 0,67 m³/h/m (AESAs, 2024).

Os poços existentes neste sistema possuem uma profundidade do nível de água subterrânea estabilizado médio de 7,5 metros, e uma profundidade do nível dinâmico médio (com a operação de um sistema de bombeamento operante) de 15,8 metros.

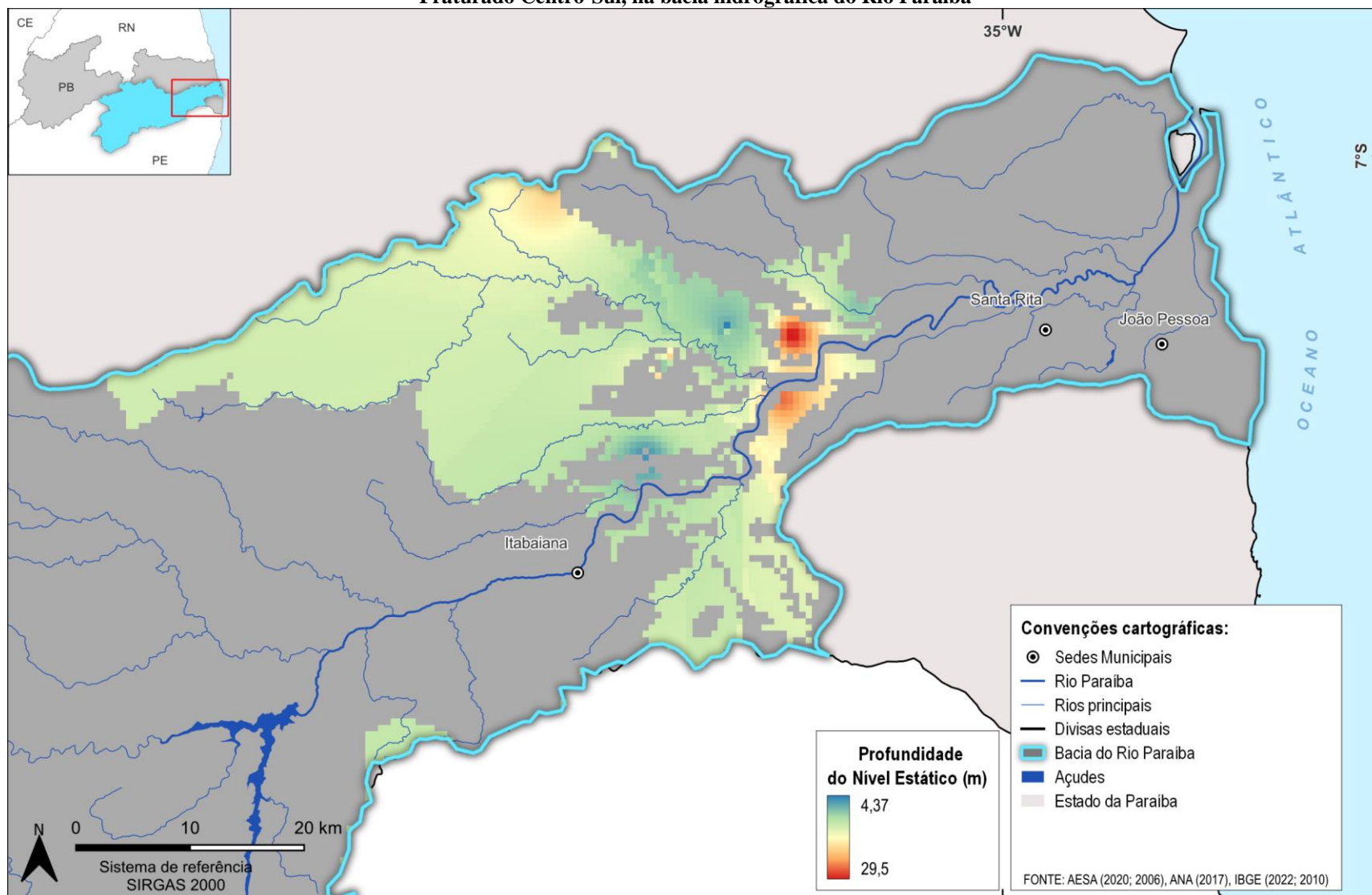
Da Figura 4.74 a Figura 4.81 a seguir são retratadas em planta, via interpolação, as profundidades dos níveis estáticos e dinâmicos de toda a bacia hidrográfica, bem como os destaques para a área de João Pessoa e entorno.

Figura 4.74 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Estáticos dos poços tubulares do sistema aquífero Fraturado Semiárido, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba



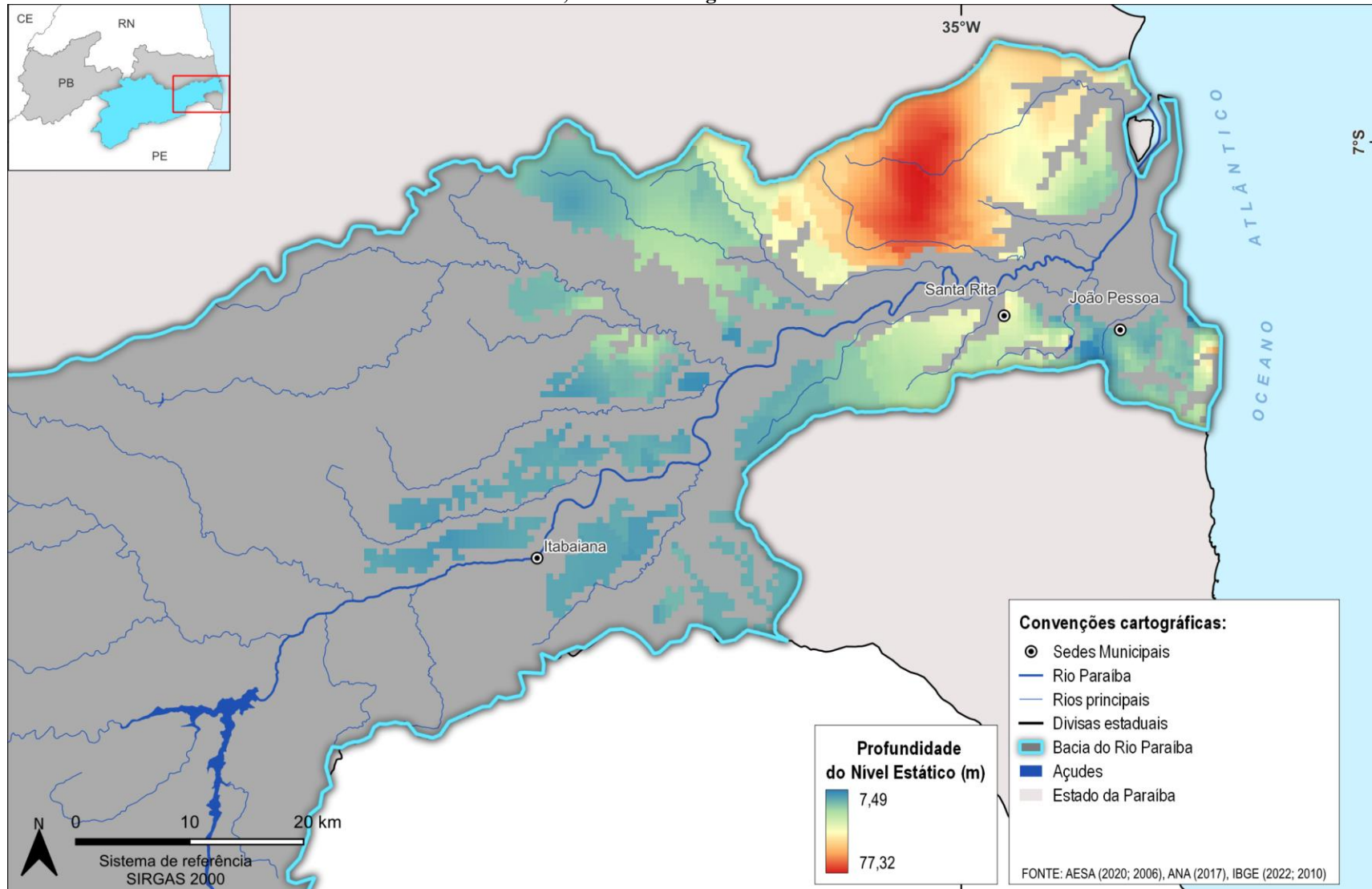
Fonte: AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.75 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Estáticos dos poços tubulares do sistema aquífero Fraturado Centro-Sul, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba



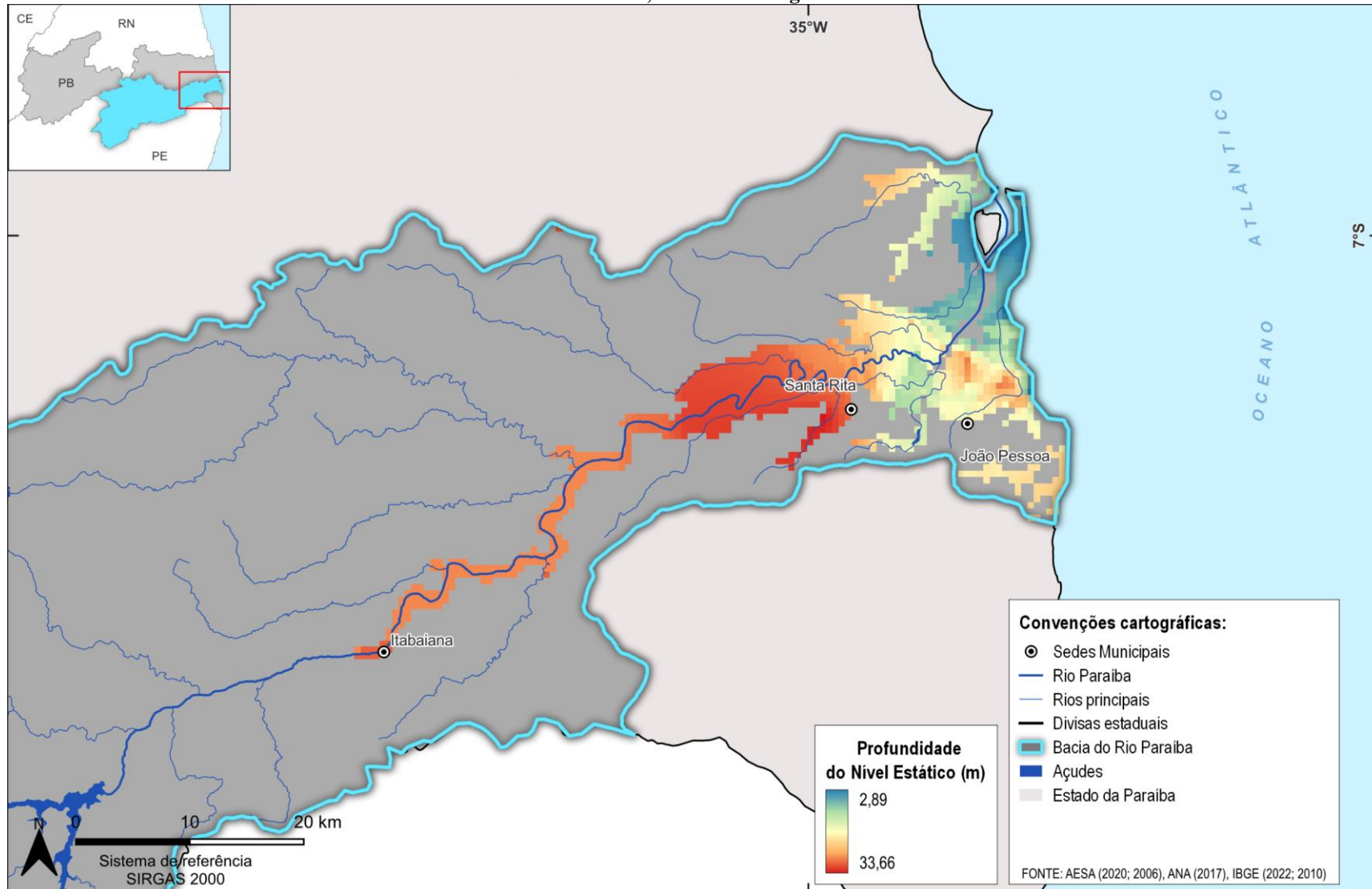
Fonte: AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.76 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Estáticos dos poços tubulares do sistema aquífero Barreiras, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba



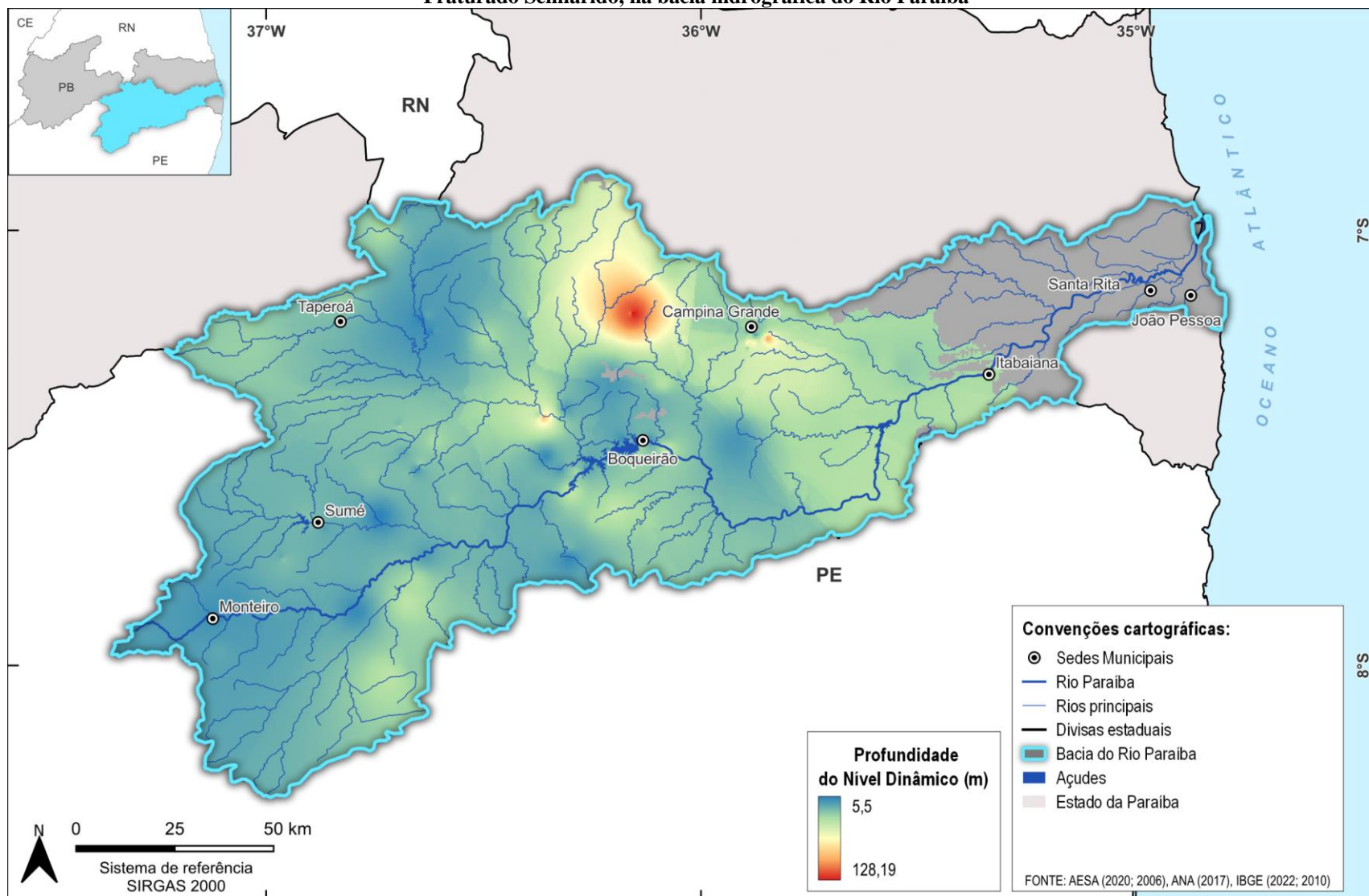
Fonte: AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.77 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Estáticos dos poços tubulares do sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba



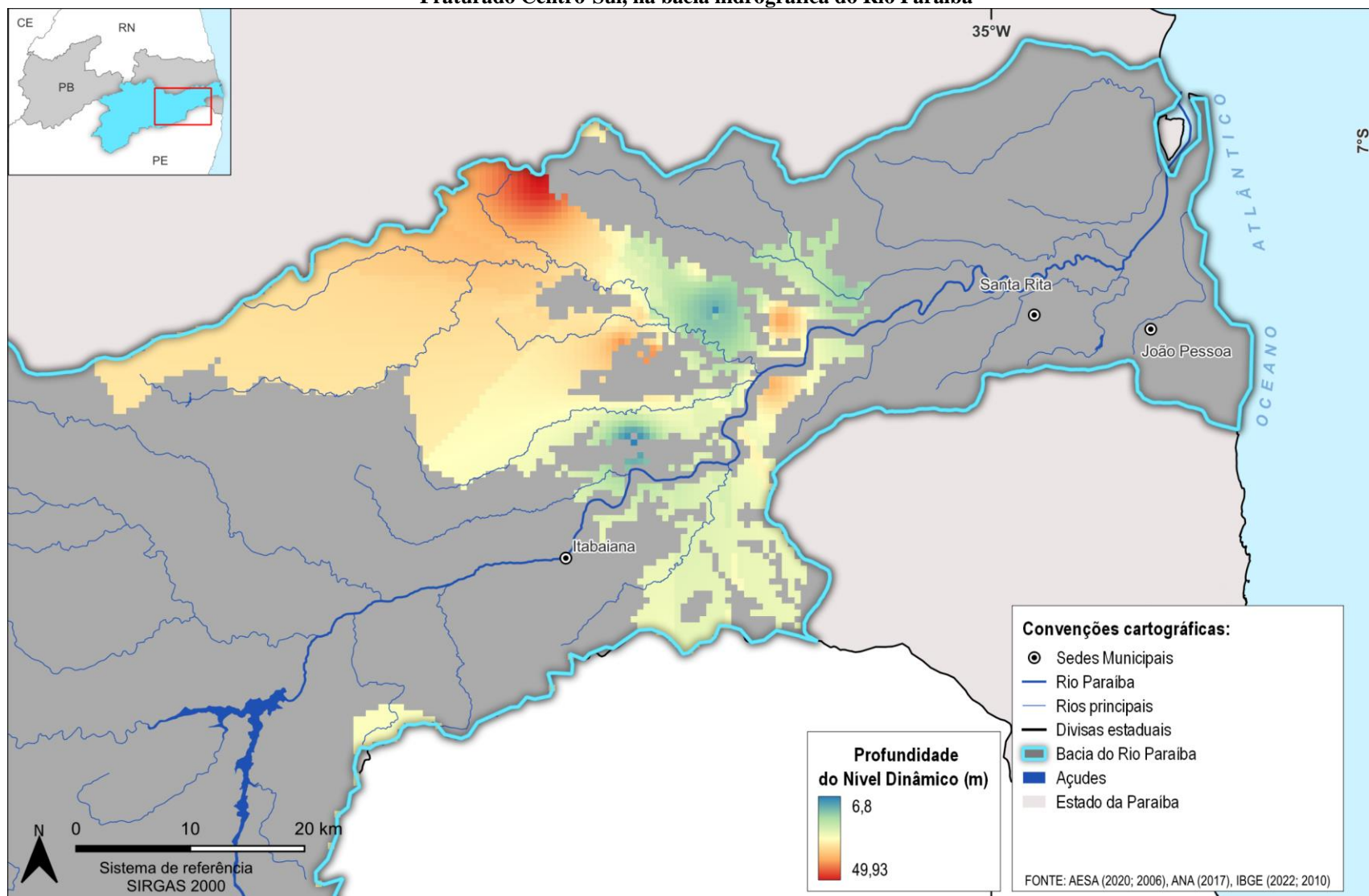
Fonte: AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.78 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Dinâmicos dos poços tubulares do sistema aquífero Fraturado Semiárido, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba



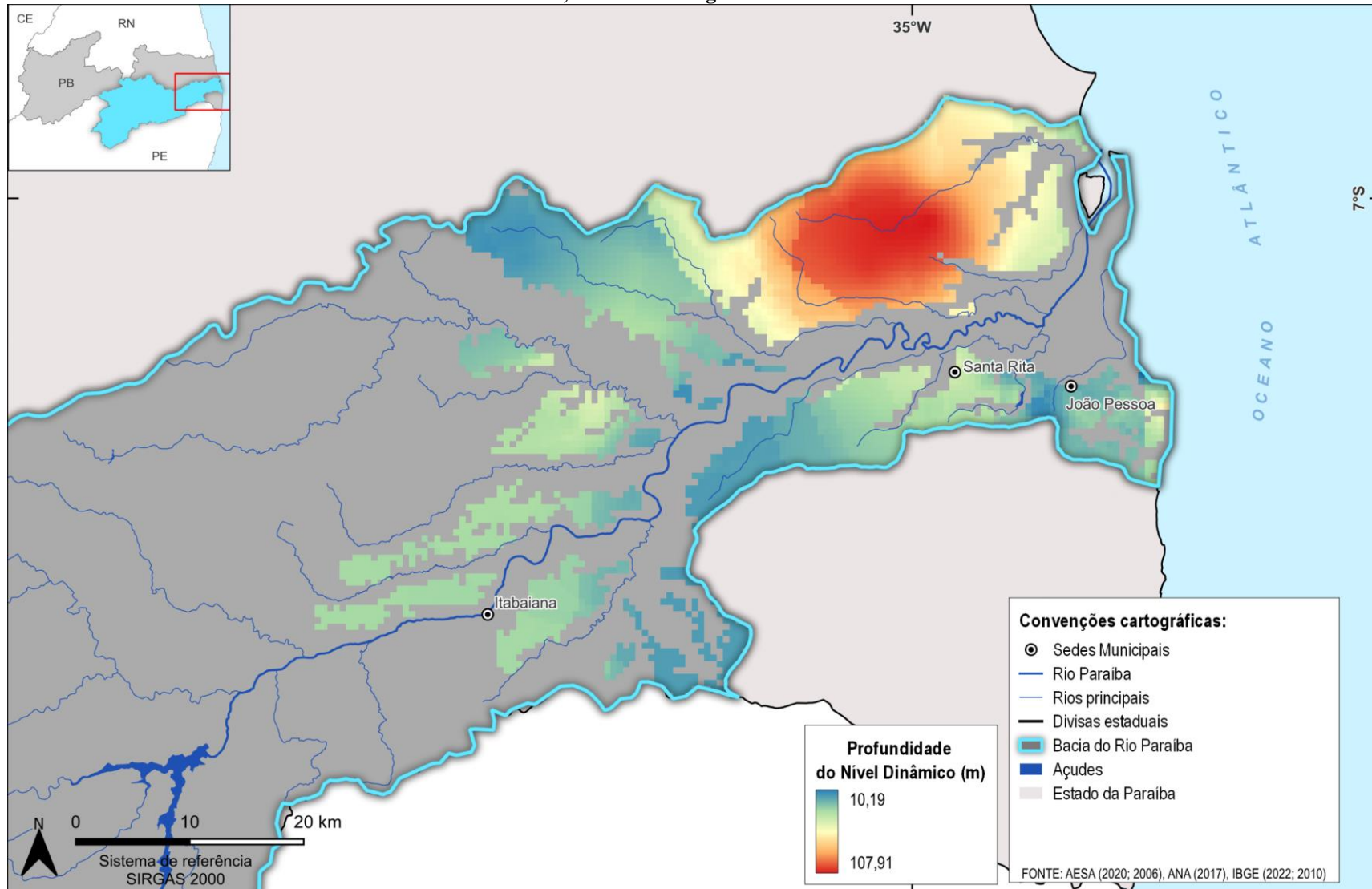
Fonte: AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.79 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Dinâmicos dos poços tubulares do sistema aquífero Fraturado Centro-Sul, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba



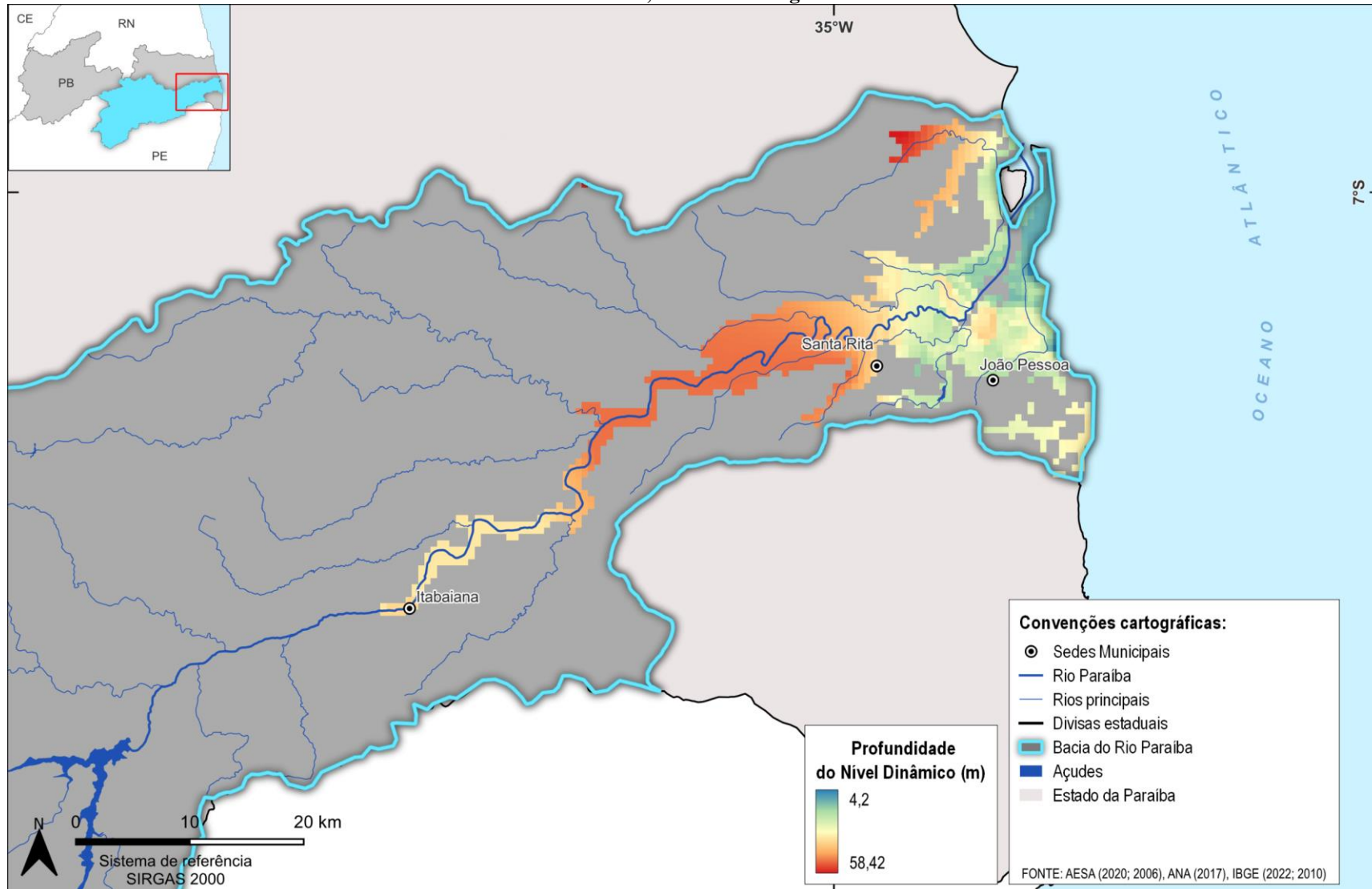
Fonte: AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.80 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Dinâmicos dos poços tubulares do sistema aquífero Barreiras, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba



Fonte: AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.81 - Superfície Potenciométrica representando as Cotas (em relação ao nível médio do mar) dos Níveis Dinâmicos dos poços tubulares do sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste, na bacia hidrográfica do Rio Paraíba



Fonte: AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

4.5.3 Dados Hidrogeológicos de Vazão

A Tabela 4.20 retrata a vazão de estabilização de todos os sistemas aquíferos, a depender de sua hierarquia e agrupamento regional ou não de formações geológicas hidráulicas semelhantes.

Por vazão de estabilização entende-se a vazão obtida geralmente após a sondagem e instalação de um poço tubular profundo de exploração, decorrente da realização de um ensaio de bombeamento, que durante um número específico de horas - em média não inferior a 12 horas e superior a 48 horas - mantém a profundidade do nível dinâmico da água subterrânea estabilizado no interior do poço, sob um regime de vazão também estabilizado, em m³/h.

Tabela 4.20 - Dados de vazão de estabilização (m³/h)

| Vazão de Estabilização (m ³ /h) | | | | |
|--------------------------------------------|--------|--------|-------|---------|
| Sistemas | Máximo | Mínimo | Média | Mediana |
| Barreiras | 160,00 | 0,20 | 19,37 | 10,00 |
| Campos Novos | 8,35 | 0,46 | 3,85 | 3,99 |
| Faturado Centro-Sul | 13,30 | 0,28 | 2,51 | 2,00 |
| Faturado Semiárido | 24,00 | 0,01 | 2,54 | 1,80 |
| Litorâneo Nordeste-Sudeste | 210,00 | 0,30 | 31,39 | 15,00 |

Fonte: SIAGAS (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Já a Tabela 4.21 retrata a vazão específica, que reporta a vazão obtida por unidade métrica de poço, em razão do rebaixamento da água subterrânea no interior do poço entre o início do teste, considerando para tanto a profundidade do nível estático da água, e o fim do teste de bombeamento, considerando a profundidade do nível dinâmico em bombeamento.

Esta unidade de vazão específica, em m³/h/m, dá uma ideia mais real e precisa da capacidade produtiva do poço do que a própria vazão estabilizada, servindo de base para a comparação de produção entre poços e entre distintos sistemas aquíferos.

Tabela 4.21 - Dados de vazão específica (m³/h/m)

| Vazão Específica (m ³ /h/m) | | | | |
|----------------------------------------|--------|--------|-------|---------|
| Sistemas | Máximo | Mínimo | Média | Mediana |
| Barreiras | 15,00 | 0,01 | 1,31 | 0,86 |
| Campos Novos | 1,99 | 0,02 | 0,95 | 0,67 |
| Faturado Centro-Sul | 2,00 | 0,02 | 0,36 | 0,17 |
| Faturado Semiárido | 21,18 | 0,00 | 0,45 | 0,14 |
| Litorâneo Nordeste-Sudeste | 25,00 | 0,01 | 2,28 | 1,27 |

Fonte: SIAGAS (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Antes de se discorrer sobre os valores obtidos, cabe destacar que ambas as tabelas apresentam os valores médios de vazão - estabilizada e específica - além dos valores da mediana.

Estatisticamente os valores médios representam onde se concentram os dados de uma distribuição como o ponto de equilíbrio das frequências em um histograma (o que popularmente pode-se dizer que nada mais é do que a soma de todos os valores da variável, soma está dividida pelo número de valores), podendo ser uma média aritmética, geométrica ou harmônica,

enquanto que a mediana é o valor que separa a metade maior e a metade menor de uma amostra, ou seja, pode ser o valor do meio de um conjunto de dados.

Para dados hidráulicos de poços, ou mesmo de qualidade da água, por vezes sugere-se a adoção da mediana, porque esta pode dar uma noção melhor de um valor típico, uma vez que não é distorcida por valores extremamente altos ou baixos, que normalmente são comuns em dados hidrogeológicos, como “pontos fora de série” (chamados também de *outliers*) ou melhor, extremamente fora do contexto regional.

Ao se analisar, portanto, os dados de vazão de estabilização, pode-se verificar que os valores máximos e mínimos variam significativamente, mas em boa parte dos domínios, a média e a mediana demonstram grandezas aproximadas, com exceção dos Sistemas Aquíferos Barreiras e Litorâneo Nordeste-Sudeste, onde as grandezas entre ambas se alteram em aproximadamente 50%.

Tal variação está nitidamente ligada ao fato destes sistemas aquíferos serem sedimentares, e onde os valores medianos de estabilização - de cerca de cinquenta por cento inferiores aos valores médios - acabam por caracterizar que existem muitas variações regionais nos dados de vazão dentro de um mesmo sistema aquífero, com poços de altíssima vazão e outros de baixa vazão, decorrentes da heterogeneidade portanto dos ambientes sedimentares, como melhor descrito abaixo.

Estas dissonâncias estatísticas são então correlacionadas ao conteúdo geológico sedimentar em cada local, como a proporção entre areais, siltes e argilas (e sua respectiva maior ou menor condutividade hidráulica) e representam, portanto, o meio físico de cada aquífero e a diferenciação estratigráfica entre estas formações geológicas hospedeiras dos aquíferos, tomando por base, além dos sedimentos que a compõem, também o seu empacotamento e a continuidade lateral dos estratos sedimentares, além da organização tectono-estrutural vigente, e que pode apresentar particulares nem sempre mapeados.

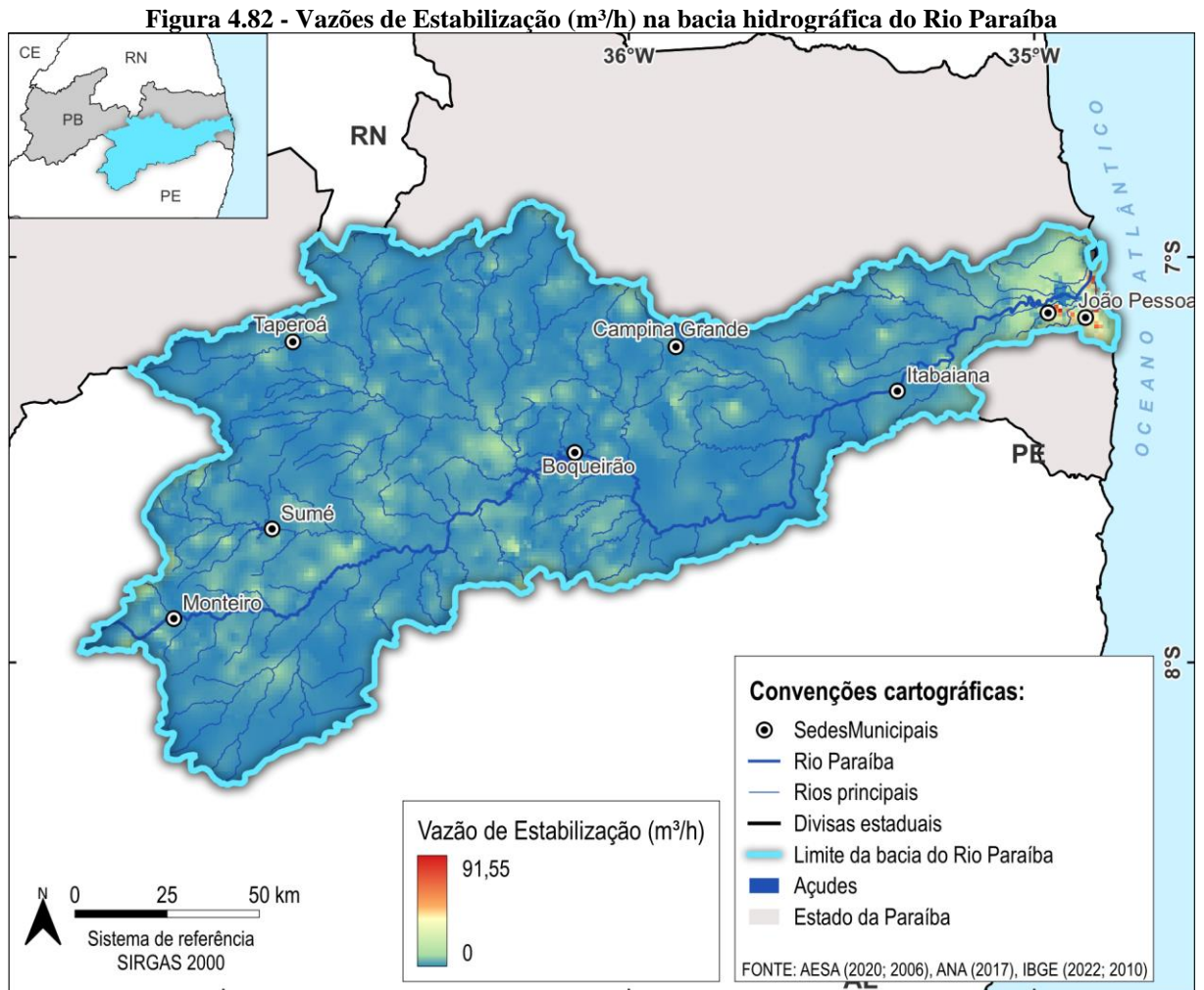
Como já citado anteriormente, a vazão específica, em $m^3/h/m$, é a que melhor representa o potencial hidrogeológico e exploratório de um determinado aquífero. Desta forma, a partir do planilhamento do banco de dados do SIAGAS-CPRM - pode-se concluir que o Sistema Aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste - localizado estratigraficamente acima do Sistema Aquífero Barreiras - é o de melhor potencial, seguida pelo próprio Sistema Aquífero Barreiras, e pelo Sistema Aquífero Campos Novos, que tem por sua vez uma significativa menor expressão areal.

Cabe, entretanto, frisar que os custos perfuratórios da Formação Barreiras serão um pouco superiores, devido a sua maior profundidade, no entanto permitirão muito provavelmente de água de melhor qualidade, em especial em relação aos Depósitos Fluviolacustrinos pois estes podem conter camadas orgânicas, ou até mesmo níveis mais salobros nos deltas fluviais.

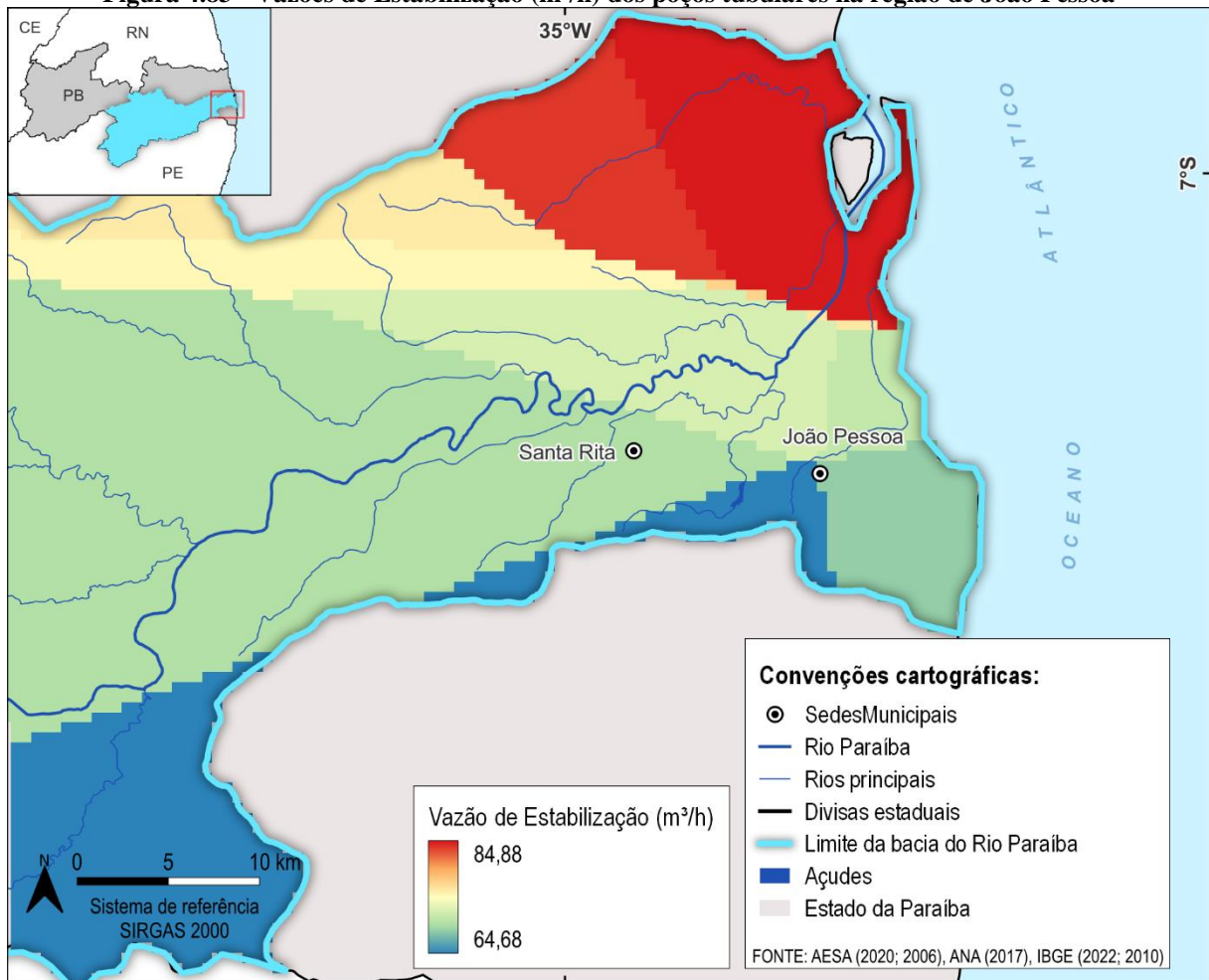
Como era de se esperar, os Sistemas Aquíferos Fraturado Centro-Sul e Fraturado Semiárido são os de menor potencial, devido a sua constituição geológica que os faz depender da porosidade

secundária tão somente, mas isto não impede de que sejam largamente utilizados, como pode ser visto pelo número de poços neles instalados.

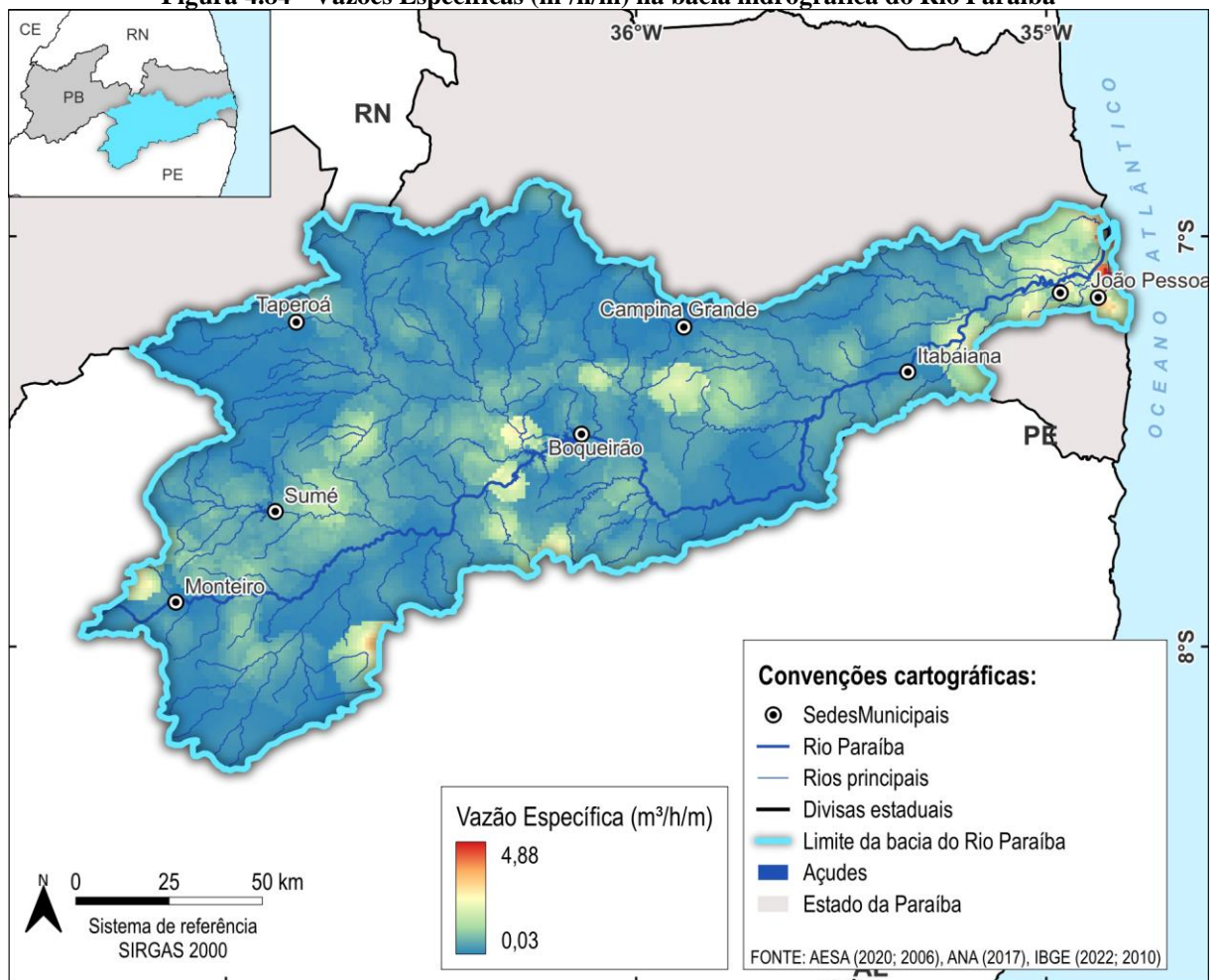
Da Figura 4.82 a Figura 4.85 a seguir são retratadas em planta, as vazões de estabilização, em $m^3/hora$, e as vazões específicas, em $m^3/h/metro$. As interpolações foram feitas em krigagem e o resultado “pixelado” reflete a baixa malha de poços para uma área grande de interpolação, sendo a opção por não utilizar um suavizador apenas na aproximação para a região, o que também seria viável, porém refletiria dois padrões de apresentação diferentes.



Fonte: SIAGAS (2024), adaptado por Cobrape (2024).

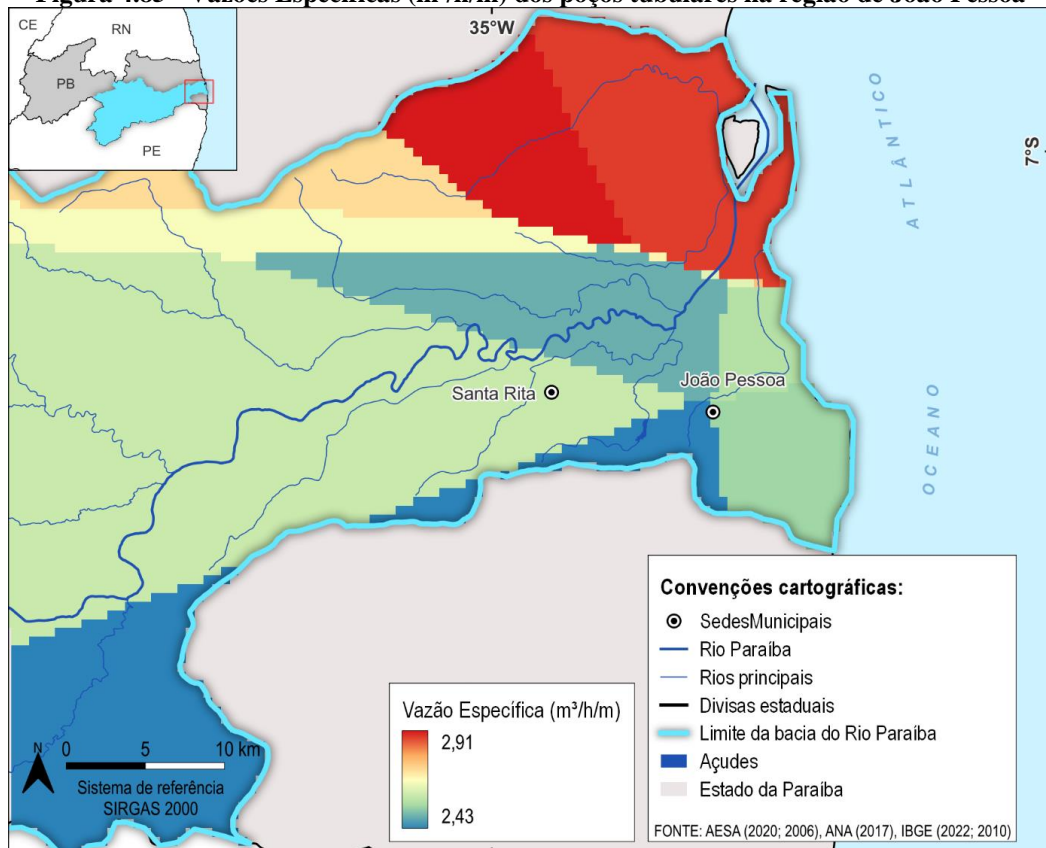
Figura 4.83 - Vazões de Estabilização (m^3/h) dos poços tubulares na região de João Pessoa

Fonte: SIAGAS (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.84 - Vazões Específicas ($m^3/h/m$) na bacia hidrográfica do Rio Paraíba

Fonte: SIAGAS (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.85 - Vazões Específicas ($m^3/h/m$) dos poços tubulares na região de João Pessoa



Fonte: SIAGAS (2024), adaptado por Cobrape (2024).

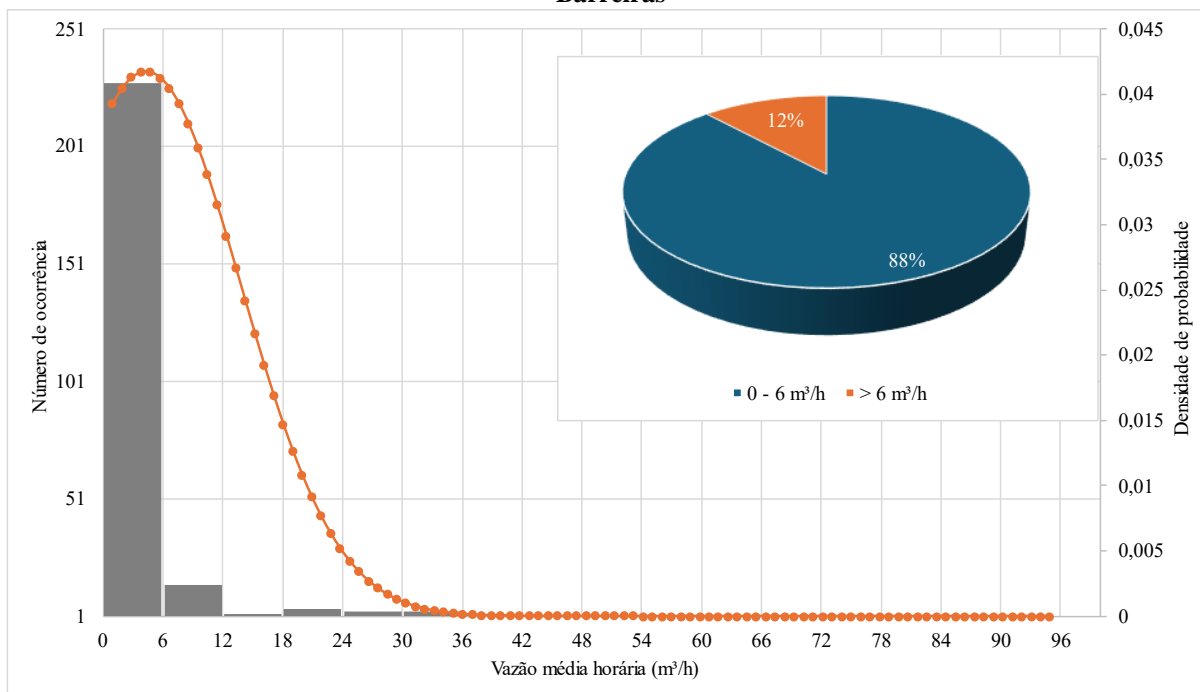
4.5.3.1 Análise Estatística da Vazão Média Horária

A análise da circulação hídrica subterrânea é fundamental para a gestão integrada dos recursos hídricos. A inclusão das reservas subterrâneas nos sistemas de gestão é essencial para garantir um uso sustentável e eficiente dos recursos hídricos disponíveis. Compreender a dinâmica das águas subterrâneas permite uma melhor avaliação da disponibilidade hídrica, além de favorecer a implementação de políticas públicas mais eficazes e integradas.

Nesse contexto optou-se por analisar as vazões médias horárias dos poços do banco de dados da AESA por meio de histogramas, os quais apresentam a relação entre a frequência com que ocorre essas vazões dentre um intervalo de classes, juntamente com a distribuição log normal. Nessa curva, o ponto mais alto representa o valor que mais aparece na base de dados, os outros pontos representam a soma ou subtração do desvio padrão em relação à média. Cada faixa desses valores representa uma certa probabilidade de ocorrência.

A Figura 4.86 representa o histograma característico dos dados de vazão média horária outorgados dos poços cadastrados no banco de dados da AESA para o Sistema Aquífero Barreiras. Nota-se que 88% dos poços possuem vazão média entre 0 e 6 m^3/h . As maiores vazões na região alcançam aproximadamente 96 m^3/h . Pela curva de distribuição normal pode-se concluir que a probabilidade de ocorrência é maior para valores inferiores à 30 m^3/h .

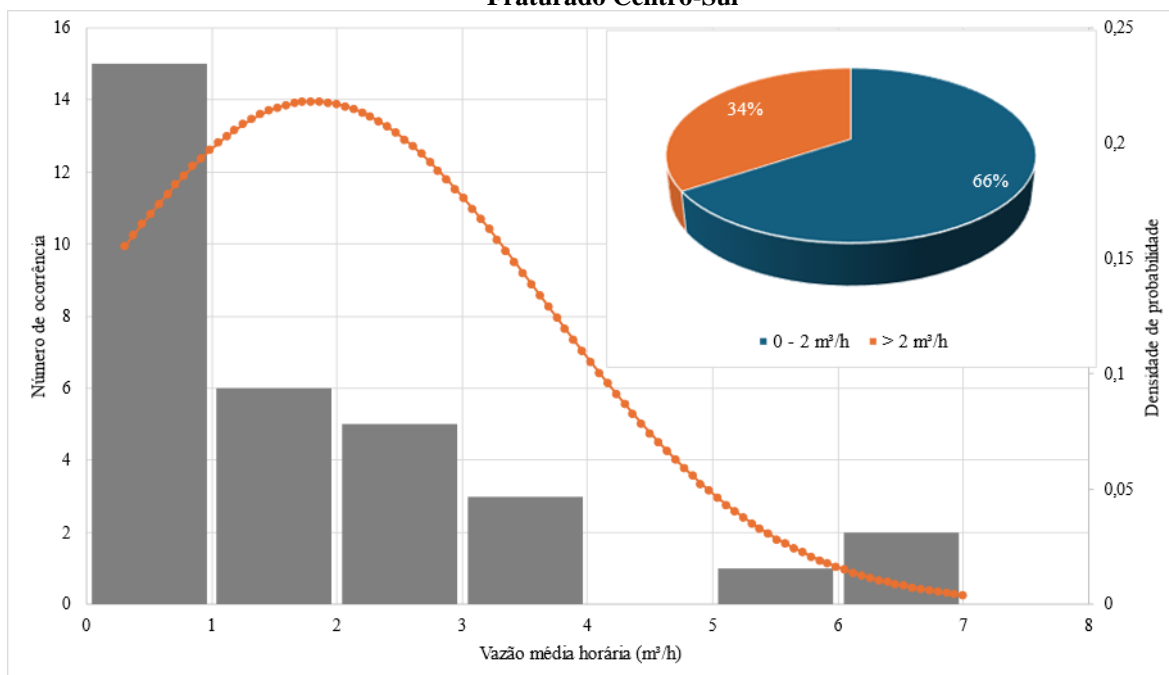
Figura 4.86 – Histograma log normal da vazão média horária para os poços do Sistema Aquífero Barreiras



Fonte: AESA (2024).

No sistema aquífero Fraturado Centro-Sul, 66% dos poços possuem vazões média horária entre 0 e 2 m³/h, e os 34% restantes possuem vazões com 2 m³/h. As maiores vazões registradas foram de 7 m³/h, mas são as de menores probabilidade de ocorrência. Esses dados podem ser verificados estatisticamente na Figura 4.87.

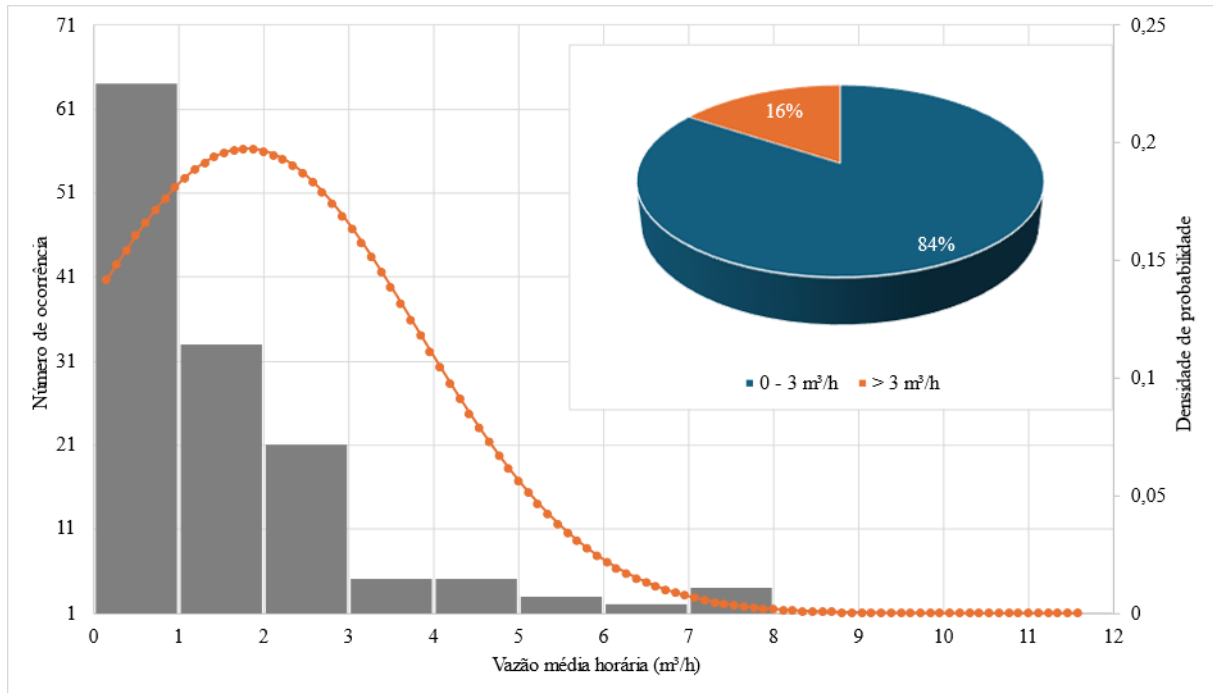
Figura 4.87 - Histograma log normal da vazão média horária para os poços do Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul



Fonte: AESA (2024).

A Figura 4.88 apresenta a relação entre o número de ocorrências das vazões médias horárias para um intervalo de classes de 1 m³/h nos limites do sistema aquífero Fraturado Semiárido. Nessa análise, 84% dos poços possuem vazões menores que 3 m³/h, sendo que a maior parte está entre 0 e 1 m³/h. Os maiores valores de vazão alcançam aproximadamente 12 m³/h, mas a probabilidade de ocorrência é maior apenas para valores inferiores à 7 m³/h.

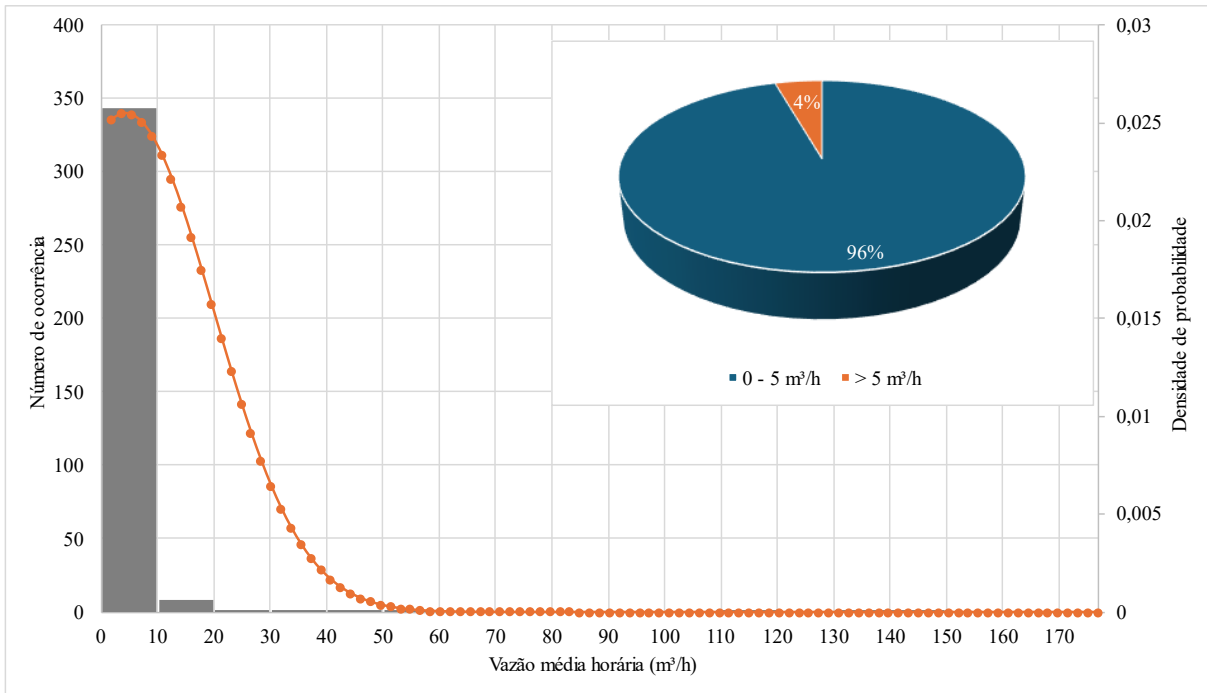
Figura 4.88 - Histograma log normal da vazão média horária para os poços do Sistema Aquífero Fraturado Semiárido



Fonte: AESA (2024).

O sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste é o que apresenta os maiores valores de vazão, alcançando valores até 177 m³/h. Contudo, os valores de vazão estão concentrados em valores inferiores à 5 m³/h, com 96% da totalidade dos poços. Apenas 4% têm vazões superiores à 5 m³/h, e, portanto, as maiores probabilidades de ocorrências são bem inferiores ao valor máximo registrado. O histograma desse sistema aquífero está apresentado na Figura 4.89.

Figura 4.89 - Histograma log normal da vazão média horária para os poços do Sistema Aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste



Fonte: AESA (2024).

Em geral, percebe-se que os valores de vazão média horária para a região da Bacia do Rio Paraíba se concentram em valores inferiores à 6 m³/h, sendo que nos sistemas aquíferos Litorâneo Nordeste-Sudeste e Barreiras possuem alguns poços com registros mais elevados de vazão. A probabilidade de ocorrência das vazões médias em todos os casos é inferior à 50 m³/h. Os sistemas aquíferos Fraturado Centro-Sul e Fraturado Semiárido possuem vazões médias horárias menores, com valores máximos até 12 m³/h.

4.5.4 Perfil Construtivo

A produtividade de um poço de água subterrânea é um parâmetro essencial para análise da exploração dos aquíferos, portanto, os poços devem ser projetados e construídos visando alcançar a sua capacidade produtiva máxima (Vidal *et al.*, 2001). Nesse contexto, o perfil construtivo de um poço surge como uma importante ferramenta para garantir sua eficiência e longevidade, maximizando a capacidade produtiva do poço.

O perfil construtivo deve informar todos os dados referentes à perfuração do poço, permitindo visualizar os procedimentos e materiais utilizados, além de suas especificações e procedimentos de acabamento. (Albrecht *et al.*, 2005). Ainda, é um documento obrigatório para a obtenção de outorga de uso da água junto aos órgãos competentes. Em geral, os perfis construtivos são compostos por: código do poço, método de perfuração, croquis, diâmetros, revestimento, profundidade, filtro, pré-filtro, cimentação e laje.

O banco de dados da AESA (2024) oferece dados sobre 816 poços e suas localizações. No contexto dos perfis construtivos, os dados existentes são sobre o revestimento e a profundidade dos poços. Ademais, será apresentado um resumo das informações disponíveis.

4.5.4.1 Revestimento

O revestimento dos poços depende das condições locais a que será submetido e representa a estrutura do poço. Para os poços localizados dentro dos limites do PRH-RPB, a maioria tem seu revestimento de PVC, com aproximadamente 3% apenas sendo de outro tipo de material. Cabe ressaltar que dentre os poços existentes, 194 não possuem informações de revestimento. Os tipos dos materiais usados nos poços da região, bem como seus diâmetros, estão apresentados na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 - Revestimentos dos poços perfurados na região do PRH-RPB

| Tipo de revestimento | Diâmetro | Poços (Unid.) |
|----------------------|----------|---------------|
| Aço | 6" | 1 |
| Argila | 4" | 4 |
| PVC | 4'' | 153 |
| | 4,5'' | 46 |
| | 4,6" | 1 |
| | 5'' | 69 |
| | 6'' | 308 |
| | 8'' | 23 |
| UPVC | 4'' | 4 |
| | 4,5'' | 2 |
| | 6'' | 6 |
| | 8" | 3 |
| S/I | S/I | 2 |
| | | 194 |

Fonte: AESA (2024).

4.5.4.2 Profundidade

Conforme dados da AESA (2024) existem na região da Bacia do Rio Paraíba 816 poços. A profundidade dos mesmos varia entre 4 e 343 metros, sendo que a maioria está localizado entre 30 e 60 metros de profundidade. A determinação da profundidade adequada é essencial, uma vez que afeta diretamente na capacidade da produção do poço (Albrecht *et al.*, 2005). Na Tabela 4.23 são apresentadas as quantidades de poços por faixa de profundidade.

Tabela 4.23 - Profundidade dos poços perfurados na região do PRH-RPB

| Profundidade (m) | Poços (Unid.) |
|------------------|---------------|
| < 10 | 42 |
| de 10 a 20 | 31 |
| de 20 a 30 | 66 |
| de 30 a 40 | 129 |
| de 40 a 50 | 112 |
| de 50 a 60 | 101 |
| de 60 a 70 | 22 |
| de 70 a 80 | 12 |
| de 80 a 90 | 12 |
| de 90 a 100 | 6 |
| de 100 a 200 | 85 |
| de 200 a 300 | 8 |
| > 300 | 2 |
| Sem Informação | 188 |

Fonte: AESA (2024).

As informações de revestimento e profundidade dos poços estão representadas espacialmente na Figura 4.90. Nota-se que a maioria dos poços está localizada na região metropolitana de João

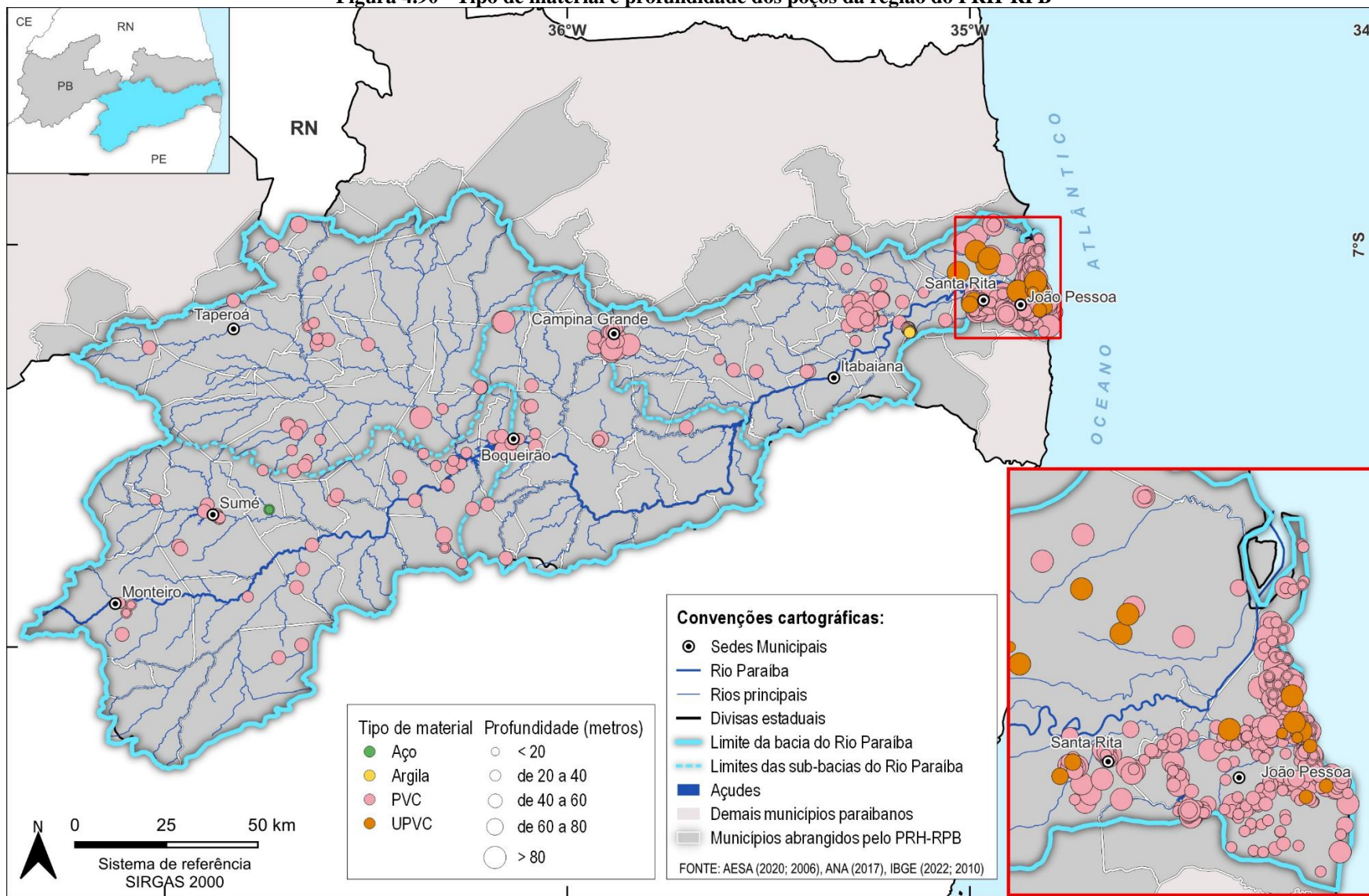
Pessoa, apresentando profundidades variadas que abrangem todas as faixas de classificação, sendo que poços em aquíferos confinados tendem a ser mais profundos, enquanto aqueles em aquíferos livres são mais rasos. Analisando a distribuição da profundidade dos poços nos municípios de João Pessoa, Santa Rita, Bayeux e Cabedelo, temos que:

- 10% dos poços têm profundidade até 10 metros;
- 25% dos poços têm profundidade até 30 metros;
- 50% dos poços têm profundidade até 40 metros;
- 75% dos poços têm profundidade até 62 metros; e
- 90% dos poços têm profundidade até 120 metros.

Essa distribuição é assimétrica, com uma cauda mais longa à direita, indicando que há alguns poços com profundidades muito maiores do que a média, que representam os poços confinados.

A maior parte dos poços possui revestimento de PVC, sendo que os de UPVC estão concentrados no Baixo Paraíba. Em Campina Grande, o segundo maior centro urbano da região da Bacia do Rio Paraíba, há uma notável concentração de poços, todos com revestimento de PVC. Na sub-bacia do Taperoá, a profundidade dos poços geralmente não ultrapassa 80 metros, com exceção de um que excede essa medida. Na região do Alto Paraíba nota-se a concentração dos poços na calha do rio principal e nas proximidades do Açude Boqueirão.

Figura 4.90 - Tipo de material e profundidade dos poços da região do PRH-RPB



4.5.5 Dados Hidrogeológicos de Uso das Águas Subterrâneas

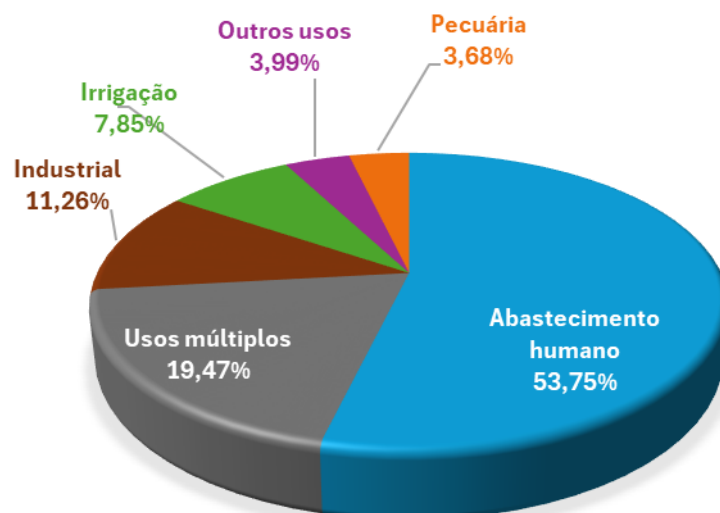
Para compor uma base robusta que mostre a destinação da água extraída dos poços na Bacia do Rio Paraíba, foi realizada uma composição com as informações disponíveis no banco de dados federal do SIAGAS - CPRM (Serviço de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico Brasileiro), no banco de dados estadual com o cadastro de outorgas da AESA, e no banco de dados dos Estudos Hidrogeológicos (AESA, 2024).

Para análise dos dados foram considerados apenas os poços com informações disponíveis de finalidade de uso, sendo que o banco de dados do SIAGAS retornou um total de 982 poços tubulares, já o banco de dados da AESA apresentou 816 poços e os Estudos Hidrogeológicos identificou 541 poços.

Também foi realizada uma análise de sensibilidade que buscou identificar dentre as três fontes de dados, quais seriam os poços que estariam sendo duplicados ou triplicados, aparecendo em mais de uma fonte de informação. Para isso, foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento e análises de similaridade de campos. Na ordem de prioridade, optou-se por utilizar os dados dos Estudos Hidrogeológicos como primeira opção, por serem mais recentes, complementando as áreas não atendidas por esse estudo com dados da AESA e do SIAGAS. A compilação desses dados resultou em um banco de dados contendo 2.255 poços tubulares, que foram analisados para a Bacia do Rio Paraíba e subdivididos pelos sistemas aquíferos presentes na área de estudo.

Na Figura 4.91 e na Tabela 4.24 pode ser observado que o abastecimento humano é o que predomina dentre os tipos de uso da água com cerca de 53,75%, seguido pelos usos múltiplos (19,47%) e da irrigação (7,85%). Nota-se que o número de poços com finalidade de abastecimento urbano e industrial estão concentrados na maior parte no sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste onde localiza-se a capital do estado, João Pessoa. Além disso, poços com finalidade exclusiva de pecuária estão localizados no Fraturado Semiárido. Cabe destacar que para o sistema aquífero Campos Novos não foram identificados poços com dados de uso da água.

Figura 4.91 - Percentual por tipo de uso em toda a Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba



Fonte: SIAGAS (2024), AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Tabela 4.24 - Domínio hidrogeológico x tipo de uso x número de poços

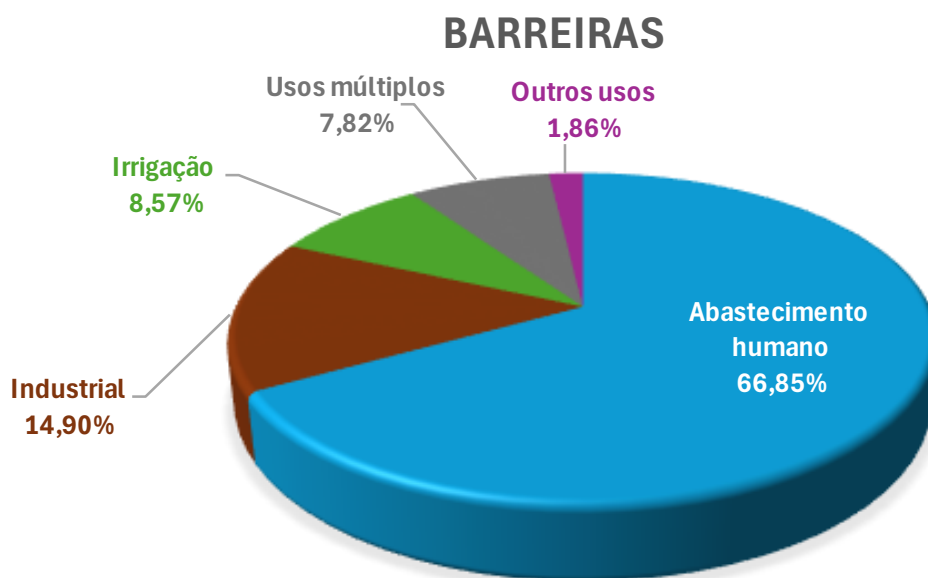
| Uso da Água (Unid.) | Fraturado Centro-Sul | Fraturado Semiárido | Litorâneo Nordeste-Sudeste | Barreiras |
|-----------------------------|----------------------|---------------------|----------------------------|------------|
| Abastecimento humano | 33 | 279 | 541 | 359 |
| Industrial | 6 | 48 | 120 | 80 |
| Irrigação | 29 | 99 | 3 | 46 |
| Pecuária | 0 | 83 | 0 | 0 |
| Usos múltiplos | 27 | 339 | 31 | 42 |
| Outros usos | 4 | 42 | 34 | 10 |
| Total | 99 | 890 | 729 | 537 |

Fonte: SIAGAS (2024), AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Destaca-se que, apesar do Sistema Aquífero Fraturado Semiárido ser um dos menos favoráveis à exploração, seu significativo superior número de poços em relação aos outros sistemas aquíferos da bacia hidrográfica se deva principalmente à sua maior extensão em área, que é 17 vezes maior do que a dos sistemas Fraturado Centro-Sul e Barreiras, e 50 vezes superior ao sistema aquífero Nordeste-Sudeste.

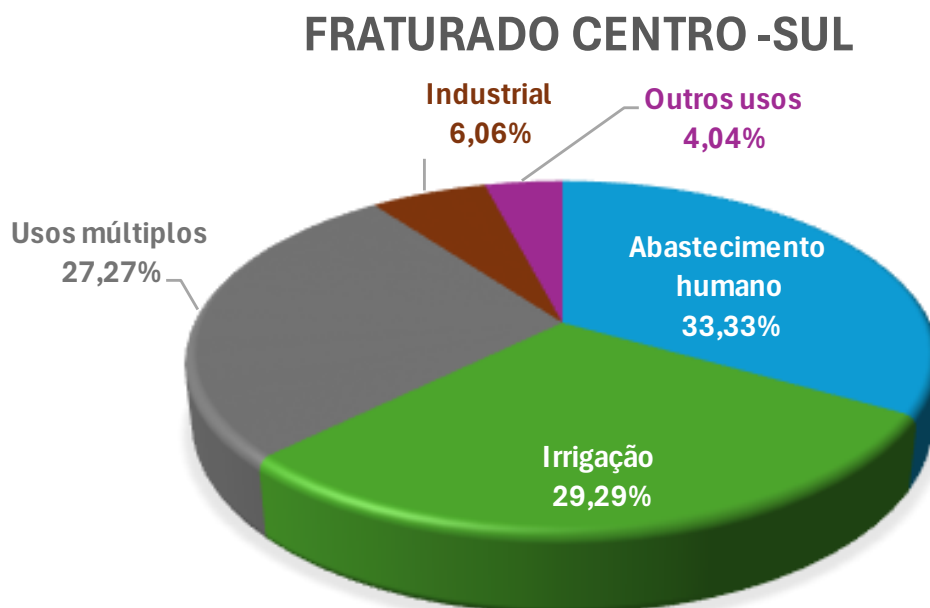
Os gráficos a seguir retratados na Figura 4.92 a Figura 4.95 mostram os valores da planilha acima, separados em percentual por Sistema Aquífero, de forma a facilitar a visualização individual de cada um e suas particularidades.

Figura 4.92 - Percentual por tipo de uso, individualizados por Sistema Aquífero - Barreiras



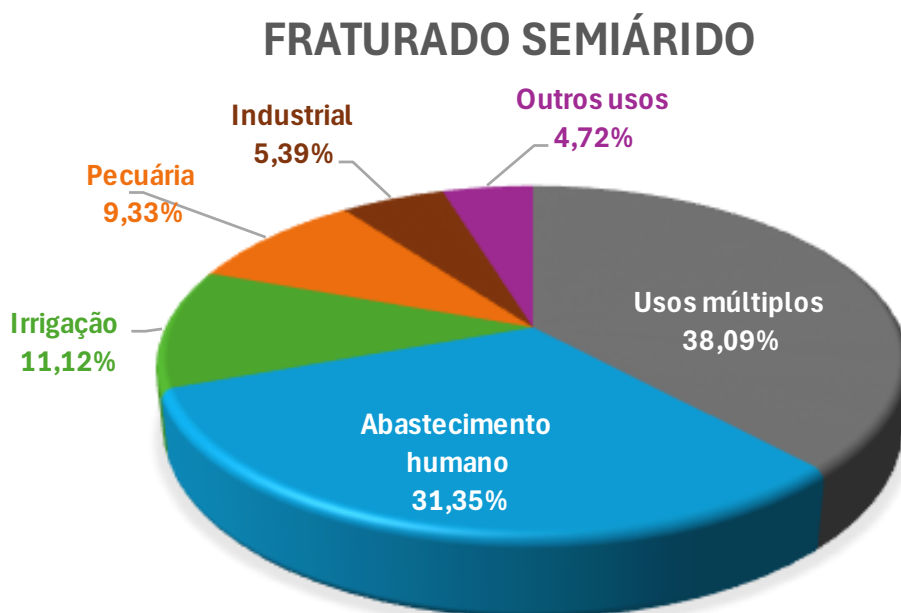
Fonte: SIAGAS (2024), AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.93 - Percentual por tipo de uso, individualizados por Sistema Aquífero - Fraturado Centro-Sul



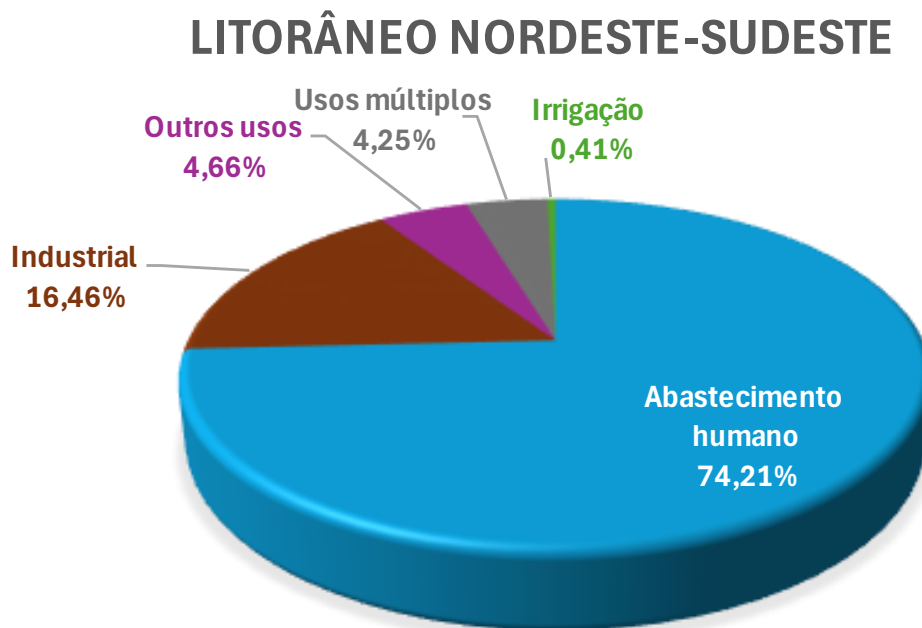
Fonte: SIAGAS (2024), AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.94 - Percentual por tipo de uso, individualizados por Sistema Aquífero - Fraturado Semiárido



Fonte: SIAGAS (2024), AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.95 - Percentual por tipo de uso, individualizados por Sistema Aquífero - Litorâneo Nordeste-Sudeste



Fonte: SIAGAS (2024), AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

4.5.6 Cálculo da Disponibilidade Hídrica Subterrânea

Antes do detalhamento da metodologia empregada, é sempre importante destacar que as reservas hídricas subterrâneas - sejam elas renováveis ou seculares - estão armazenadas em sistemas aquíferos, que são formações subterrâneas resultantes da junção de ambientes geológicos com natureza constituinte e respectivas características hidráulicas similares, e que possuem capacidade para armazenar e permitir a migração da água subterrânea através de sua parte permeável, seja ela representada pela chamada porosidade primária, vinculada aos poros da própria rocha, ou da porosidade secundária, resultante da existência de falhas e/ou fissuras, ou em espaços provenientes da dissolução química, como num ambiente cárstico por exemplo.

Também é relevante frisar que estas reservas de água subterrânea, em especial as mais superficiais, denominadas de “reserva ativa”, são essenciais muitas vezes para a manutenção do regime hídrico e das vazões de base dos cursos d’água superficiais, em especial nos períodos sem chuva e que resultam em estiagem; sendo também de fundamental importância para o abastecimento, seja ele público ou privado, como em indústrias ou propriedades rurais.

Partindo dessas premissas e em acordo a variadas pesquisas já efetivadas, apesar de que seja possível ser utilizado nos dimensionamentos da reserva explorável, de um pequeno percentual da reserva secular ou permanente - localizada de forma subterrânea por sob a reserva ativa ou reguladora, e que também acaba sendo abastecida por esta via drenança vertical - estudos mais atuais realizados em diversos estados, além da própria ANA, tem sugerido a utilização de somente uma parte da reserva ativa, visando um uso mais racional e de longo prazo aos recursos hídricos subterrâneos.

O seguimento desta recomendação permite uma maior margem de segurança nos balanços hídricos que envolvem conjuntamente as parcelas subterrâneas e superficiais, pois comumente as outorgas de superfície possuem vazões de referência que se referenciam na vazão de base superficial, que por sua vez é mantida comumente pela própria reserva ativa subterrânea, já que a mesma é mais superficial.

Neste sentido, a metodologia que foi utilizada para o cálculo da reserva ativa (Costa, 1998; ANA, 2014) dos sistemas aquíferos presentes na área de estudos é lastreada em dados pluviométricos e coeficientes de infiltração, para os distintos tipos geológicos e respectivos ambientes hidrogeológicos que compõe cada domínio hidrogeológico, uma vez que o volume de chuva percolado pelo solo superficial em direção aos aquíferos subjacentes é denominado pela ANA de RPD - Recarga Potencial Direta.

Desta forma, inicialmente foram obtidos os dados disponíveis de chuva existentes para esta região da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. Superfícies com valores de precipitações médias anuais (mm) foram criadas visando subsidiar os cálculos da recarga subterrânea em determinado sistema aquífero. Para tanto, a utilização dos respectivos coeficientes de infiltração (CI) médios referentes a cada domínio hidrogeológico foi então necessário, sendo utilizados os valores já planilhados pela ANA, no relatório intitulado “Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, 2013”, bem como algumas proposições baseadas na literatura técnica ou de forma empírica, mas mantendo-se o bom senso quanto à sua grandeza, quando em referência aos materiais geológicos que compõe a área de análise.

Por Coeficiente de Infiltração entende-se então a parcela dos eventos pluviométricos que de fato infiltra no solo e subsolo, indo compor as reservas subterrâneas. Assim, em acordo aos Sistemas Aquíferos do presente estudo, e conforme ANA (2013), considerou-se para o Sistemas Aquíferos Fraturado Semiárido e Campos Novos, um coeficiente de infiltração (CI) de 0,5%, e para o Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul um CI de 4%. Já para os Sistemas Aquíferos Barreiras e Litorâneo Nordeste-Sudeste, se considerou um CI de 10%.

Esta diferenciação que pode ser considerada significativa, se tomarmos por base o CI de 0,5% dos sistemas aquíferos fraturados e de até 10% para os sistemas aquíferos Barreiras e Litorâneo, diz respeito justamente ao tipo de ambiente geológico no qual cada sistema aquífero está inserido, sendo nitidamente maior para os ambientes de rochas sedimentares, do que para os de rochas ígneas e metamórficas.

Os dados de precipitação foram obtidos a partir das séries de chuvas disponibilizadas pelo Hidroweb, que compõe o banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), e que podem ser visualizados no endereço www.hidroweb.ana.gov.br.

Para a obtenção da superfície de precipitação total média anual, foi necessário primeiramente efetuar a análise quanto ao período de dados contidos em cada posto pluviométrico, sendo que apenas estações com no mínimo 20 anos de dados de precipitação - no intervalo compreendido pelos anos de 1994 a 2019 - foram consideradas no estudo.

Tal intervalo foi selecionado tomando também por base o utilizado pela ANA como modelo, nos estudos das reservas na área do Paranapanema (2014), bem como pela COBRAPE em outros estudos anteriores.

Conforme supracitado, os postos passaram por uma análise de consistência para a eliminação de falhas. Quando se verificou a existência de falha em um dia ou numa sequência de dias, foi considerada a influência de informações das estações vizinhas.

Este procedimento foi realizado através do método do inverso da distância ao quadrado, que atribui um valor ao ponto onde houve falha, baseando-se nos valores vizinhos, ponderados pelo inverso da distância ao quadrado, entre o ponto com falha e o ponto com informação. Foram considerados ponderadores para uma estação pluviométrica, as quatro estações pluviométricas mais próximas, sem falhas, distantes no máximo 5 km da estação em questão.

Para analisar a consistência dos dados pluviométricos após a etapa de preenchimento de falha, foi realizada uma avaliação diária nos dados tratados. Um dado diário é considerado inconsistente quando: (i) a precipitação diária num posto é maior que sua média mensal; (ii) a precipitação após um período de falhas é superior à sua média mensal, e (iii) a precipitação num posto apresente uma diferença superior a 50 mm em comparação com pluviômetros vizinhos.

Os dados de precipitação selecionados foram então interpolados através do método consagrado de interpolação “*Topo-to-Raster*” - especificamente desenvolvido para a criação de modelos de elevação digital do terreno (DEM), gerando superfícies hidrologicamente corretas - o qual foi escolhido por utilizar a técnica de interpolação por diferenças finitas, que combina a eficiência de uma interpolação local (por exemplo, o método do Inverso do Quadrado da Distância), com métodos de interpolação global que utilizam uma superfície de continuidade, como o interpolador *Kriging* (McCoy e Johnston, 2002).

As precipitações médias na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, individualizadas para cada um dos Sistemas Hidrogeológicos, em mm/ano, encontram-se listadas na Tabela 4.25 abaixo.

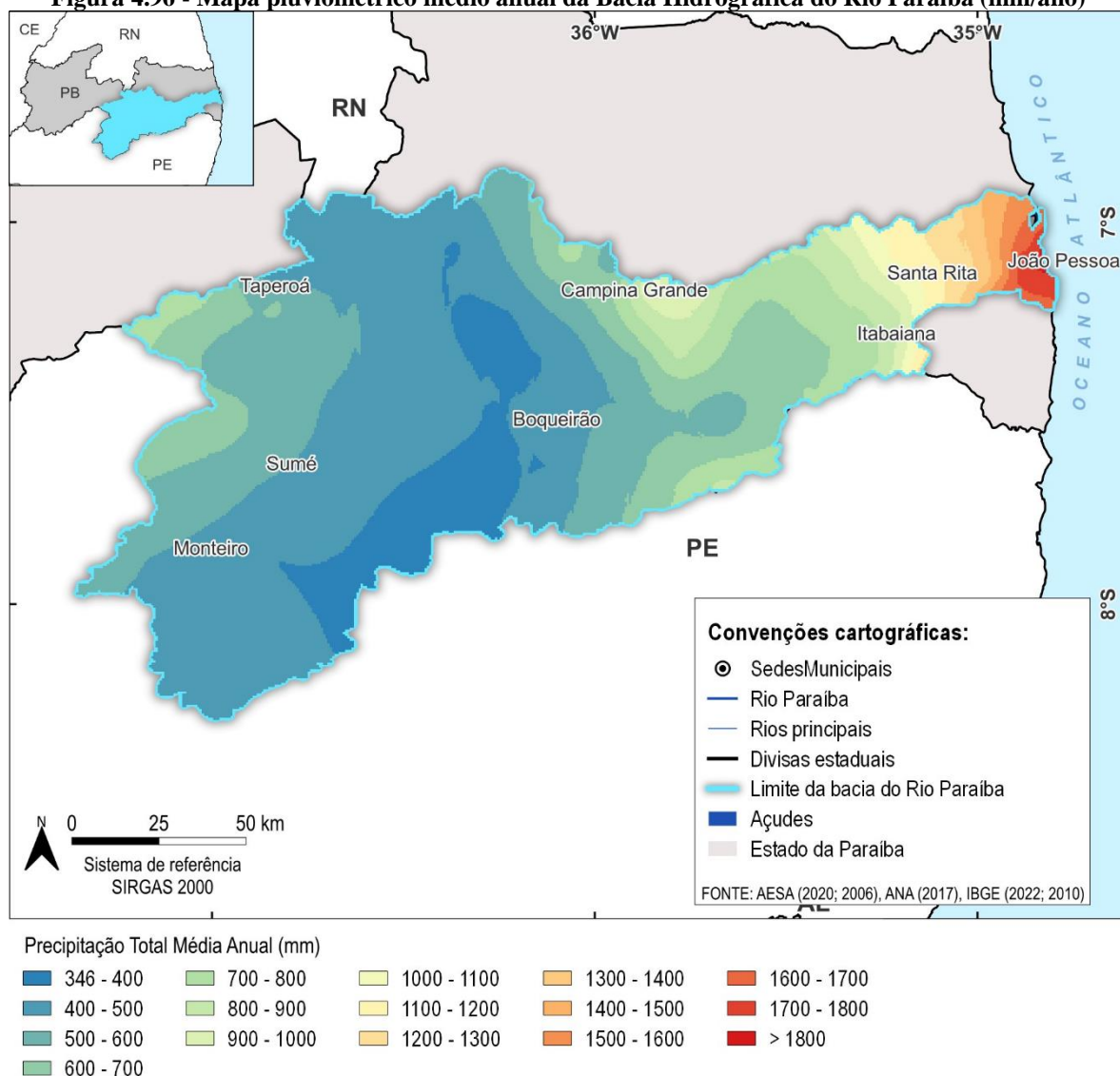
Tabela 4.25 - Precipitação por Domínio Hidrogeológico

| Sistema Aquífero | Prec. Média (mm/ano) |
|----------------------------|----------------------|
| Barreiras | 1.191 |
| Campos Novos | 453 |
| Faturado Centro-Sul | 856 |
| Faturado Semiárido | 517 |
| Litorâneo Nordeste-Sudeste | 1.420 |

Fonte: ANA (2024).

A Figura 4.96 a seguir apresenta o mapa da média pluviométrica anual para toda a bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Figura 4.96 - Mapa pluviométrico médio anual da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba (mm/ano)



Fonte: ANA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

No mapa de precipitação, fica também nítido que os volumes pluviométricos crescem de montante para jusante na bacia, o que, além dos CIs - coeficientes de infiltração - influenciam também sobremaneira os resultados de disponibilidade hídrica final, já que o presente estudo foca na parcela subterrânea denominada de “renovável”, parcela esta que está por sua vez diretamente vinculada à recarga hídrica por precipitação, conforme detalhado abaixo.

Partindo então dos dados pluviométricos já descritos, a metodologia utilizada considera que um percentual da precipitação se infiltra no solo, alcançando primeiramente os aquíferos livres superficiais, valendo-se para tanto de um Coeficiente de Infiltração (CI) específico para cada tipo de ambiente geológico, sendo que o restante não infiltrado compõe parte do chamado escoamento superficial (*run off*), bem como da evapotranspiração.

Como já abordado, os percentuais de CI não foram calculados *in situ*, mas sim obtidos da literatura técnica, neste caso em especial, do relatório da “Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil (ANA, 2013)”, visando a uniformidade dos resultados.

Em continuidade, a parcela da chuva que infiltra-se no solo e subsolo, passa a compor a chamada RPD (recarga potencial direta), que, conforme melhor detalhado nos próprios materiais técnicos da ANA, é composta por quatro componentes, assim chamadas: Q_b (escoamento de base dos rios em superfície); Q_p (extração proveniente dos poços); R_p (recarga profunda de aquíferos subjacentes) e CL (contribuição lateral), cabendo destacar que estas duas últimas não são consideradas no cálculo, por demandarem avaliações hidrogeológicas mais específicas e fora do contexto do estudo, podendo então a equação ser resumida da seguinte forma.

$$RPD = Q_b + Q_p \text{ (Eq. 1)}$$

Onde:

RPD = Recarga Potencial Direta (L/seg);

Q_b = escoamento de base (L/seg);

Q_p = vazão extraída dos poços (L/seg).

Na sequência, por sobre esta parcela da RPD aplica-se ainda um coeficiente de sustentabilidade, com base em critérios hidrológicos (CS) - como melhor descrito adiante - de forma que se possa chegar nos valores de disponibilidade hídrica final, descrita pela ANA como RPE - Reserva Potencial Explotável.

No projeto, optou-se somente pelo cálculo da RPE específica, em $L/s.km^2$, com fins à sua utilização nos balanços hídricos entre as parcelas superficial e subterrânea, não se descontando da mesma a vazão bombeada dos poços. De qualquer forma, adicionalmente foi realizada uma modelagem da relação entre a disponibilidade subterrânea (RPE - reserva potencial explotável) e a vazão outorgada, demonstrando qual o percentual do que “oficialmente” já está sendo utilizado da RPE.

Esta metodologia foi aplicada para a parcela renovável da recarga subterrânea, e para todos os Sistemas Aquíferos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, partindo da premissa de que a RPE - Reserva Potencial Explotável é tida como um percentual da RPD - Recarga Potencial Direta, que pode ser utilizada, de forma a não interferir nas vazões mínimas ecológicas e de referência para outorga. Tal premissa é importante sobretudo para os sistemas aquíferos sedimentares localizados mais a jusante da bacia, pois conforme avaliado, são os únicos que tem de fato correlação direta com os recursos hídricos superficiais em toda a área da bacia hidrográfica.

O cálculo da RPE - Reserva Potencial Explotável é por fim realizado através da seguinte forma:

$$RPE = RPD \times CS \text{ (Eq. 2)}$$

Onde:

RPE = Reserva Potencial Explotável (L/seg);

RPD = Recarga Potencial Direta (L/seg);

CS = Coeficiente de Sustentabilidade.

Como pode ser observado, o Coeficiente de Sustentabilidade (CS) é quem define qual o percentual máximo da RPD que pode ser explorado sem causar efeitos adversos nos aquíferos subjacentes e em especial numa eventual alteração significativa das vazões do escoamento de base, visando em especial não comprometer a disponibilidade hídrica superficial nos períodos de estiagem.

Com relação ao coeficiente de sustentabilidade, os aquíferos com uma elevada participação no fluxo de base, demandam um CS inferior àqueles onde essa participação não é tão significativa.

No estudo da ANA realizado para o Paranapanema (2014), sugere-se um CS médio de 0,4, considerando que 40% dos cenários são favoráveis. Já em aquíferos com transmissividade elevada, ou seja, onde uma significativa parte do escoamento de base é mantida pelo próprio aquífero superficial, recomenda-se a utilização de um coeficiente de 0,2.

A definição do CS (coeficiente de sustentabilidade) proposta pela ANA e utilizada neste trabalho parte de dados hidrológicos superficiais, mais especificadamente da relação Q_{90}/Q_{50} , sendo este considerado um parâmetro adequado para o seu estabelecimento, já que demonstra a participação do escoamento superficial com origem unicamente subterrânea (Q_{90} = vazão que é excedida em 90% do tempo) perante o escoamento superficial que já engloba outras variantes, como o run off (Q_{50} = vazão que é excedida em 50% do tempo). Desta forma a metodologia da ANA recomenda que se adotem os seguintes valores:

- Para $Q_{90}/Q_{50} \geq 0,6 \rightarrow$ usar CS = 0,2;
- Para $Q_{90}/Q_{50} < 0,6 \rightarrow$ usar CS = 0,4;
- Para aquíferos cársticos \rightarrow usar CS = 0,3.

Cabe frisar que devido à espacialidade das estações fluviométricas, tentou-se utilizar aquelas que apresentavam séries consistentes, com dados de Q_{50} e Q_{90} , e que se localizam o mais próximo possível de zonas de contato entre dois domínios hidrogeológicos ou sistemas aquíferos distintos.

Tal sistemática propiciou a seleção de cerca de 5 estações para avaliação e obtenção dos dados de vazão superficial, necessários ao cálculo dos coeficientes de sustentabilidade, conforme pode ser mais bem observado na Figura 4.68, que sobrepõe as estações utilizadas com os domínios hidrogeológicos e a rede hídrica superficial de maior ordem.

Pode-se verificar que os valores calculados para a razão $Q_{90\%}/Q_{50\%}$ foram muitas vezes nulos, pelo fato de que várias estações retrataram a inexistência de vazões para a chamada $Q_{90\%}$ (e que pode ser considerada análoga à vazão de base Q_b), devido aos rios serem intermitentes (sem fluxo hídrico em certos períodos do ano).

Desta forma, naquelas onde se verificou a existência de dados de ambas as vazões e onde foi possível realizar o cálculo da razão $Q_{90\%}/Q_{50\%}$, as magnitudes giraram em 0,02 de forma que, independentemente do sistema aquífero analisado, no presente estudo considerou que toda a bacia hidrográfica está dentro do intervalo inferior a 0,6 e que remete à possibilidade de utilização de um coeficiente de sustentabilidade de 0,4 (40%), conforme sugerido pela ANA.

Estes resultados da razão $Q_{90\%}/Q_{50\%}$ retratam que os sistemas aquíferos existentes na bacia hidrográfica do Rio Paraíba têm uma baixa ou até nula representatividade nos chamados escoamentos de base dos cursos hídricos superficiais, de maneira que as atividades de exploração das águas subterrâneas em muito pouco impactam as vazões superficiais, ao menos nas porções medianas e superiores dos cursos hídricos da bacia.

Desta forma, nos sistemas aquíferos dito fraturados, poderão ser aceitos percentuais de exploração ainda um pouco superiores aos 40% indicados, no entanto, nos sistemas aquíferos sedimentares (Barreiras e Litorâneo), tal métrica deverá ser seguida, e áreas onde tal percentual for ultrapassado deverão ser monitoradas com maior atenção, devido aos problemas decorrentes da super exploração, como rebaixamento de níveis de poços, escassez de água e/ou atingimento de níveis de água de qualidade inferior, como de maior salinidade por exemplo, devido à maior facilidade intrusiva da “cunha salina” oriunda do mar, nestas situações.

4.5.7 Resultados Calculados

A Tabela 4.26 a seguir retrata os valores finais de RPE específica média obtida para cada um dos cinco sistemas aquíferos em estudo, frisando, entretanto que estes valores retratam uma média e foram obtidos em separado para cada ambiente hidrogeológico e seus respectivos arcabouços geológicos que o compõe.

Tabela 4.26 - Valores de RPD e RPE

| Sistema Aquífero | RPD (L/s.km ²) | RPE (L/s.km ²) |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Faturado Semiárido | 0,08 | 0,03 |
| Campos Novos | 0,07 | 0,03 |
| Barreiras | 3,78 | 1,51 |
| Faturado Centro-Sul | 1,09 | 0,43 |
| Litorâneo Nordeste-Sudeste | 4,50 | 1,80 |

Fonte: Cobrape (2024).

Antes de se tecer considerações acerca da disponibilidade, é importante ter em mente que tais valores independem do banco de dados utilizados, se SIAGAS e/ou AESA, já que os mesmos foram construídos com base em dados pluviométricos, coeficientes de infiltração inerentes ao ambiente físico de análise, e séries temporais hidrológicas de vazão, não interferindo, portanto, nos resultados da RPE, se temos mais ou menos poços instalados na bacia hidrográfica.

No entanto, a partir dos dados de RPE é que sim, deverão ser avaliados os poços existentes e sobretudo, operantes, em cada sistema aquífero, além dos chamados poços “clandestinos”, para que se possa avaliar o volume hídrico subterrânea realmente disponível e/ou já hiper explorado além do recomendado.

Através da análise dos valores tabelados de RPD e RPE - melhor observados sob a forma de mapas na Figura 4.97 e Figura 4.98 retratadas nas próximas páginas - é possível observar que o Sistema Hidrogeológico Litorâneo Nordeste-Sudeste é o que apresenta a maior reserva potencial explorável (RPE), apesar de nem sempre possuir reservatórios de qualidade, em termos de potabilidade das águas bombeadas, já que se caracteriza como área de “descarga” e se encontra mais exposto em áreas densamente habitadas, facilitando a sua contaminação direta e indireta pelas atividades humanas realizadas em superfície, como indústrias, postos de combustível, aterros sanitários e lixões, além de cemitérios e fossas sépticas.

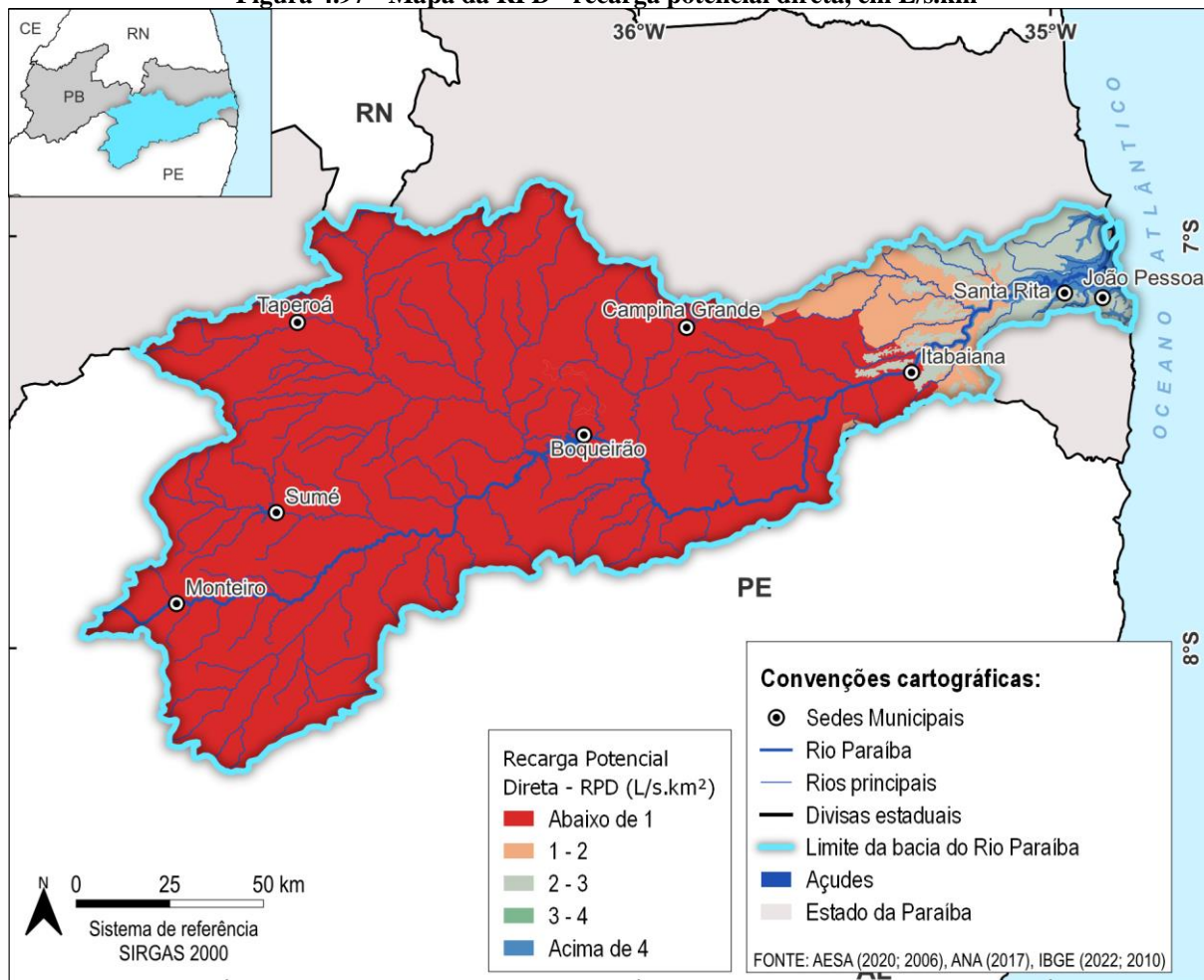
Na sequência têm-se o Sistema Barreiras como o de melhor reserva potencial explorável, frisando que em geral, as suas águas são de boa qualidade, assim como o Sistema Faturado Centro-Sul, que, apesar de possuir uma menor RPE, ainda se sobressai aos demais.

Todos os outros Sistemas Aquíferos restantes, como o Campos Novos e o Faturado Semiárido, apresentam valores inferiores de RPE - devido a particularidade do ambiente geológico ser de baixa permeabilidade (CI - coeficientes de infiltração de aproximadamente 0,5% em acordo com a ANA), e depender quase que exclusivamente da porosidade secundária como ferramenta de acumulação da água, o que não os torna de menor interesse, já que os dados de vazão dos

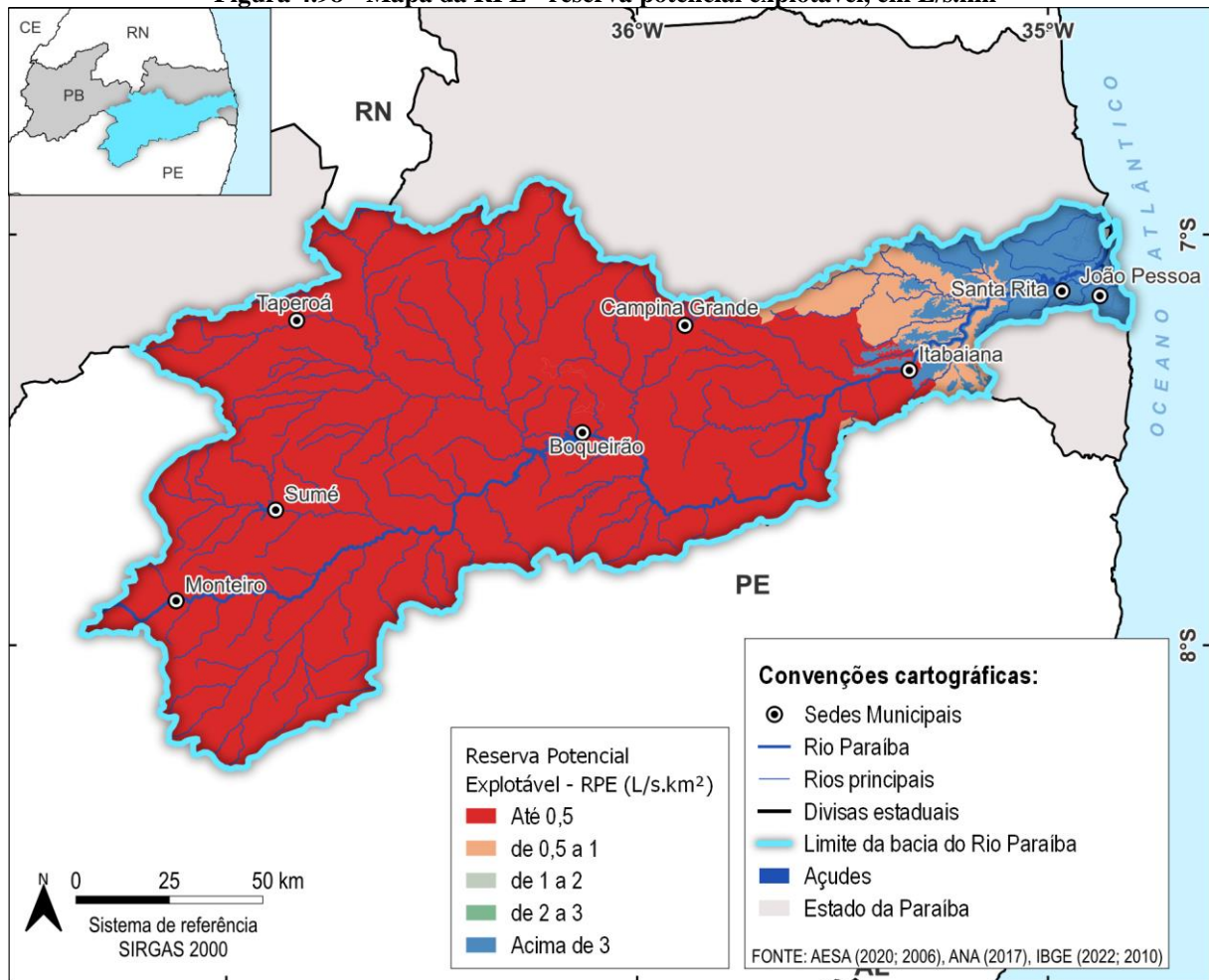
mesmos demonstra que os poços podem pontualmente ainda apresentar vazões de interesse e resolver desafios locais de fornecimento de água.

Em tais situações direciona-se para a necessidade da realização de estudos geológicos (e/ou geofísicos) de maior detalhe, quando do planejamento de instalação de novos poços tubulares públicos por exemplo, já que em geral as maiores vazões se encontram em estruturas (ou encontro de duas ou mais estruturas) que favorecem a acumulação e circulação das águas subterrâneas, como falhas, fraturas e diaclases.

Figura 4.97 - Mapa da RPD - recarga potencial direta, em L/s.km²



Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.98 - Mapa da RPE - reserva potencial explotável, em L/s.km²

Fonte: Cobrape (2024).

Desta forma, a partir então do cálculo da RPE e dos dados das vazões outorgadas fornecidos pela AESA, pode-se mais adiante se observar de forma clara a correlação entre a disponibilidade e o seu percentual utilizado, nos diversos sistemas aquíferos existentes.

Cabe frisar, entretanto, que as informações do Banco de Dados da AESA dizem respeito a cerca de somente 800 poços, com outorgas cadastrados entre os anos de 2021 e 2024, conforme Tabela 4.27 a seguir, enquanto o banco de dados do SIAGAS, conta com cerca de mais de 7.000 poços, cadastrados entre os anos de 1923 e 2019, sem, no entanto, deixar claro quais destes poços de fato se encontram operantes ou preferencialmente, com outorga válida.

De qualquer forma, pode-se considerar muito provavelmente que o banco de dados da AESA possui somente os poços cujos prazos de validade de outorga ainda estão vigentes, sendo então uma boa referência para a quantificação de poços de fato oficialmente outorgados e operantes.

Adicionalmente, salienta-se que foi realizada a tentativa de se correlacionar geograficamente os dois bancos de dados (SIAGAS e AESA), para a confirmação de poços sobrepostos, mas tal tentativa se demonstrou infrutífera, sem ressaltar a sobreposição precisa de pontos de mesma coordenada, vinculadas, por exemplo, a um eventual poço que se encontra cadastrado em ambos

os bancos. Tal questão pode por fim, ser decorrente dos sistemas de georreferenciamento utilizados em ambos os bancos de dados, e os respectivos erros inerentes a cada um deles.

Tabela 4.27 - Datas de validade das outorgas subterrâneas por sistema aquífero

| Sistema Aquífero | Data Expedição Inicial | Data Expedição Final | Data de Expiração Inicial | Data de Expiração Final |
|----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------------|-------------------------|
| Litorâneo Nordeste-Sudeste | 21/06/2021 | 19/04/2024 | 26/04/2024 | 11/11/2032 |
| Barreiras | 19/05/2022 | 18/04/2024 | 26/04/2024 | 24/10/2032 |
| Faturado Semiárido | 29/04/2021 | 23/04/2024 | 29/04/2024 | 23/04/2027 |
| Faturado Centro-Sul | 16/07/2021 | 23/02/2024 | 26/06/2024 | 23/02/2027 |

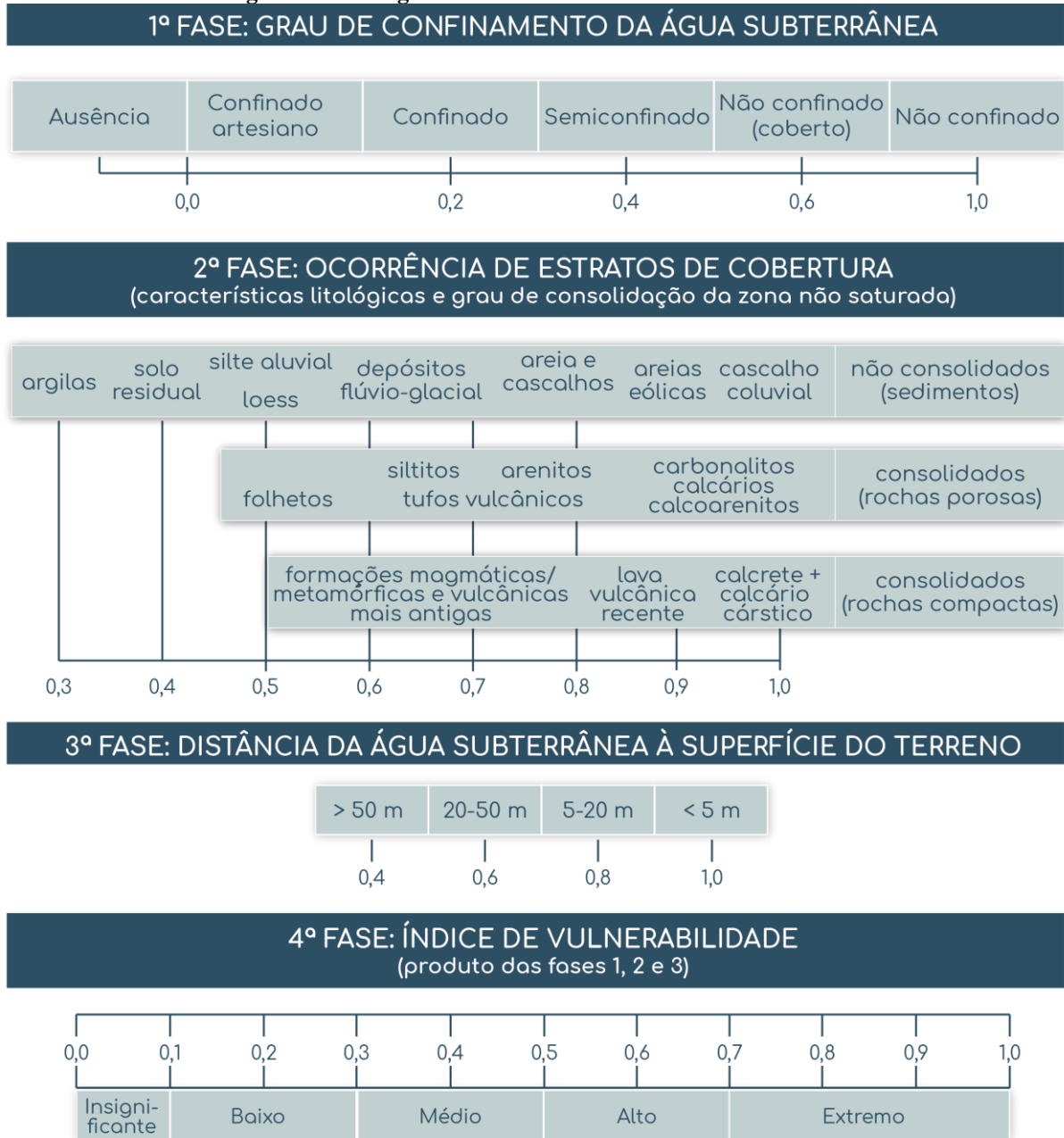
Fonte: AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

4.5.8 Mapa de Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas

Conforme o termo de referência, foi elaborado o Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas, baseando-se na metodologia GOD proposta por Foster *et al.* (1988).

De acordo com o método, os parâmetros chave para a determinação a vulnerabilidade do aquífero são: G - tipo de aquífero, em relação ao seu grau de confinamento; O - tipo de solo e litologia na zona não saturada, e D - profundidade do nível estático do aquífero superficial, em acordo ao mosaico de classificação representado na Figura 4.99 a seguir.

Figura 4.99 - Diagrama ilustrativo do cálculo do método GOD



Fonte: Adaptado de Foster *et al.* (1988).

Desta forma, partiu-se da premissa de que todos os domínios hidrogeológicos avaliados são do tipo livre, ou seja, não confinados, o que, de forma conservativa, direciona para a utilização do maior índice de risco nesta categoria (G), que é o valor 1,0.

Tal prerrogativa é em grande parte verdadeira, ao se avaliar em particular os dados de profundidade do nível estático de praticamente todos os poços do estado e registrados no banco de dados do SIAGAS-CPRM.

Ainda seguindo este raciocínio optou-se pela escolha para o parâmetro (O) de um tipo de substrato suprajacente que representasse uma média de cada domínio hidrogeológico, de maneira que cada domínio recebesse um índice numeral de classificação apenas.

Cabe frisar que na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba se constatou uma significativa variedade de províncias geológicas, em termos geocronológicos e estratigráficos, o que por sua vez dificultaria sobremaneira a utilização do método, caso se tentasse aplicá-lo em cada tipo geológico em particular que ocorra nos seus limites.

Desta forma, mediante consulta aos índices predefinidos pela metodologia GOD, selecionaram-se os índices discretizados na Tabela 4.28, e que representam uma média dos litotipos presentes em cada sistema aquífero em particular.

Tabela 4.28 - Índice “O” utilizados

| Sistema Aquífero | Índice “O” |
|----------------------------|-------------------|
| Campos Novos | 0,5 |
| Barreiras | 0,7 |
| Fraturado Semiárido | 0,6 |
| Fraturado Centro-Sul | 0,7 |
| Litorâneo Nordeste-Sudeste | 0,7 |

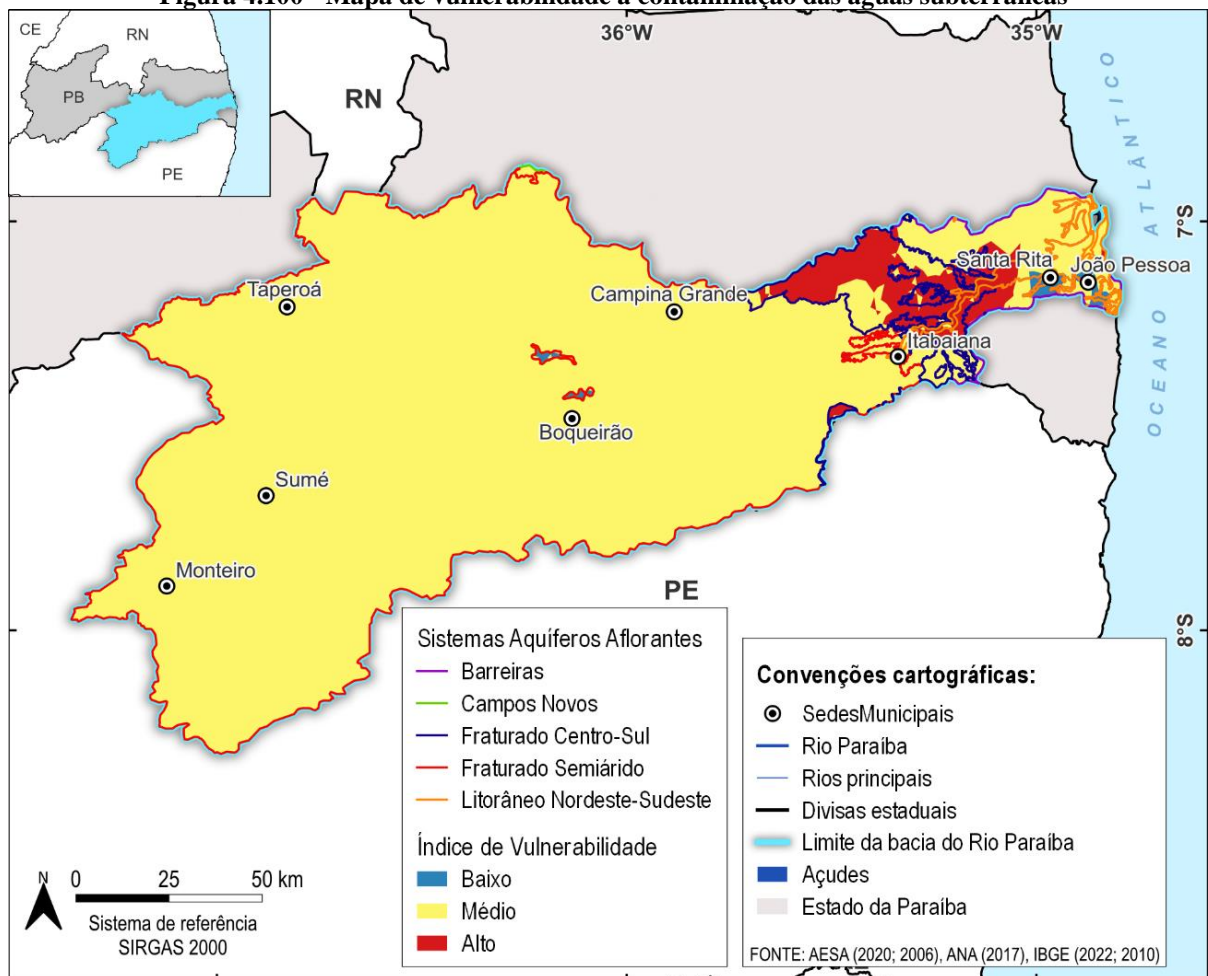
Fonte: Foster *et al.* (1988).

Por fim, para a geração do parâmetro (D), vinculado à profundidade do nível estático (NA), optou-se pela geração de uma superfície de interpolação - e que representa o mapa potenciométrico da bacia hidrográfica (Figura 4.74 a Figura 4.77) - valendo-se de todos os dados de profundidade do nível estático - eliminando-se valores discrepantes ou nulos - de maneira que as quatro categorias para a distância ao nível da água subterrânea pudessem retratar o aumento ou diminuição do risco, em função desta variável.

O mapa GOD de vulnerabilidade gerado e apresentado na Figura 4.100, reporta três categorias de risco, sendo a de nível “médio” a dominante, tanto nos aquíferos de menor permeabilidade existentes a montante da bacia hidrográfica, quanto nos aquíferos arenosos existentes na foz do Rio Paraíba.

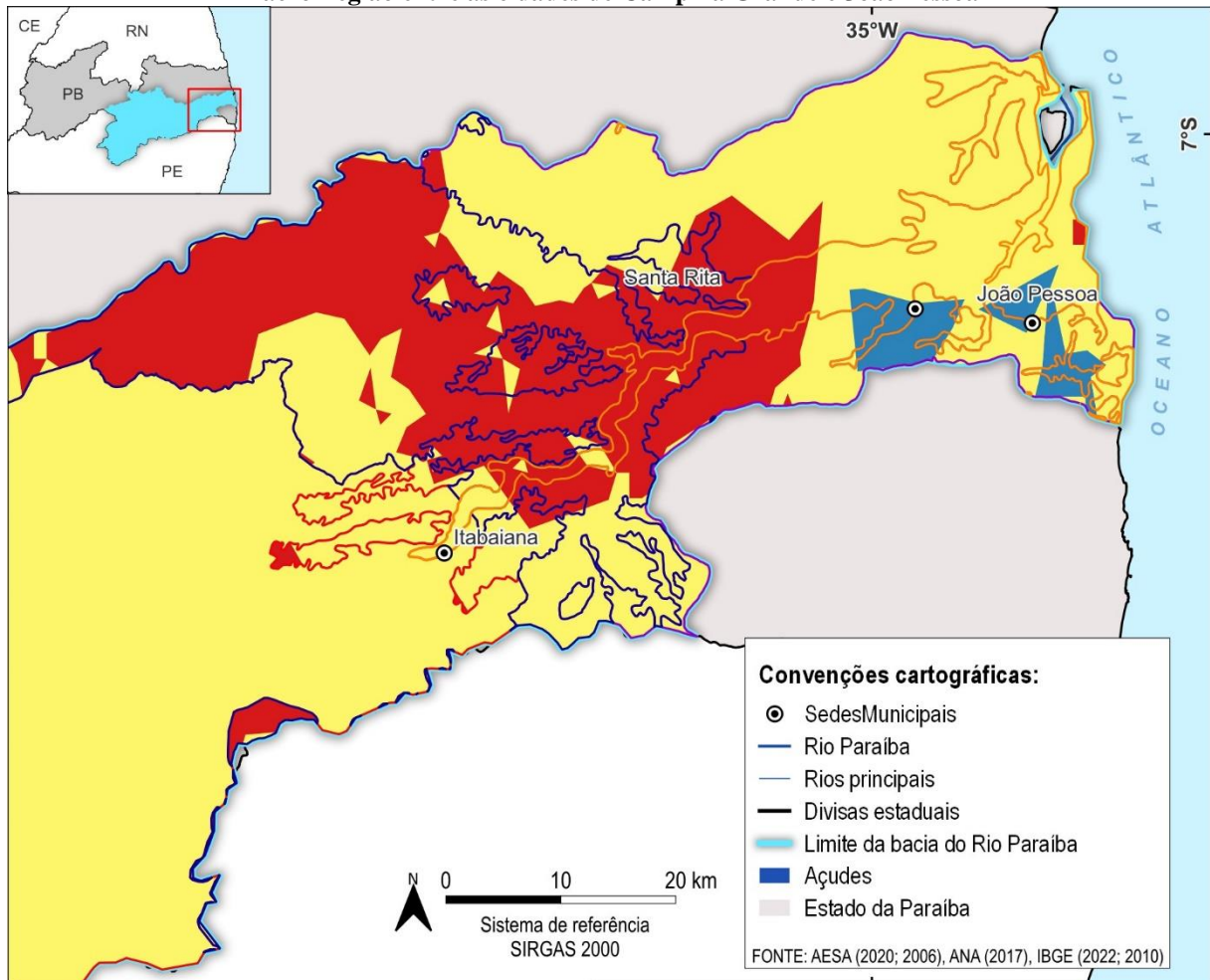
Já o nível “baixo” vinculou-se a uma pequena área no Sistema Aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste, enquanto as áreas de “alta” vulnerabilidade se encontram predominantemente sobre o Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul e Sistema Aquífero Barreiras, bem como em parte de montante do Sistema Aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste.

Figura 4.100 - Mapa de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas



Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.101 - Mapa de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas com destaque para a macrorregião entre as cidades de Campina Grande e João Pessoa



| Sistemas Aquíferos Aflorantes | Índice de Vulnerabilidade |
|-------------------------------|---------------------------|
| — Barreiras | ■ Baixo |
| — Campos Novos | ■ Médio |
| — Fraturado Centro-Sul | ■ Alto |
| — Fraturado Semiárido | |
| — Litorâneo Nordeste-Sudeste | |

Fonte: Cobrape (2024).

4.5.9 Modelo de Circulação das Águas Subterrâneas

Em atendimento ao Termo de Referência do presente estudo, optou-se pela realização de um Modelo de Circulação integral da bacia hidrográfica, e que engloba todos os sistemas aquíferos, já que a circulação subterrânea acaba tendo integrações de características entre parte destes sistemas.

A Figura 4.102 abaixo representa um modelo conjunto de circulação de todos os sistemas aquíferos em três perspectivas, sendo duas destas em três dimensões (nordeste-sudoeste e sul-norte), bem como uma perspectiva em planta.

Parte-se do princípio de que as recargas das águas subterrâneas na bacia estão diretamente vinculadas ao excedente pluviométrico que se infiltra nos terrenos geológicos, em maior ou menor facilidade, a depender dos chamados coeficientes de infiltração, e que estão por sua vez

ligados ao maior ou menor falhamento geotectônicos dos terrenos (em especial para os sistemas aquíferos fraturados), ou a maior ou menor permeabilidade dos materiais sedimentares (para os sistemas aquíferos sedimentares).

Esta parcela que se infiltra irá por sua vez gerar recargas mais profundas ou distantes, e que por vezes possuem como destino final outras camadas geológicas subjacentes, outros sistemas aquíferos subjacentes ou a montante, ou até mesmo o próprio oceano, ou ainda poderão compor o chamado escoamento de base, descarregando este volume hídrico nos cursos de água superficial, que fluirão por sua vez em direção ao oceano.

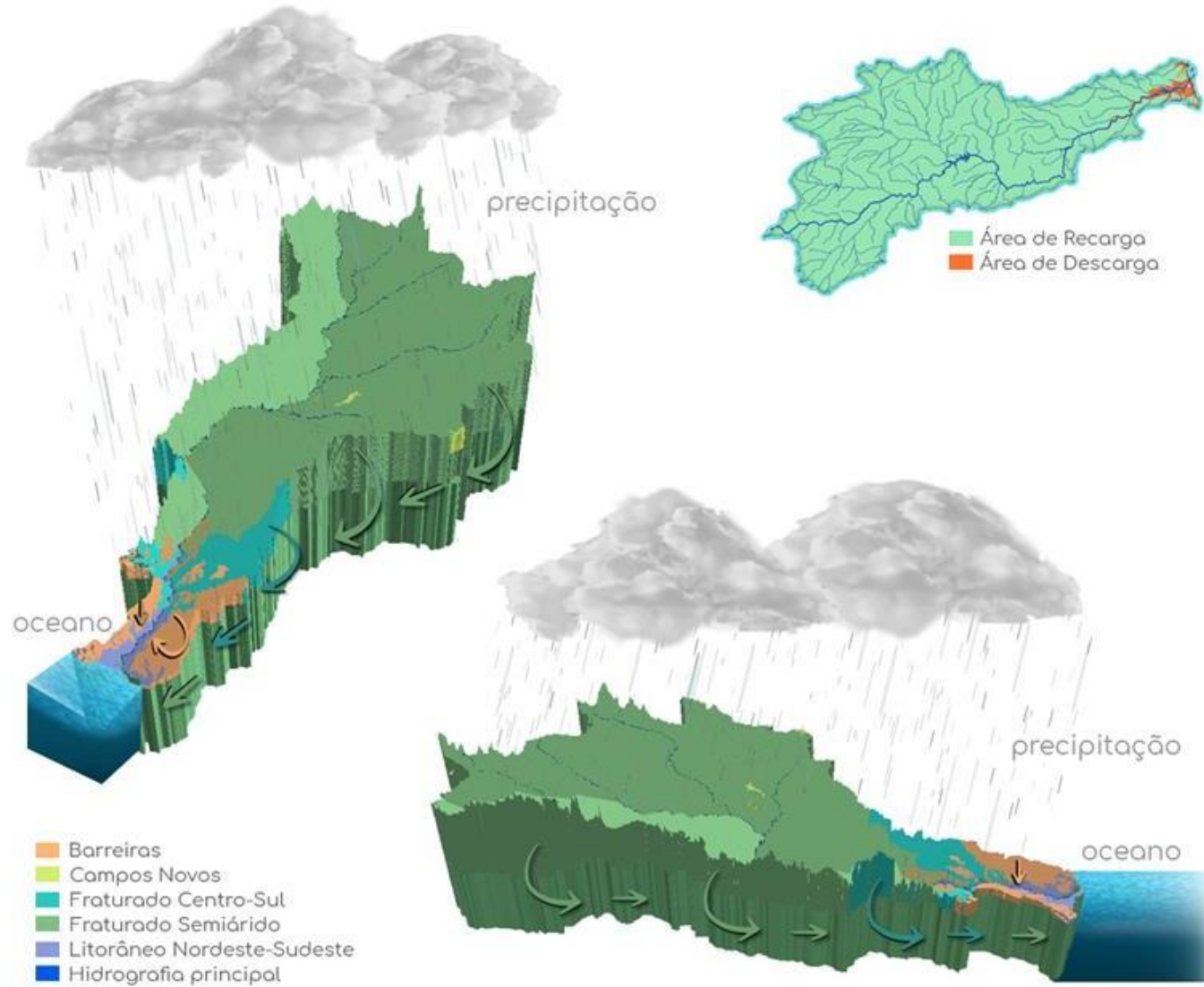
Se analisarmos os sistemas aquíferos sem separado, observa-se que os Sistemas Aquíferos Fraturados não se conectam à rede hídrica superficial, de forma que o volume hídrico se dirige para níveis mais profundos e/ou para o oceano.

O Sistema Aquífero Barreiras já possui um comportamento um pouco distinto, com uma parcela do volume hídrico também direcionado para níveis mais profundos - neste caso o próprio sistema fraturado - e outra parte (mais superficial), adentrando ao Sistema Aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste.

O Sistema Aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste é o que possui uma maior correlação com as descargas da reserva renovável no sistema hídrico superficial, vinculando-se ao escoamento de base (análogo à Q90), conforme pode ser observado nos hidrogramas.

Desta forma, o destaque das áreas de recarga e descarga - dispostos em planta no canto superior direito da Figura 4.102, fica vinculado ao fato de que quase toda a área da bacia hidrográfica se comporta na verdade como uma grande área de recarga, sendo que somente em uma pequena porção, mais especificadamente em parte do Sistema Aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste, ocorre de fato a descarga subterrânea, e em particular, deste sistema aquífero.

Figura 4.102 - Modelo de Circulação das Águas Subterrâneas na bacia hidrográfica



Fonte: COBRAPE (2024).

4.5.10 Síntese da Estimativa da Disponibilidade Hídrica Subterrânea

No contexto da limitada disponibilidade hídrica superficial, a estimativa da disponibilidade hídrica subterrânea torna-se ainda mais relevante, uma vez que representa uma fonte alternativa crucial para suprir as demandas hídricas da região, bem como explorar essa reserva estratégica de maneira sustentável. Além disso, a água subterrânea demonstra maior resistência às variações climáticas em comparação com os cursos d'água superficiais oferecendo um suprimento mais estável durante eventos de secas prolongadas. Em termos de planejamento e gestão dos recursos hídricos, a estimativa da disponibilidade hídrica inclui o desenvolvimento de políticas de uso e proteção, bem como a avaliação da recarga dos aquíferos, aspectos que foram analisados neste capítulo.

Para tanto, foram considerados cinco sistemas hidrogeológicos de maior representatividade segundo a ANA, sendo eles: sistema aquífero Fraturado Semiárido, sistema aquífero Barreiras, sistema aquífero Fraturado Centro-Sul, sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste, e sistema aquífero Campos Novos. Após análise das vazões específicas, concluiu-se que o sistema que possui o melhor potencial hidrogeológico e exploratório é o sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste, seguido pelo sistema aquífero Barreiras. Cabe ressaltar que, embora os poços na formação Barreiras sejam mais profundos e com custos perfuratórios serem maiores, a qualidade da sua água também é superior.

Além disso, foi feita uma análise dos dados cadastrais disponíveis dos poços da base da AESA, explorando os tipos de perfil construtivo, e conduzindo uma análise estatística das vazões horárias dos mesmos, o que permitiu uma compreensão mais detalhada da capacidade de produção, concentração e comportamento dos poços ao longo do tempo. Outro aspecto fundamental foi a análise dos diferentes usos da água na bacia com os dados da base da AESA, complementada pelos dados fornecidos pelo SIAGAS, uma vez que oferece uma visão abrangente sobre como os recursos hídricos são utilizados na bacia, e permitindo identificar padrões de consumo e demandas específicas de diferentes setores.

No que diz respeito ao cálculo da disponibilidade hídrica subterrânea, o processo foi fundamentado em dados pluviométricos e coeficientes de infiltração, resultando na determinação da Recarga Potencial Direta (RPD) e a Reserva Potencial Explotável (RPE). Observou-se que o sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste é o que apresenta a maior RPE, embora nem sempre tenha qualidade em termos de potabilidade das águas bombeadas. Grande parte da bacia apresentou valores baixos de RPE devido à característica geológica de baixa permeabilidade, dependendo principalmente da porosidade secundária como ferramenta de acumulação de água.

Em situações como essa, recomenda-se a realização de estudos geológicos de maior detalhe, para planejamento de instalação de novos poços tubulares públicos. Geralmente, as maiores vazões estão associadas a estruturas geológicas que favorecem a acumulação e circulação das águas subterrâneas, onde situações de baixa RPE vinculadas a uma menor permeabilidade do terreno faz-se necessário estudos com maior grau de detalhamento. Estes estudos são essenciais

para identificar locais estratégicos para captação de água subterrânea que garantam uma exploração sustentável e eficiente dos recursos hídricos.

Nesse sentido, pode-se citar os “Estudos Hidrogeológicos sobre as áreas de recarga no Sistema Pernambuco-Paraíba” (SEIRHMA/AESA), que está em sendo elaborado simultaneamente ao PRH-RPB, e é de grande valia para melhorar o conhecimento das águas subterrâneas do litoral do estado, incluindo boa parte da região do Baixo Paraíba, e conseqüentemente auxiliar no uso racional e sustentável dessa fonte hídrica.

Ademais, foi realizado o mapeamento da vulnerabilidade e risco de contaminação das águas subterrâneas, fundamentado pela metodologia GOD. O mapa gerado reportou três categorias de risco, sendo a de nível médio a predominante na bacia, tanto nos aquíferos de menor permeabilidade a montante da bacia hidrográfica, quanto nos aquíferos arenosos existentes na foz do Rio Paraíba. O nível baixo vinculou-se a uma pequena área no sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste, enquanto as áreas de alta vulnerabilidade se encontram predominantemente sobre o sistema aquífero Fraturado Centro-Sul e Barreiras.

Por fim, a análise do Modelo de Circulação Integral da bacia permitiu identificar que a maior parte da bacia atua como área de recarga, enquanto apenas uma porção, localizada no sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste, contribui efetivamente para a descarga subterrânea da região.

Essas conclusões acerca da disponibilidade hídrica subterrânea enfatizam a importância de estudos geológicos detalhadas para um melhor entendimento das características e comportamentos dos aquíferos na bacia do Rio Paraíba, e assim contribuir com a disponibilidade bem como melhorar a segurança hídrica contínua na região.

4.6 ANÁLISE DA QUALIDADE DAS ÁGUAS

4.6.1 Qualidade das águas superficiais

A qualidade das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba foi subdividida em quatro blocos de análises:

- Rede de monitoramento da qualidade das águas;
- Caracterização da bacia de contribuição;
- Situação da qualidade das águas; e,
- Análise da qualidade das águas

O presente estudo utiliza a qualidade das águas como instrumento para subsidiar as discussões entre os usos dos recursos hídricos na bacia e a qualidade de suas águas. Esta abordagem dá suporte à análise de cenários futuros e suas implicações no enquadramento dos cursos d'água. Neste estudo não estão sendo utilizados modelos matemáticos de qualidade da água, mas uma abordagem estatística simplificada para subsidiar as discussões

Assim, com objetivo de realizar um diagnóstico relativo à qualidade das águas superficiais na bacia do Paraíba, foi organizada uma base de dados de qualidade da água dos corpos hídricos

superficiais a partir de relatórios de monitoramento da qualidade das águas publicados *online* ou de planilhas que as próprias agências disponibilizaram após solicitação.

4.6.1.1 Rede de monitoramento

O presente estudo utilizou-se de um recorte dos dados do Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba (PERH-PB), que contou com as bases de dados da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA) e da Superintendência de Administração do Meio Ambiente (SUDEMA), dos anos de 2006 a 2017.

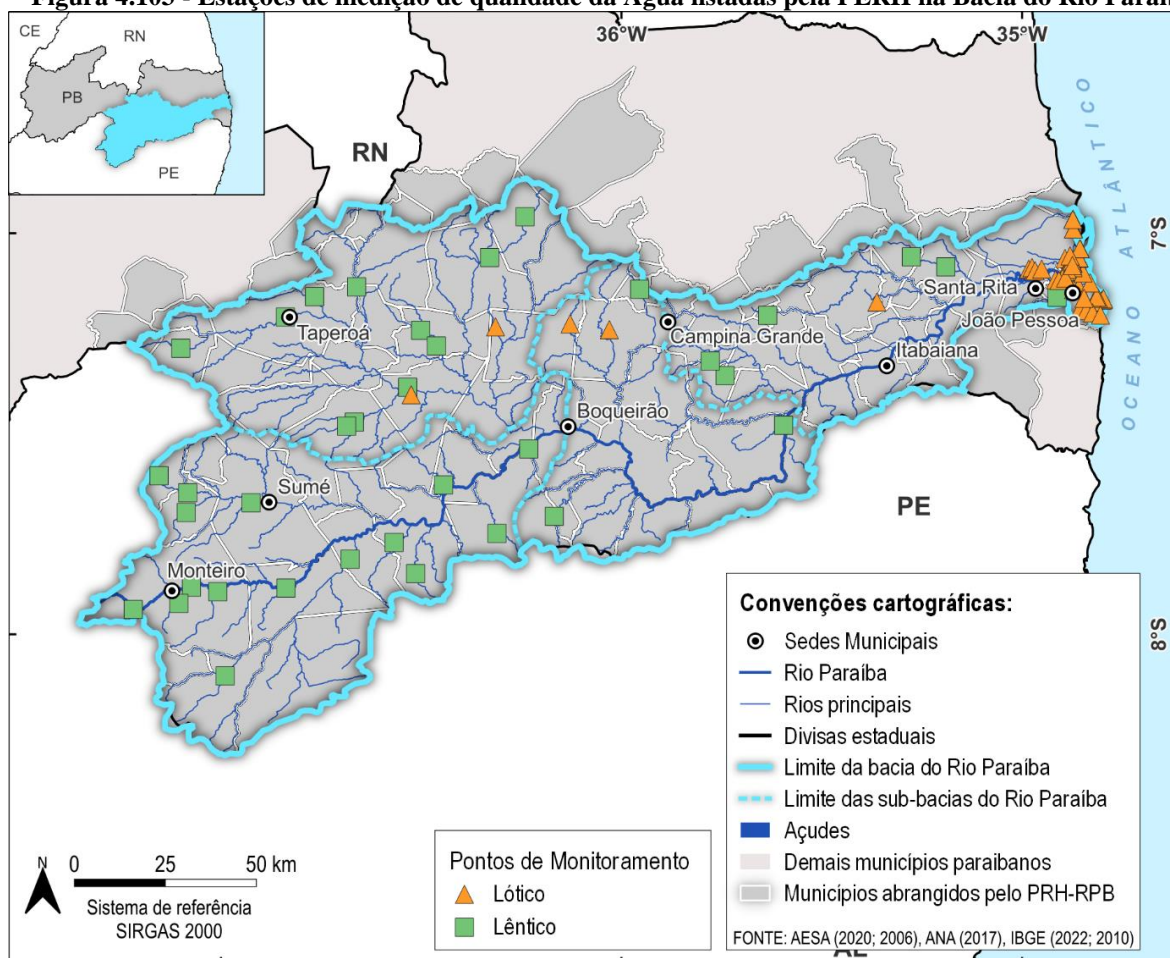
Neste caso foram considerados 83 estações de monitoramento na bacia do Paraíba, distribuídas ao longo da Bacia do Rio Paraíba, conforme apresenta a Tabela 4.29 e a Figura 4.103.

Tabela 4.29 - Número de Estações do monitoramento da CAGEPA e SUDEMA

| Sub-bacias | Lótico | Lêntico | Total |
|---------------|-----------|-----------|-----------|
| Alto Paraíba | - | 16 | 16 |
| Médio Paraíba | 2 | 3 | 5 |
| Baixo Paraíba | 43 | 6 | 49 |
| Taperoá | 2 | 11 | 13 |
| Total | 47 | 36 | 83 |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

Figura 4.103 - Estações de medição de qualidade da Água listadas pela PERH na Bacia do Rio Paraíba



Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

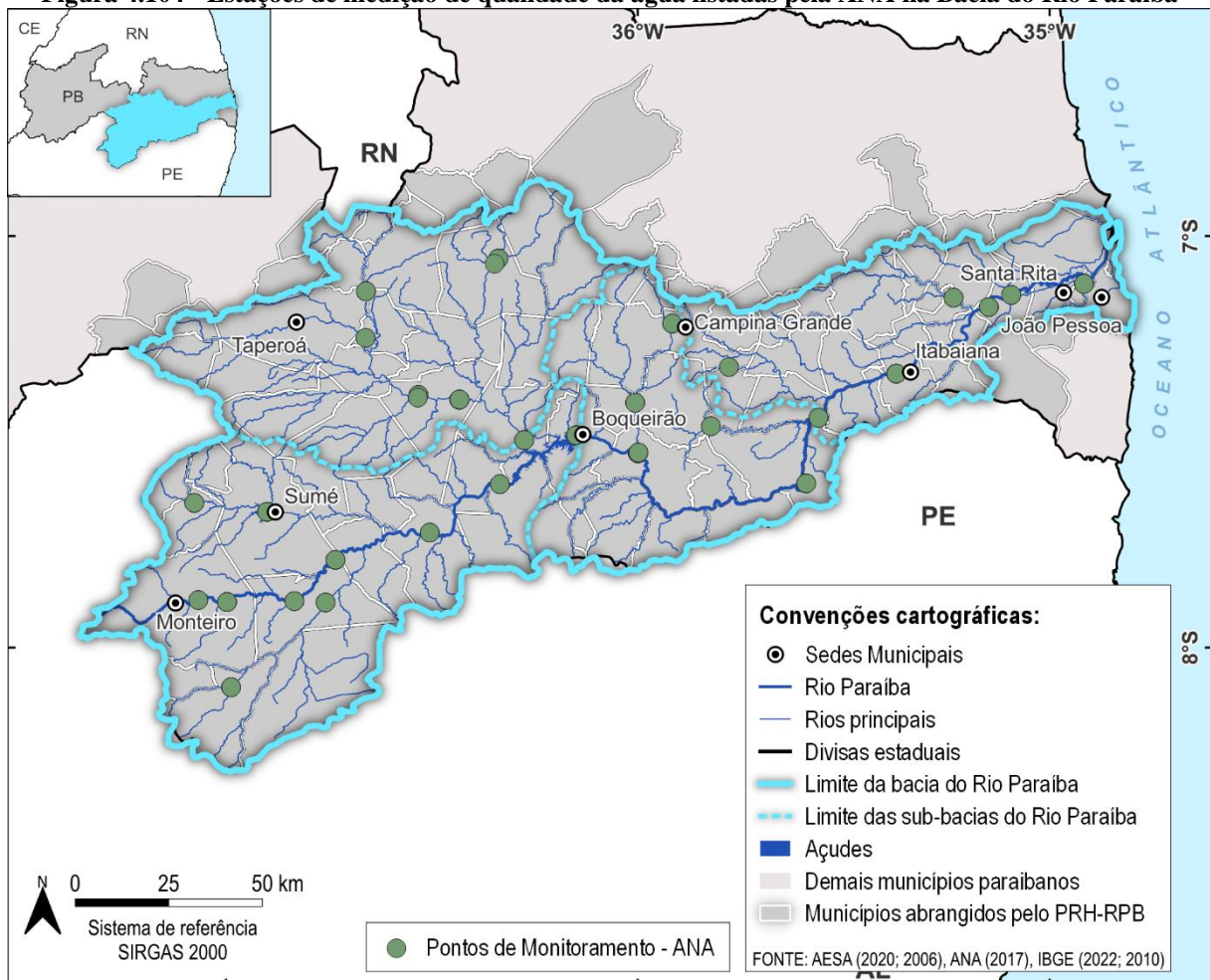
De forma complementar, também foram utilizados dados de 35 estações de monitoramento de qualidade da água do Hidroweb (SNIRH, 2024) com parâmetros de qualidade da água entre 2017 e 2022, distribuídas conforme Tabela 4.30 e apresentadas espacialmente na Figura 4.104.

Tabela 4.30 - Número de Estações do monitoramento da ANA (Hidroweb)

| Sub-bacias | Total |
|---------------|-----------|
| Alto Paraíba | 13 |
| Médio Paraíba | 7 |
| Taperoá | 8 |
| Baixo Paraíba | 7 |
| Total | 35 |

Fonte: adaptado de SNIRH (2024).

Figura 4.104 - Estações de medição de qualidade da água listadas pela ANA na Bacia do Rio Paraíba



Fonte: SNIRH (2024), adaptado por Cobrape (2024).

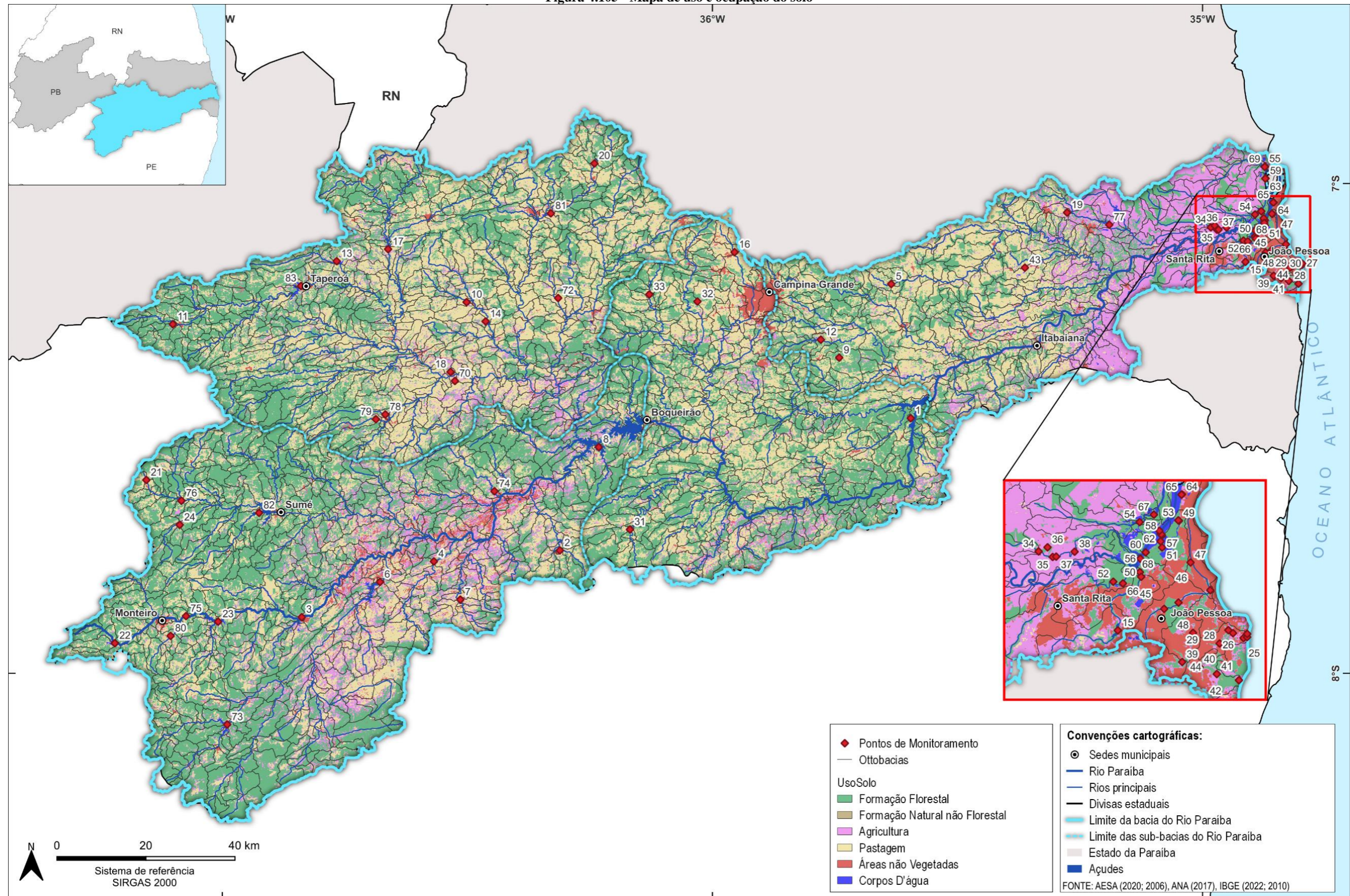
4.6.1.2 Características das bacias de contribuição

Para realizar a gestão dos recursos hídricos é importante considerar uma componente espacial, o que exige que as informações estejam associadas às variáveis geográficas, permitindo a análise de áreas e as densidades de ocupação dessas áreas. Neste caso o modelo de otobacias possibilita agrupar informações e realizar análises de gestão por bacias e sub-bacias hidrográficas.

Os dados relativos aos padrões de uso do solo, disponibilidade hídrica, pedologia, topografia (altitudes médias e declividades médias), aptidão agrícola, e mesmo as demandas em suas diversas classes, são projetados nessas ottobacias ou células de análise georreferenciadas. As células, por sua vez, são organizadas em tabelas com seus atributos, e essas tabelas articuladas em bancos de dados relacionais, com interfaces entre diversos sistemas de processamento dessas informações.

A Bacia do Hidrográfica do Rio Paraíba foi subdividida em 2.056 ottobacias, sendo 619 na bacia do alto Paraíba, 423 no médio Paraíba, 619 na bacia do Taperoá e 395 na bacia do baixo Paraíba, conforme pode ser observado no Figura 4.105.

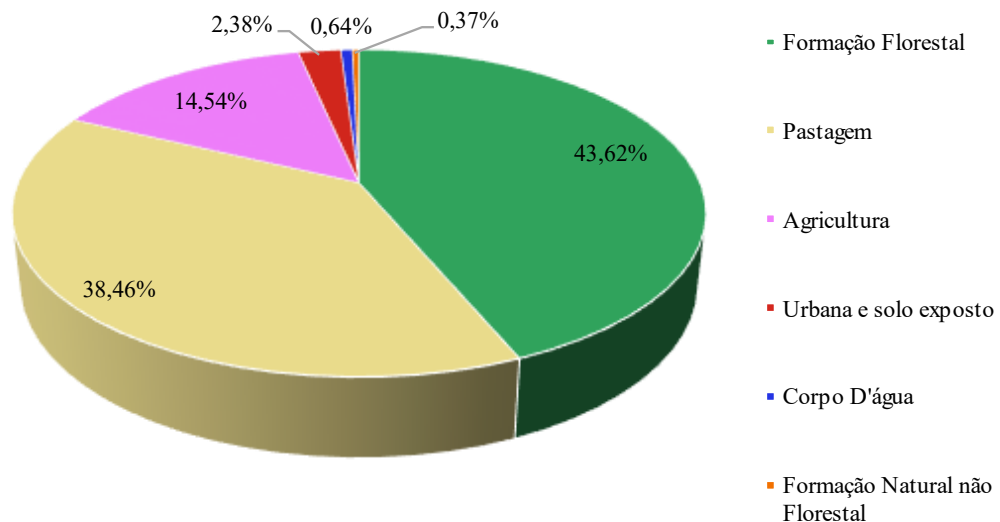
Figura 4.105 - Mapa de uso e ocupação do solo



Fonte: Cobrape (2024).

Para a definição das áreas de cobertura do solo na bacia hidrográfica do Rio Paraíba fez se uso da Coleção 8 do MapBiomas, que classifica a cobertura do solo nas regiões da bacia hidrográfica do paraíba em 38 Classes, possibilitando o agrupamento por semelhança em seis grandes classes, como observado na Figura 4.106.

Figura 4.106 - Distribuição da cobertura do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba



Fonte: adaptado MapBiomas (2023)

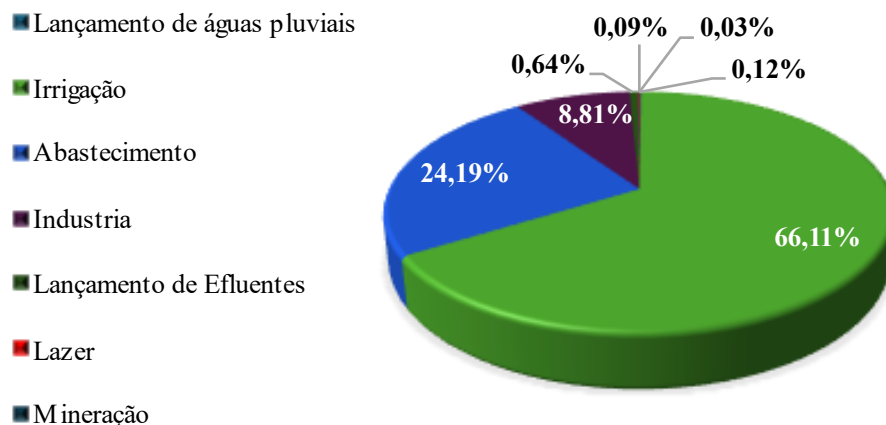
Deste modo é possível verificar que as áreas não vegetadas (urbanas e de solo exposto) não chegam a 3% do território da bacia hidrográfica, enquanto 50% do território é destinado a agropecuária, sendo que menos de 15% do território é destinado a culturas agrícolas, com estas áreas localizadas no baixo curso do Paraíba. Nas demais regiões (mais agrestes) predominam a pecuária extensiva bem como as formações florestais naturais da região.

As políticas agrícolas no semiárido brasileiro vêm acompanhadas de implantação dos perímetros irrigados, áreas delimitadas pelo Estado para implantação de projetos públicos de agricultura irrigada que, em geral, possuem significativo potencial agricultável, caracterizado pelos solos férteis, presença hídrica, clima favorável e abundante força de trabalho.

O principal exemplo dentro da área de estudo é o Perímetro Irrigado de Sumé (PIS), que foi um projeto de irrigação criado na década de 70 e administrado pelo DNOCS, tornando o município de Sumé um dos maiores produtores de tomate do Brasil nos anos de 1980 e impulsionando o desenvolvimento econômico do município. Entretanto, atualmente, a produção no perímetro irrigado é mínima ou quase nenhuma.

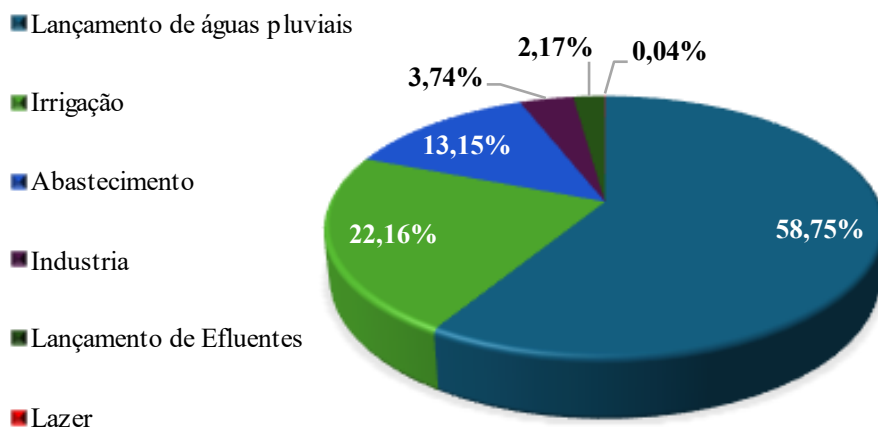
Este motivo corroborou para o presente estudo considerar como áreas com potencial agricultável aquelas destacadas no MapBiomas.

Quando verificamos os usuários de recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba cadastrados junto a AESA, verifica-se que 1.583 das 5.468 outorgas cadastradas se encontram na Bacia do Rio Paraíba, sendo que a maior parte destas são relativas a sistemas de irrigação e aquicultura (mais de 66%), enquanto abastecimento público e indústrias representam 24% e 9% respectivamente, conforme apresentado na Figura 4.107.

Figura 4.107 - Distribuição do número de outorgas existentes na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba

Fonte: adaptado AESA (2024)

Quando consideramos os volumes outorgados, temos que o abastecimento público representa 13%, enquanto a irrigação não ultrapassa 25%, conforme mostra a Figura 4.108.

Figura 4.108 - Distribuição do volume anual outorgado na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba

Fonte: adaptado AESA (2024)

Os usuários podem outorgar recursos hídricos de diferentes fontes, sendo que na área de estudo normalmente está relacionada ao abastecimento público e a irrigação, conforme observado na Tabela 4.31

Tabela 4.31 - Distribuição dos volumes anuais outorgados por fontes hídricas na Bacia do Rio Paraíba

| Finalidades x Fonte | Açude | Lagoa | Poço | Rio |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Irrigação | 23,3% | 0,9% | 4,0% | 71,8% |
| Abastecimento | 48,1% | | 22,7% | 29,2% |
| Indústria | 6,7% | 1,9% | 23,4% | 68,1% |
| Lançamento de Efluentes | 0,4% | 0,1% | - | 99,5% |
| Lazer | - | - | 68,8% | 31,2% |

| | | | | |
|------------------------------|---|------|--------|-------|
| Lançamento de águas pluviais | - | 0,2% | - | 99,8% |
| Mineração | - | - | 100,0% | - |

Fonte: adaptado AESA (2024)

Na tabela supracitada, verifica-se que a principal fonte hídrica para os sistemas agrícolas (irrigação) são os rios, com grande contribuição por parte dos açudes. Já para o abastecimento, verifica-se que este é bastante dependente das águas provenientes dos próprios açudes.

Entres os principais usuários de água para abastecimento está a Companhia de Água e Esgotos da Paraíba - CAGEPA, que na região de estudo possui um total de 29 estações de tratamento de água distribuídas em 25 municípios, conforme verifica-se na Tabela 4.32

Tabela 4.32 - Distribuição das ETAs na Bacia do Rio Paraíba

| Sub-bacia | Municípios | Estações de Tratamento de Água |
|----------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Sub-bacia do Baixo Paraíba | Cruz do Espírito Santo | ETA Cruz do Espírito Santo |
| | Fagundes | ETA Fagundes |
| | Itabaiana | ETA 01 Itabaiana |
| | | ETA 02 Itabaiana |
| | Itatuba | ETA 1 Itatuba |
| | João Pessoa | ETA Marés |
| | Juarez Távora | ETA 2 Juaréz Távora |
| | Massaranduba | ETA Massaranduba |
| | Salgado de São Félix | ETA 01 Salgado-Mogeirol |
| | Sapé | ETA Sapé |
| Serra Redonda | ETA Serra Redonda | |
| Sub-bacia do Médio Paraíba | Aroeiras | ETA Novo Pedro Velho |
| | Natuba | ETA Natuba |
| | | ETA Natuba |
| | Queimadas | ETA Gravatá |
| Sub-bacia do Taperoá | Cacimbas | ETA Cacimbas |
| | Desterro | ETA Desterro |
| | Gurjão | ETA Gurjão |
| | Junco do Seridó | ETA Junco do Seridó |
| | Taperoá | ETA Taperoá |
| Sub-bacia do Alto Paraíba | Barra de São Miguel | ETA Barra de São Miguel |
| | Boqueirão | ETA Cariri |
| | Camalaú | ETA - Camalaú |
| | | ETA Pindurão |
| | Congo | ETA Congo |
| | Monteiro | ETA Monteiro |
| | São Domingos do Cariri | ETA São Domingos do Cariri |
| | Sumé | ETA - Sistema Adutor do Congo |
| ETA Sumé | | |

Fonte: adaptado CAGEPA (2024)

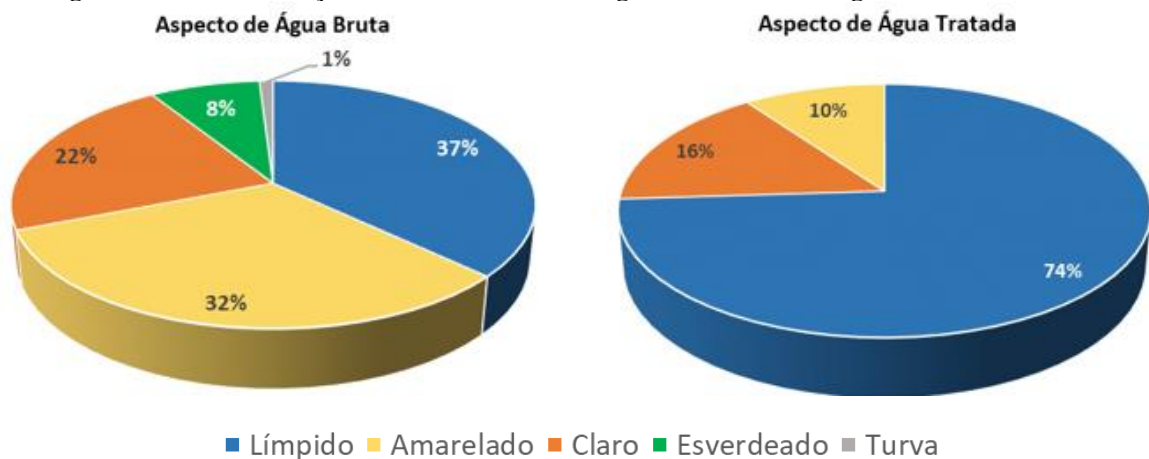
O processo de tratamento de água adotado em estações convencionais, cujas águas são provenientes de rios, lagos e açudes, normalmente é composto por unidades de flotação seguidas de decantação e filtração, seguindo finalmente para a desinfecção e fluoretação.

Nesta matriz de tratamento, o principal objetivo é a remoção de material em suspensão nas águas, observando uma redução na turbidez média de água bruta de 5,5 UTM para 3,2 UTM após o tratamento, para depois seguir para a remoção de agentes patogênicos.

As estações de tratamento cujas águas são provenientes de poços profundos utilizam-se apenas de um processo de desinfecção e de fluoretação.

De forma geral, o processo de tratamento melhora os aspectos das águas a serem distribuídas, conforme a Figura 4.109, onde apenas 37% das amostras de água bruta possuem aspecto límpido, enquanto 74% das amostras de água tratada possuem aspecto límpido.

Figura 4.109 - Distribuição do volume anual outorgado na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba



Fonte: adaptado de CAGEPA (2024).

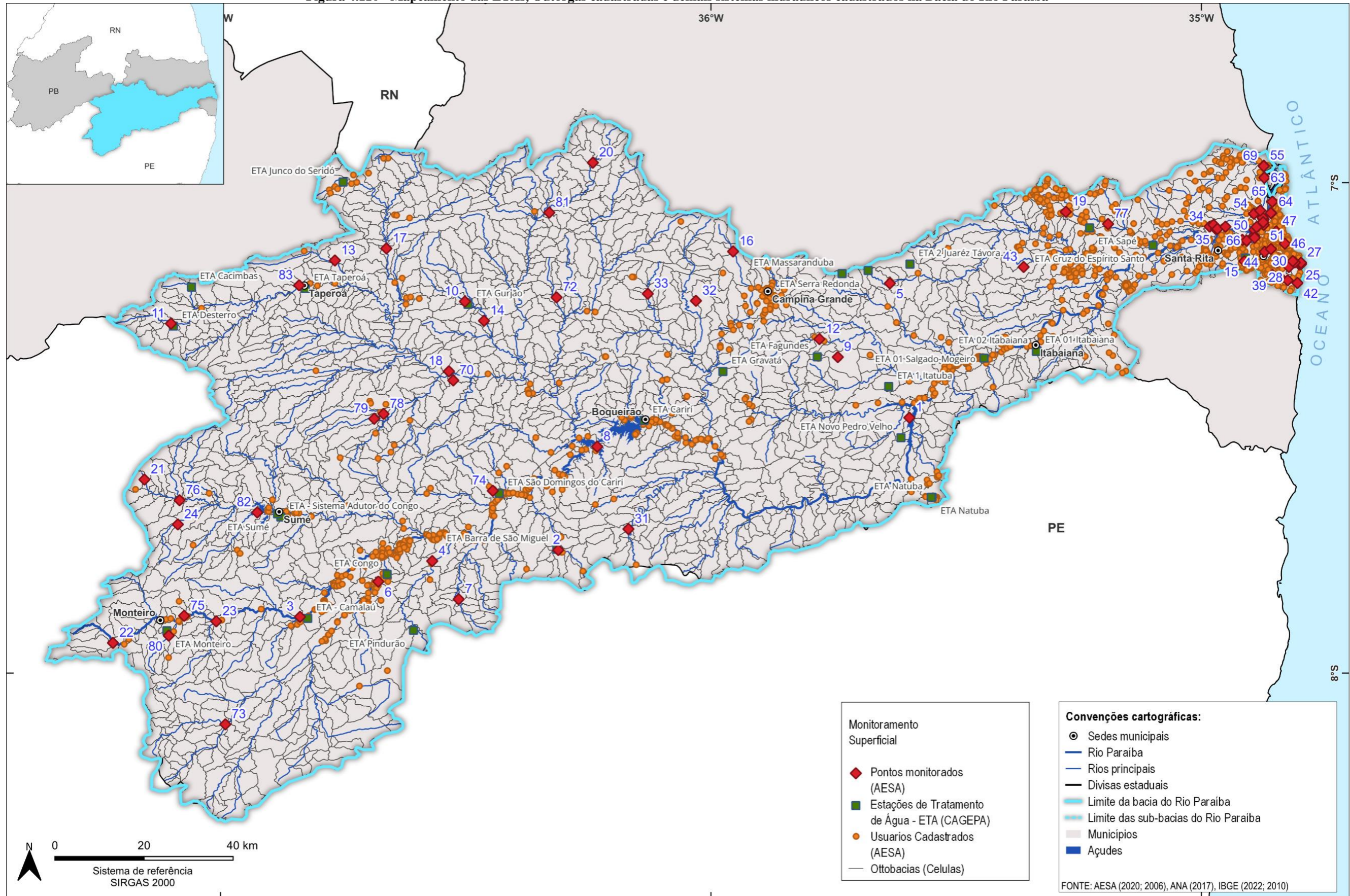
Quando observado o lançamento de efluente, verifica-se que estes representam apenas 1,4% dos pedidos de outorgas e 15,4% do volume anual outorgado, porém não são disponibilizados dados relativos à qualidade do efluente lançado. Segundo dados disponibilizados pelo Atlas Esgotos (ANA, 2017), verifica-se que apenas 19 dos 85 municípios na região de estudo possui algum tipo de tratamento coletivo.

Os sistemas de tratamento observados na bacia hidrográfica são, em sua maioria, constituídos de um conjunto de lagoas, sendo possível ser observado a utilização de reatores anaeróbios tipo UASB, porém a maior das estações de tratamento não informa a matriz de tratamento adotada.

Entre os sistemas de tratamento definidos, verificam-se uma eficiência média na remoção de DBO variando entre 60 e 85%, o que é uma eficiência bastante baixa considerando a vazão reduzida dos corpos hídricos da região agreste na qual grande parte dos municípios estão inseridos.

A distribuição das outorgas cadastradas pela AESA, bem como a localização das ETAs operadas pela CAGEPA, está representada na Figura 4.110. Já os números representados na imagem são referentes aos pontos de monitoramentos da AESA e serão objetos de discussão ao longo do capítulo.

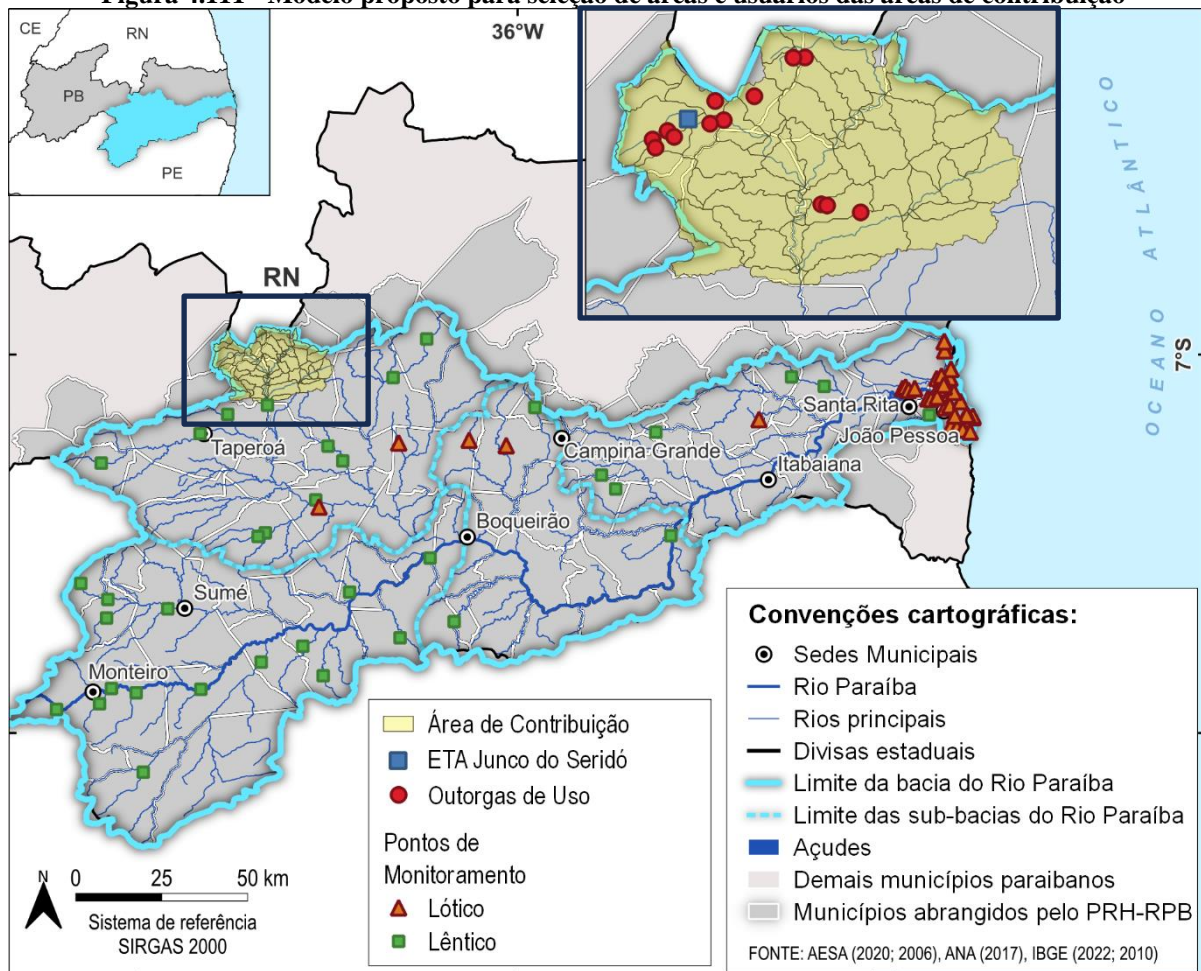
Figura 4.110 - Mapeamento das ETAs, Outorgas cadastradas e demais sistemas hidráulicos cadastrados na Bacia do Rio Paraíba



Conforme definido neste capítulo, a estimativa das áreas de uso e ocupação do solo, bem como a seleção das unidades outorgadas a montante de cada um dos pontos de monitoramento será realizado através de um programa computacional que seleciona todas as células de contribuição a montante dos pontos estudados.

Como por exemplo, o ponto de monitoramento nº 17, localizado junto ao reservatório do Mucutu, tem uma área de contribuição formada por 60 ottobacias que somam aproximadamente 544,2 km², distribuídas nos municípios de Junco do Seridó, Tenório, Assunção e Juazeirinho. A Figura 4.111 mostra este exemplo, onde o mapa principal de toda a bacia apresenta todos os pontos de monitoramento, e no exemplo com a aproximação no ponto 17, são apresentadas todas as ottobacias selecionadas a montante, caracterizada pela região de influência das outorgas e ETAs. As feições de ETAs e outorgas estão representadas apenas no mapa com aproximação por conta da grande quantidade de pontos na bacia. A totalidade de pontos de usuários e estações de tratamento pode ser observada na Figura 4.110.

Figura 4.111 - Modelo proposto para seleção de áreas e usuários das áreas de contribuição



Fonte: Cobrape (2024).

A principal cobertura do solo observado são florestas naturais da região, seguido de pastagem de subsistência, conforme observado na Tabela 4.33.

Tabela 4.33 - cobertura de solo na região a montante do reservatório Mucutu

| Cobertura | Percentual |
|--------------------------------------------------------|-------------------|
| Formação Florestal | 46,8% |
| Pastagem | 43,6% |
| Agricultura | 7,4% |
| Area não vegetada - AVN (Área Urbana e desolo exposto) | 1,3% |
| Superfície de água | 0,8% |

Fonte: Cobrape (2024).

Na região a montante deste ponto verificou-se uma ETA (ETA Junco do Seridó) e mais 13 usuários cadastrados (10 para uso industrial, 01 para irrigação e 02 para mineração) perfazendo um volume outorgado de 320 m³/ano.

Utilizando-se da mesma metodologia para os demais pontos de monitoramento foram desenvolvidas as Tabela 4.34 e Tabela 4.35.

Tabela 4.34 - Cobertura de solo há montante de cada um dos pontos de monitoramento

| Ponto de Monit. | Área Total (km²) | Formação Floresta | Form. Não Florestal | Pastagem | Agricultura | Áreas não vegetadas | Água |
|------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------|----------------------------|-------------|
| 1 | 15441,3 | 48,20% | - | 38,60% | 10,50% | 2,10% | 0,50% |
| 2 | 44,6 | 55,60% | - | 38,50% | 4,80% | 0,10% | 1,00% |
| 3 | 1055,3 | 58,00% | - | 32,40% | 7,50% | 1,10% | 0,90% |
| 4 | 201,4 | 24,40% | - | 49,40% | 22,00% | 3,90% | 0,40% |
| 5 | 20,7 | 24,00% | - | 69,70% | 4,10% | 1,60% | 0,60% |
| 6 | 1659 | 58,60% | - | 23,40% | 16,00% | 1,40% | 0,60% |
| 7 | 62,2 | 35,30% | - | 40,90% | 21,80% | 1,80% | 0,20% |
| 8 | 76,5 | 73,00% | - | 15,00% | 10,10% | 0,50% | 1,30% |
| 9 | 38,3 | 60,50% | - | 36,00% | 3,30% | - | 0,20% |
| 10 | 64,6 | 26,60% | - | - | 10,10% | 0,40% | 0,50% |
| 11 | 83,6 | 77,20% | - | - | 3,60% | 0,10% | 1,10% |
| 12 | 63,1 | 54,00% | - | 37,50% | 6,50% | 0,80% | 1,20% |
| 13 | 19,2 | 51,50% | - | 35,40% | 9,10% | 0,20% | 3,80% |
| 14 | 6,9 | 13,90% | - | 71,10% | 14,80% | 0,10% | 0,10% |
| 15 | 24,8 | 15,70% | - | 4,10% | 41,30% | 37,90% | 1,00% |
| 16 | 27,1 | 2,30% | - | 85,60% | 2,00% | 10,00% | - |
| 17 | 544,2 | 46,80% | - | 43,60% | 7,40% | 1,30% | 0,80% |
| 18 | 13,6 | 22,20% | - | 46,00% | 25,50% | 5,70% | 0,60% |
| 19 | 13,4 | 11,00% | - | 44,30% | 31,80% | 12,10% | 0,80% |
| 20 | 118,6 | 52,30% | - | 40,50% | 4,40% | 0,60% | 1,50% |
| 21 | 27,9 | 56,40% | - | 38,20% | 4,00% | 1,40% | - |
| 22 | 20,7 | 64,30% | - | 25,90% | 6,40% | 0,10% | 3,30% |
| 23 | 654,7 | 59,70% | - | 32,00% | 6,00% | 1,50% | 0,90% |
| 24 | 9,8 | 70,90% | - | 21,60% | 5,80% | 0,70% | 1,00% |
| 25 | 9,1 | 16,30% | - | 0,00% | 18,90% | 64,30% | - |
| 26 | 9,1 | 16,30% | - | 0,00% | 18,90% | 64,30% | - |
| 27 | 9,1 | 16,30% | - | 0,00% | 18,90% | 64,30% | - |

| Ponto de Monit. | Área Total (km ²) | Formação Floresta | Form. Não Florestal | Pastagem | Agricultura | Áreas não vegetadas | Água |
|-----------------|-------------------------------|-------------------|---------------------|----------|-------------|---------------------|--------|
| 28 | 9,1 | 16,30% | - | 0,00% | 18,90% | 64,30% | - |
| 29 | 9,1 | 16,30% | 0,40% | - | 18,90% | 64,30% | - |
| 30 | 9,1 | 16,30% | 0,40% | - | 18,90% | 64,30% | - |
| 31 | 65,8 | 56,30% | - | - | 3,60% | 0,20% | - |
| 32 | 24,7 | 30,70% | - | - | 3,90% | 0,20% | - |
| 33 | 43,2 | 60,90% | - | 37,60% | 1,50% | - | - |
| 34 | 120,7 | 32,30% | - | 0,50% | 64,40% | 1,00% | 1,40% |
| 35 | 120,7 | 32,30% | - | 0,50% | 64,40% | 1,00% | 1,40% |
| 36 | 120,7 | 32,30% | - | 0,50% | 64,40% | 1,00% | 1,40% |
| 37 | 120,7 | 32,30% | - | 0,50% | 64,40% | 1,00% | 1,40% |
| 38 | 120,7 | 32,30% | 0,40% | - | 64,40% | 1,00% | 1,40% |
| 39 | 8,5 | 15,50% | - | 0,20% | 20,20% | 64,00% | - |
| 40 | 36,8 | 23,20% | - | 0,10% | 19,00% | 56,70% | 0,40% |
| 41 | 36,8 | 23,20% | - | 0,10% | 19,00% | 56,70% | 0,40% |
| 42 | 36,8 | 23,20% | - | 0,10% | 19,00% | 56,70% | 0,40% |
| 43 | 19,1 | 15,80% | - | 69,40% | 9,00% | 4,30% | 1,50% |
| 44 | 20,6 | 22,30% | - | 0,00% | 7,70% | 69,80% | - |
| 45 | 20,6 | 22,30% | - | 0,00% | 7,70% | 69,80% | - |
| 46 | 41,7 | 18,20% | - | 0,00% | 7,80% | 73,80% | - |
| 47 | 41,7 | 18,20% | - | 0,00% | 7,80% | 73,80% | - |
| 48 | 12,4 | 17,90% | - | 0,00% | 10,80% | 71,20% | - |
| 49 | 12,3 | 39,30% | - | 0,00% | 4,20% | 46,10% | 9,60% |
| 50 | 50,9 | 20,00% | - | 2,10% | 28,30% | 47,10% | 2,40% |
| 51 | 19679 | 44,90% | - | 39,50% | 12,80% | 2,20% | 0,60% |
| 52 | 90,1 | 19,80% | 0,50% | - | 57,90% | 20,20% | 0,90% |
| 53 | 12,3 | 39,30% | 0,90% | - | 4,20% | 46,10% | 9,60% |
| 54 | 23,9 | 25,40% | 0,40% | - | 70,00% | 0,30% | 3,70% |
| 55 | 240 | 26,90% | 2,20% | - | 68,50% | 0,60% | 0,50% |
| 56 | 19547,6 | 44,90% | 0,00% | - | 12,50% | 2,20% | 0,60% |
| 57 | 19679 | 44,90% | 0,00% | - | 12,80% | 2,20% | 0,60% |
| 58 | 19679 | 44,90% | 0,00% | 39,50% | 12,80% | 2,20% | 0,60% |
| 59 | 57,3 | 26,70% | 2,00% | 0,10% | 59,80% | 1,20% | 10,20% |
| 60 | 19679 | 44,90% | 0,00% | 39,50% | 12,80% | 2,20% | 0,60% |
| 61 | 19679 | 44,90% | 0,00% | 39,50% | 12,80% | 2,20% | 0,60% |
| 62 | 19679 | 44,90% | - | 39,50% | 12,80% | 2,20% | 0,60% |
| 63 | 57,3 | 26,70% | - | 0,10% | 59,80% | 1,20% | 10,20% |
| 64 | 19709,4 | 44,80% | - | 39,50% | 12,80% | 2,20% | 0,60% |
| 65 | 19709,4 | 44,80% | 0,00% | 39,50% | 12,80% | 2,20% | 0,60% |
| 66 | 90,1 | 19,80% | - | 0,80% | 57,90% | 20,20% | 0,90% |
| 67 | 30,8 | 25,90% | 0,50% | 0,10% | 66,10% | 1,40% | 6,00% |
| 68 | 45 | 19,40% | - | 2,40% | 30,70% | 45,10% | 2,30% |
| 69 | 240 | 26,90% | - | 1,30% | 68,50% | 0,60% | 0,50% |

| Ponto de Monit. | Área Total (km ²) | Formação Floresta | Form. Não Florestal | Pastagem | Agricultura | Áreas não vegetadas | Água |
|-----------------|-------------------------------|-------------------|---------------------|----------|-------------|---------------------|-------|
| 70 | 22,5 | 9,10% | 0,00% | 61,00% | 29,50% | 0,20% | 0,20% |
| 71 | 19679 | 44,90% | 0,00% | 39,50% | 12,80% | 2,20% | 0,60% |
| 72 | 47,2 | 22,90% | 0,00% | 70,00% | 7,00% | 0,10% | - |
| 73 | 179,5 | 81,60% | 0,00% | 10,40% | 6,20% | 0,80% | 1,10% |
| 74 | 74,8 | 46,60% | 0,00% | 39,20% | 12,90% | 0,70% | 0,60% |
| 75 | 428 | 62,70% | 0,00% | 29,20% | 5,50% | 2,00% | 0,60% |
| 76 | 186,9 | 67,30% | 0,00% | 27,30% | 4,60% | 0,20% | 0,60% |
| 77 | 102,8 | 25,20% | 0,20% | 25,70% | 41,70% | 5,30% | 2,00% |
| 78 | 57,5 | 54,10% | 0,00% | 38,80% | 4,60% | 1,70% | 0,70% |
| 79 | 34,1 | 54,10% | 0,00% | 34,90% | 6,30% | 3,60% | 1,00% |
| 80 | 44,8 | 50,10% | 0,00% | 41,50% | 6,70% | 0,60% | 1,00% |
| 81 | 249 | 48,60% | 0,30% | 44,60% | 4,20% | 1,40% | 0,80% |
| 82 | 163 | 66,40% | 0,00% | 29,20% | 3,60% | 0,30% | 0,40% |
| 83 | 593,5 | 66,20% | 0,00% | 27,70% | 4,20% | 0,60% | 1,20% |

Fonte: Cobrape (2024).

Tabela 4.35 - Número de usuários cadastrados, ETAs e demais estruturas hidráulicas a montante de cada ponto de Monitoramento

| Pontos de Monitoramento | Número de ETAs Cadastradas a montante do ponto de Monitoramento | Número de Outorgas Cadastradas a montante do ponto de Monitoramento | Volume outorgado (mil m ³ /ano) |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1 | 18 | 499 | 54,6 |
| 2 | 0 | 4 | 0,23 |
| 3 | 1 | 17 | 4,77 |
| 4 | 1 | 2 | 0,03 |
| 5 | 1 | 1 | 0,84 |
| 6 | - | 36 | 0,9 |
| 7 | - | - | - |
| 8 | - | 2 | 0,05 |
| 9 | - | 1 | 0,38 |
| 10 | - | - | - |
| 11 | - | 1 | 0,35 |
| 12 | - | 2 | 0,1 |
| 13 | - | - | - |
| 14 | - | - | - |
| 15 | 1 | 20 | 6,42 |
| 16 | - | - | - |
| 17 | 1 | 13 | 0,32 |
| 18 | - | - | - |
| 19 | - | 9 | 0,18 |
| 20 | - | - | - |
| 21 | - | 1 | 0,002 |

| Pontos de Monitoramento | Número de ETAs Cadastradas a montante do ponto de Monitoramento | Número de Outorgas Cadastradas a montante do ponto de Monitoramento | Volume outorgado (mil m ³ /ano) |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 22 | - | - | - |
| 23 | 1 | 11 | 3,17 |
| 24 | - | - | - |
| 25 | - | 13 | 0,62 |
| 26 | - | 13 | 0,62 |
| 27 | - | 13 | 0,62 |
| 28 | - | 13 | 0,62 |
| 29 | - | 13 | 0,62 |
| 30 | - | 13 | 0,62 |
| 31 | - | 1 | 0,01 |
| 32 | - | - | - |
| 33 | - | - | - |
| 34 | - | 16 | 18,65 |
| 35 | - | 16 | 18,65 |
| 36 | - | 16 | 18,65 |
| 37 | - | 16 | 18,65 |
| 38 | - | 16 | 18,65 |
| 39 | - | 9 | 0,14 |
| 40 | - | 61 | 42,14 |
| 41 | - | 61 | 42,14 |
| 42 | - | 61 | 42,14 |
| 43 | - | - | - |
| 44 | - | 53 | 4,2 |
| 45 | - | 53 | 4,2 |
| 46 | - | 188 | 191,96 |
| 47 | - | 188 | 191,96 |
| 48 | - | 42 | 26,75 |
| 49 | - | 24 | 5,11 |
| 50 | 1 | 64 | 42,54 |
| 51 | 29 | 1060 | 223,29 |
| 52 | - | 54 | 14,93 |
| 53 | - | 24 | 5,11 |
| 54 | - | 3 | 1,55 |
| 55 | - | 47 | 34,48 |
| 56 | 29 | 1044 | 204,64 |
| 57 | 29 | 1060 | 223,29 |
| 58 | 29 | 1060 | 223,29 |
| 59 | - | 17 | 3,75 |
| 60 | 29 | 1060 | 223,29 |
| 61 | 29 | 1060 | 223,29 |
| 62 | 29 | 1060 | 223,29 |

| Pontos de Monitoramento | Número de ETAs Cadastradas a montante do ponto de Monitoramento | Número de Outorgas Cadastradas a montante do ponto de Monitoramento | Volume outorgado (mil m ³ /ano) |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 63 | - | 17 | 3,75 |
| 64 | 29 | 1098 | 228,84 |
| 65 | 29 | 1098 | 228,84 |
| 66 | - | 54 | 14,93 |
| 67 | - | 9 | 2,57 |
| 68 | 1 | 41 | 7,08 |
| 69 | - | 47 | 34,48 |
| 70 | - | - | - |
| 71 | 29 | 1060 | 223,29 |
| 72 | - | - | - |
| 73 | - | - | - |
| 74 | - | 4 | 0,29 |
| 75 | 1 | 10 | 3,08 |
| 76 | - | 2 | 0,01 |
| 77 | - | 66 | 8,21 |
| 78 | - | 1 | 0 |
| 79 | - | - | - |
| 80 | - | 1 | 0,01 |
| 81 | - | - | - |
| 82 | - | 2 | 0,05 |
| 83 | 2 | 4 | 1,19 |

Fonte: Cobrape (2024).

4.6.1.3 Situação da qualidade das águas

O monitoramento da qualidade da água desempenha um papel fundamental para auxiliar na identificação e compreensão dos impactos gerados aos recursos hídricos em uma determinada bacia hidrográfica. Para este diagnóstico, os parâmetros de qualidade monitorados pelo PERH-PB foram diferenciados conforme sua localização, objetivando avaliar a situação da qualidade da água e sua distribuição ao longo da Bacia do Rio Paraíba.

A qualidade da água não é uniforme na bacia hidrográfica e apresenta variações tanto em seu componente espacial como na componente temporal. Deste modo, no RP-02 é realizado um levantamento das variações climáticas na região de interesse, e neste documento verifica-se que o período de chuvas na Bacia do Rio Paraíba não é homogêneo. Na porção agreste, o período das chuvas inicia-se em março e estende-se até junho, enquanto no restante da bacia o período chuvoso inicia-se em abril e vai até julho, tendo maio como o mês com os mais elevados índices de precipitação.

Apesar destas diferenças, os dados disponibilizados pelo SNIRH não possibilitam uma análise temporal de forma detalhada devido à escassez de medições ao longo do ano. Assim, com objetivo de caracterizar a sazonalidade na qualidade das águas superficiais ao longo do ano, os dados oriundos do Hidroweb foram tabulados com um único período de chuvas para toda a

bacia hidrográfica. Dessa forma, considerou-se um período de verão seco de setembro a fevereiro e um inverno chuvoso de março a agosto.

- *Oxigênio Dissolvido (OD)*

A quantidade de oxigênio dissolvido na água é considerada um referencial da vida presente no corpo hídrico, já que este elemento é essencial aos organismos aquáticos aeróbios. Reduções na concentração deste parâmetro são provocadas principalmente por despejos orgânicos (Derisio, 1992). Von Sperling (1996) ressalta que:

- Valores de solubilidade do oxigênio variam com a altitude e a temperatura;
- Valores de OD superiores à saturação são indicativos da presença de algas; e,
- Valores bem inferiores à saturação indicam presença de matéria orgânica;

O valor médio de concentração de oxigênio dissolvido apresentado pelas estações de qualidade de água monitoradas pela ANA foi de 7,1 mg/L, com concentrações mínimas de 0,3 mg/L na estação de Itabaiana (caracterizando uma região com lançamento de efluentes que consome o oxigênio dissolvido) e a concentração máxima de 15,7 mg/L na estação de qualidade de água de PISF Ponte da Batalha (que aponta concentrações de oxigênio bastante acima da concentração de saturação).

Considerando a distribuição dos valores médios de concentração de OD apresentados, verifica-se uma variação reduzida, seja entre as medições realizadas na estação de chuva e de estiagem como entre as medições realizadas nas estações posicionadas no litoral ou no interior, com valores médios de concentração mais elevados durante o inverno na região mais agreste, conforme observado na Tabela 4.36.

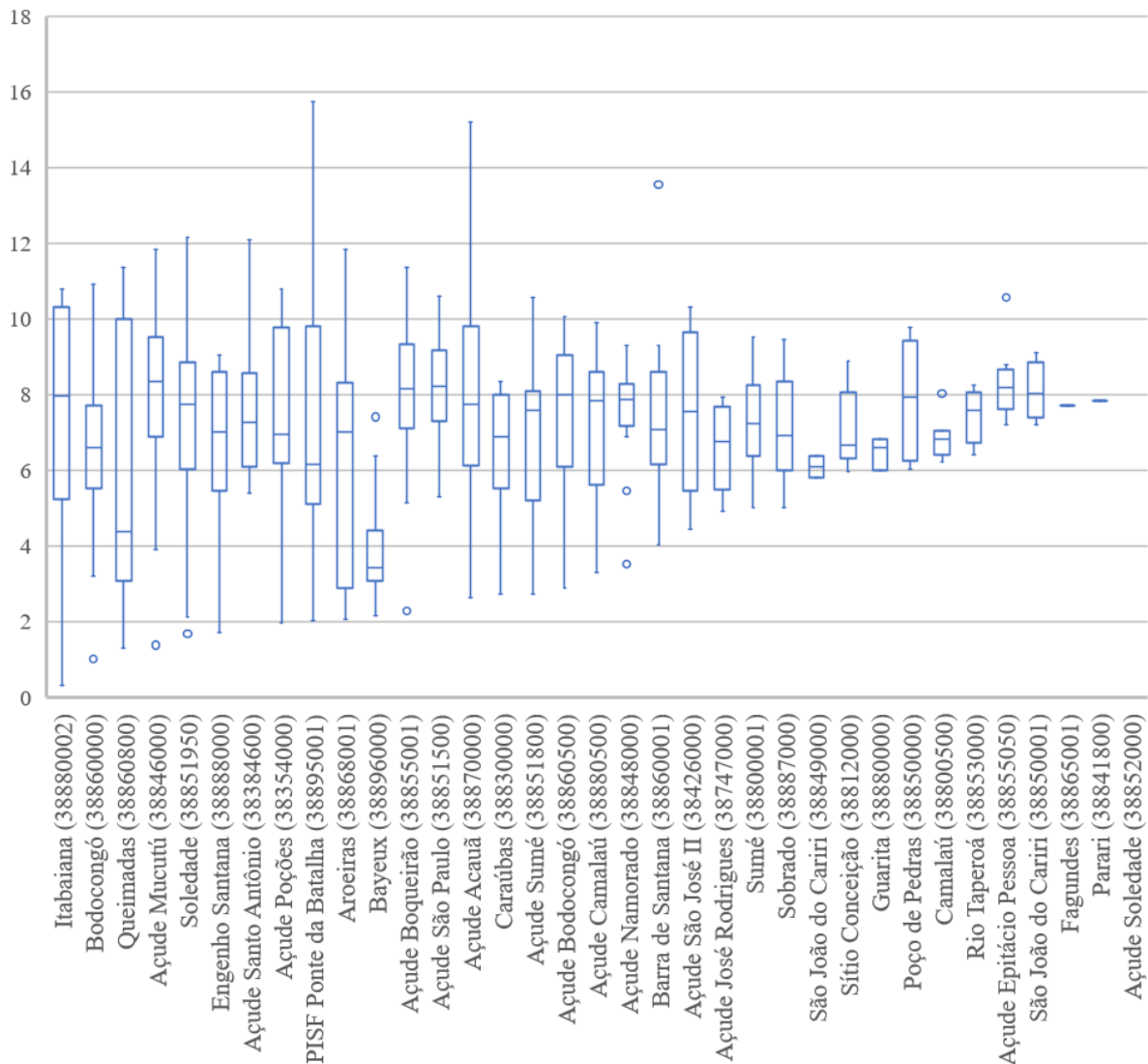
Tabela 4.36 - Concentração média de OD por estação do ano (mg/L)

| Sub-bacia | Inverno | Verão | Total Geral |
|---------------|------------|------------|-------------|
| Alto Paraíba | 7,7 | 7,1 | 7,4 |
| Médio Paraíba | 6,4 | 7,7 | 6,9 |
| Baixo Paraíba | 6,0 | 6,9 | 5,4 |
| Taperoá | 7,5 | 7,6 | 7,6 |
| Total | 7,0 | 7,3 | 7,1 |

Fonte: Adaptado de SNIRH (2024).

Apesar de ser observado uma variação mínima entre os valores médios apresentados, a qualidade das águas monitoradas apresenta uma grande variação nas medições de concentração em uma mesma estação de monitoramento, conforme apresentado na Figura 4.112. Esta amplitude aumentada na distribuição de valores, caracteriza a grande variação na concentração de OD que pode se encontrar no mesmo ponto, como na estação de qualidade de água de PISF Ponte da Batalha, onde foram constatadas tanto medições de OD inferiores a 2,0 mg/L, como também medições superiores a 14 mg/L.

Figura 4.112 - Concentrações de OD medidas pela ANA na Bacia do Paraíba



Fonte: SNIRH (2024), adaptado por Cobrape (2024).

- *Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)*

A DBO é a quantidade de oxigênio consumido na degradação da matéria orgânica biodisponível no meio aquático por processos biológicos. Normalmente, a determinação da DBO é realizada de forma indireta com amostras oxigenadas através da medição do oxigênio dissolvido residual, após um período de incubação pré-estabelecido a 20°Celsius, em que os resultados são expressos em termos de massa de oxigênio, consumido por volume de amostra.

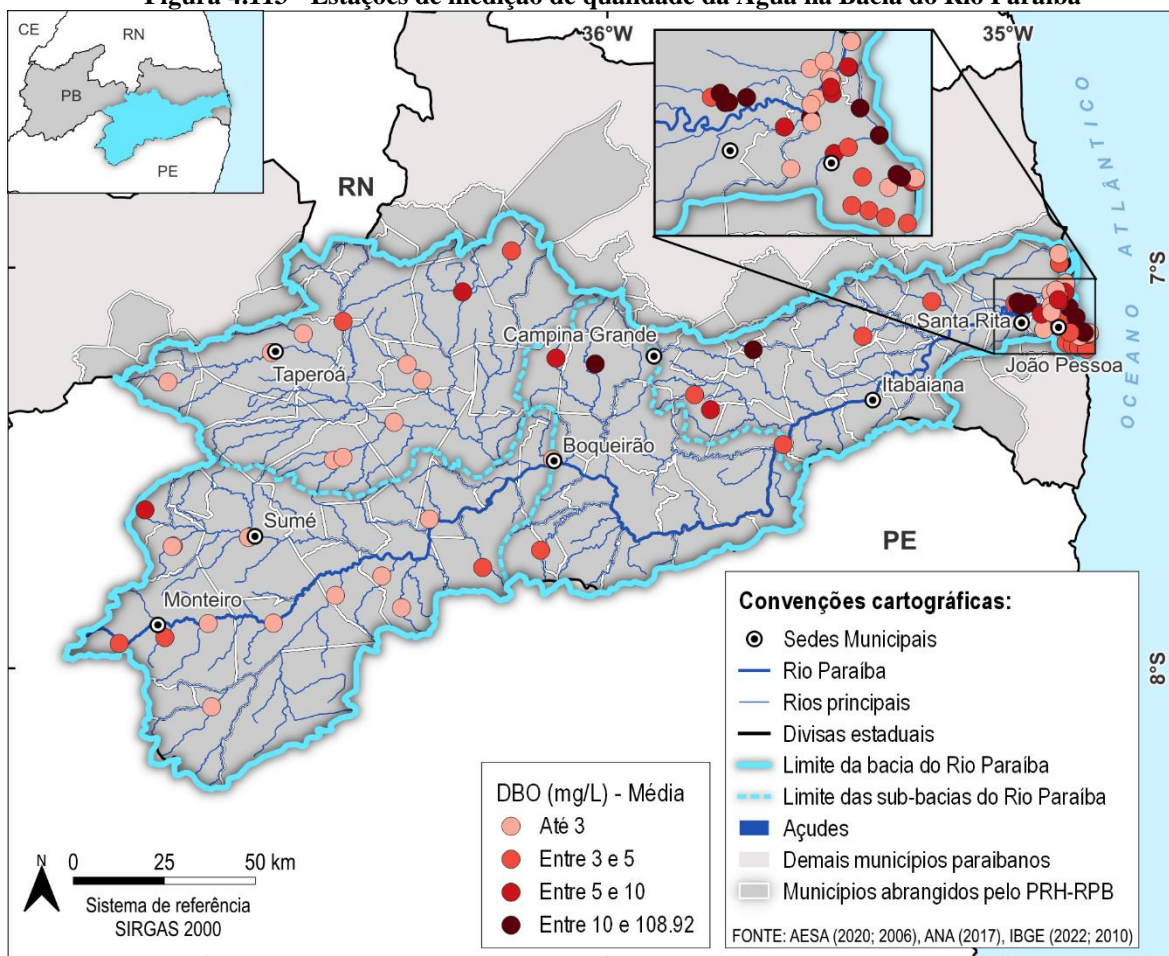
Verificando os dados disponibilizados pela CAGEPA e SUDEMA, a maioria das águas superficiais (45%) apresentou média de DBO dentro do limite para Classe 1 da Resolução CONAMA n° 357/2005, enquanto 15% apresentaram médias de DBO acima do requerido para Classe 3. Na distribuição destas medições de DBO₅ na bacia hidrográfica do Paraíba (Tabela 4.37), verifica-se que a qualidade das águas reduz à medida que o corpo hídrico se aproxima da foz.

Tabela 4.37 - Concentração média de DBO₅ por sub-bacia (mg/L)

| Sub-bacias | DBO ₅ Média |
|---------------|------------------------|
| Alto Paraíba | 2,8 |
| Médio Paraíba | 7,4 |
| Baixo Paraíba | 10,2 |
| Taperoá | 2,8 |
| Média | 7,6 |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

Destaca-se que a DBO média da bacia apresenta valores próximos aos valores atribuídos para o Baixo Paraíba, isso ocorre porque aproximadamente 60% dos pontos encontram-se nesta sub-bacia, como pode ser observado na Figura 4.113.

Figura 4.113 - Estações de medição de qualidade da Água na Bacia do Rio Paraíba

Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

- *Turbidez*

A turbidez da água está diretamente relacionada a concentração de partículas sólidas e coloidais em suspensão. Durante o período chuvoso, os sedimentos carregados da bacia de contribuição para os açudes pelo escoamento superficial, aumentam a concentração de material em suspensão, elevando a turbidez da água. Por outro lado, no longo período de estiagem, a turbidez da água tende a variar, em função da profundidade do corpo d'água e da intensidade

dos ventos, sendo que quanto menor for a profundidade do açude, mais os sedimentos são revolvidos.

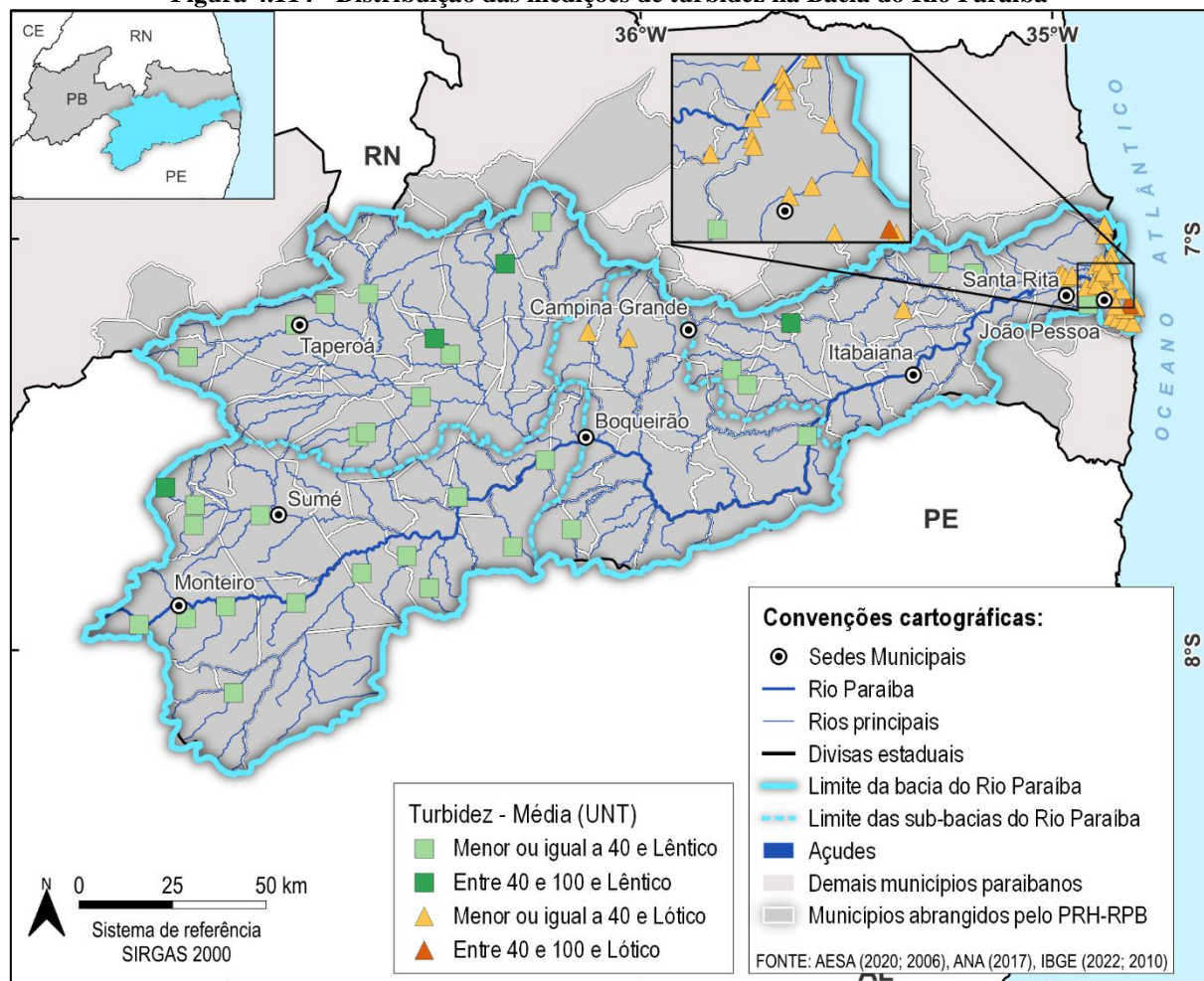
Considerando os valores médios de turbidez da água levantados pelo PERH-PB, todos os corpos hídricos contidos na Bacia do Paraíba estão em conformidade com os limites estabelecidos pela Resolução n° 357/2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) para águas doces, Classes 1 (40 UNT) e 2 (100 UNT), com uma turbidez média de 19,5 UNT variando entre 2,0 UNT (no baixo Paraíba) e 74 UNT (açude Gurjão). Considerando os valores médios de turbidez, temos que a bacia do Taperoá apresenta água com maior turbidez, como pode ser observado na Tabela 4.38, com a distribuição espacial destas estações de monitoramento sendo apresentada na Figura 4.114.

Tabela 4.38 - Valores médios de turbidez por sub-bacia (UNT)

| Sub-bacias | Turbidez Média |
|---------------|----------------|
| Alto Paraíba | 20,7 |
| Médio Paraíba | 16,6 |
| Baixo Paraíba | 17,9 |
| Taperoá | 31,3 |
| Média | 19,5 |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

Figura 4.114 - Distribuição das medições de turbidez na Bacia do Rio Paraíba



Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

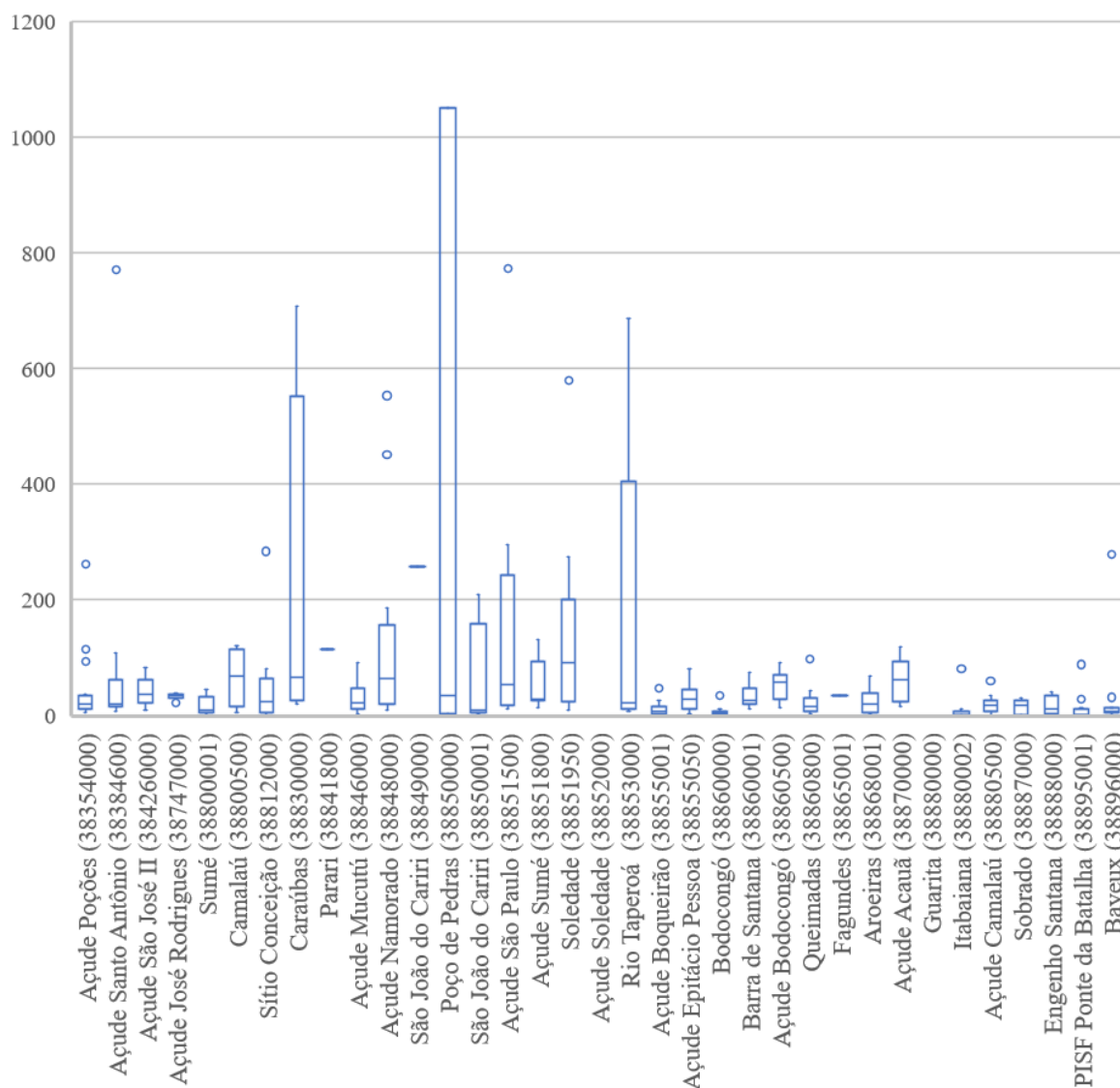
Analisando as estações de qualidade da ANA é possível verificar que a distribuição de valores varia também em um mesmo ponto de coleta, principalmente devido a diferentes condições climáticas, conforme é mostrado na Tabela 4.39. Neste caso, verifica-se que o período de chuvas (inverno) não influenciou a qualidade da água no baixo curso do rio, mas teve uma influência negativa na sub-bacia do Taperoá, enquanto nas regiões do Médio e Alto Paraíba, regiões mais agrestes, a turbidez da água diminuiu. A distribuição dos resultados de turbidez das estações de qualidade da ANA pode ser observada na Figura 4.115.

Tabela 4.39 - Valores médios de turbidez por estação do ano (UNT)

| Sub-bacia | Inverno | Verão | Total Geral |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Alto Paraíba | 49,5 | 68,9 | 58,5 |
| Médio Paraíba | 27,5 | 38,5 | 32,0 |
| Baixo Paraíba | 19,9 | 14,9 | 17,3 |
| Taperoá | 127,6 | 86,0 | 111,0 |
| Total | 51,0 | 52,4 | 51,6 |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

Figura 4.115 - Valores de turbidez medidos pela ANA na Bacia do Paraíba (UNT)



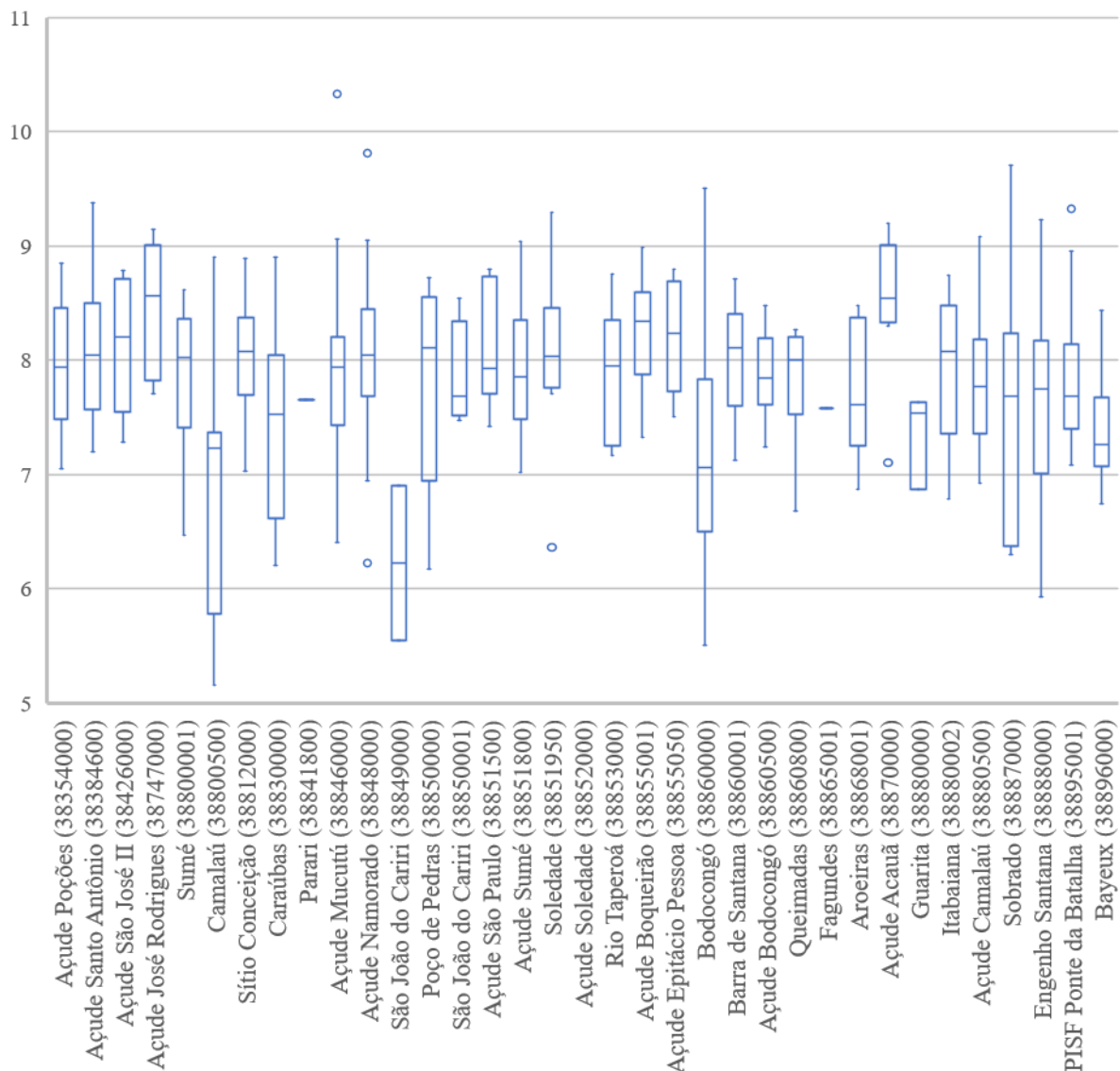
Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

- *pH*

O pH levemente alcalino da água dos açudes, por sua vez, advém dos elevados níveis de produção primária das algas e cianobactérias, as quais, no processo de fotossíntese, consomem carbono inorgânico dissolvido da água, elevando seu pH.

Nas estações de qualidade monitoradas pela ANA, foi observado um pH levemente alcalino, com pH médio de 7,8, com valores variando entre 5,15 no açude Camalaú e 10,33 no açude Mucutu. Apesar de serem constatados valores médios com pouca variabilidade, as estações de monitoramento individualmente apresentam uma grande variabilidade de valores, como pode ser observado na Figura 4.116.

Figura 4.116 - Valores de pH medidos pela ANA na Bacia do Paraíba



Fonte: ANA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

O pH destes corpos hídricos é resultante das condições geográficas dos mesmos bem como das condições meteorológicas que antecederam a coleta. Desse modo, é possível verificar que as

águas tendem a ser um pouco mais ácidas durante o período de chuvas, como pode-se observar na Tabela 4.40.

Tabela 4.40 - Valores médios de pH por estação do ano

| Sub-bacia | Inverno | Verão | Total |
|---------------|------------|------------|------------|
| Alto Paraíba | 7,8 | 8,0 | 7,9 |
| Médio Paraíba | 7,5 | 7,8 | 7,6 |
| Baixo Paraíba | 7,8 | 7,7 | 7,7 |
| Taperoá | 7,8 | 8,2 | 7,9 |
| Total | 7,7 | 7,9 | 7,8 |

Fonte: adaptado de SNIRH (2024).

- *Coliformes Totais e Escherichia Coli (Balneabilidade)*

Entende-se que balneabilidade é a qualidade das águas destinadas à recreação de contato primário, sendo este entendido como um contato direto e prolongado com a água (natação, mergulho, esqui-aquático, etc.), onde a possibilidade de ingerir quantidades apreciáveis de água é elevada.

A legislação que estabelece os critérios e limites para análise de balneabilidade é a Resolução CONAMA nº 274, de 29 de novembro de 2000, conforme observa-se na Tabela 4.41.

Tabela 4.41 - Limites de Balneabilidade

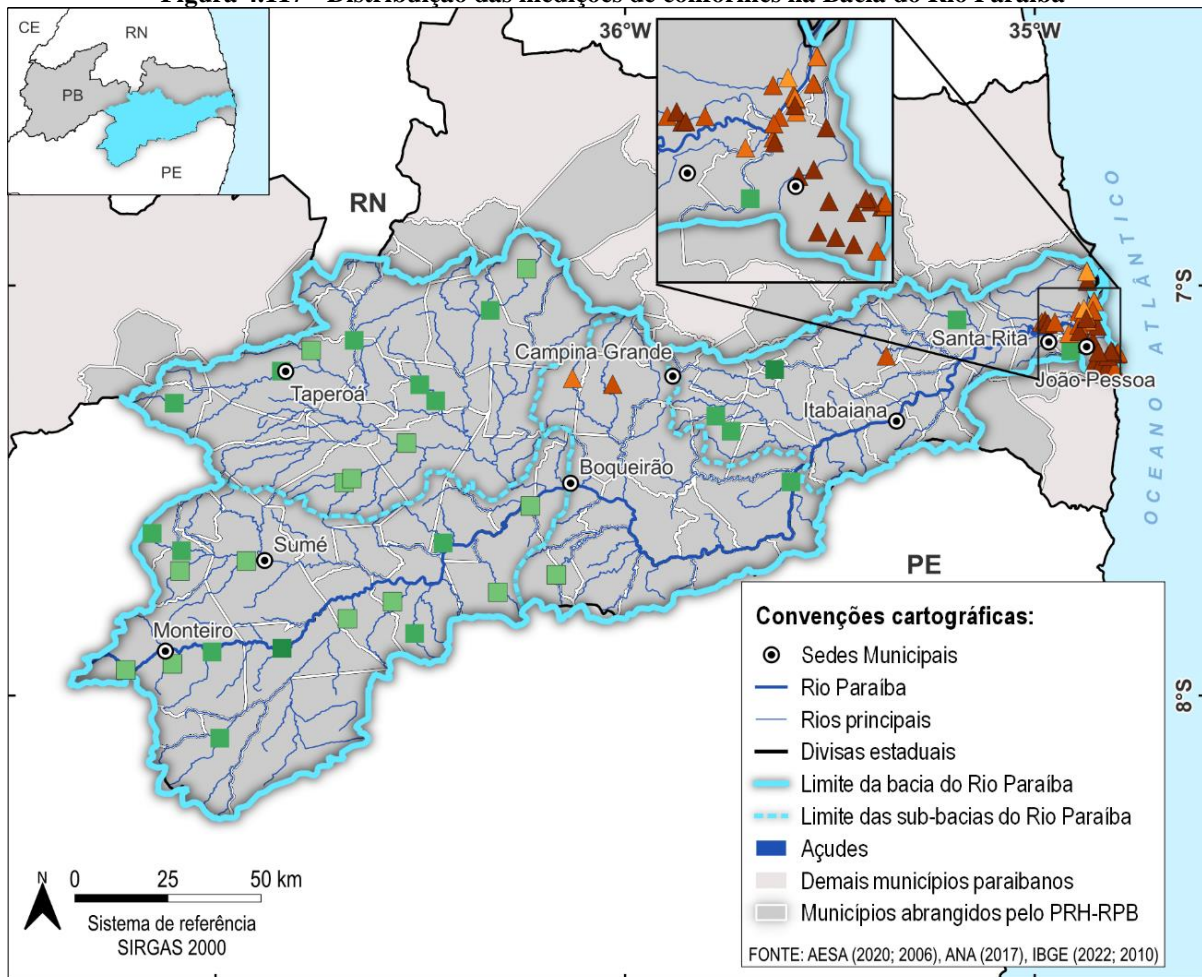
| Categoria | Coliformes termotolerantes | <i>E. coli</i> | |
|-----------|----------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Própria | Excelente | Máximo de 250 UFC/100mL em 80% do tempo | Máximo de 200 UFC/100mL em 80% do tempo |
| | Boa | Máximo de 500 UFC/100mL em 80% do tempo | Máximo de 400 UFC/100mL em 80% do tempo |
| | Satisfatória | Máximo de 1.000 UFC/100mL em 80% do tempo | Máximo de 800 UFC/100mL em 80% do tempo |
| Imprópria | | Máximo de 1.000 UFC/100mL em 80% do tempo | Máximo de 800 UFC/100mL em 80% do tempo |
| | | Máximo de 500 UFC/100mL em 80% do tempo | Máximo de 20.000 UFC/100mL em 80% do tempo |

Fonte: Resolução CONAMA nº 274, de 29 de novembro de 2000.

* UFC (Unidade formadora de colônia)

Os coliformes termotolerantes estão presentes em fezes humanas e de outros animais homeotérmicos, além de ocorrerem em solos, plantas ou outros substratos que tenham sido contaminados por material fecal. Com essas características, os coliformes termotolerantes consistem em importantes bioindicadores de contaminação por esgoto doméstico. A distribuição destas estações de monitoramento é apresentada no mapa da Figura 4.117.

Figura 4.117 - Distribuição das medições de coliformes na Bacia do Rio Paraíba



CT - Média NMP/100 mL

| | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| ■ Menor ou igual a 200 e Lêntico | ▲ Menor ou igual a 200 e Lótico |
| ■ Entre 200 e 1000 e Lêntico | ▲ Entre 200 e 1000 e Lótico |
| ■ Entre 1000 e 4000 e Lêntico | ▲ Entre 1000 e 4000 e Lótico |
| ■ Entre 4000 e 427.867 e Lêntico | ▲ Entre 4000 e 427.867 e Lótico |

Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

No mapeamento dos pontos monitorados verifica-se que grande parte estão localizados em regiões apropriadas para o contato direto com a água, porém são constatados pontos impróprios tanto na região próxima ao litoral, quanto no Médio Paraíba.

Quando verificamos as condições estabelecidas pela Resolução CONAMA n° 357/2005, 44% dos pontos de monitoramento da CAGEPA e SUDEMA estiveram dentro dos padrões estabelecidos para a Classe 1 (≤ 200 NMP 100mL-1), 50% com densidade entre 200 e 1.000 NMP 100mL-1 (Classe 2), e 1% com valores superiores a 1.000 NMP 100mL-1, sendo 2 pontos de amostra com mais de 100.000 NMP 100mL-1. A distribuição das medições de coliformes termotolerantes na bacia hidrográfica do Rio Paraíba (Tabela 4.42), corrobora que a qualidade das águas reduz a medida que o corpo hídrico se aproxima da foz.

Tabela 4.42 - Concentração média de coliformes por sub-bacia

| Sub-bacias | Concentração média (NMP/100mL) |
|---------------|--------------------------------|
| Alto Paraíba | 349 |
| Médio Paraíba | 341 |
| Baixo Paraíba | 643 |
| Taperoá | 357 |
| Média | 388 |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

Dentre as espécies do grupo dos coliformes termotolerantes, tem-se a *Escherichia Coli*, que se hospeda exclusivamente no intestino humano e de animais homeotérmicos, sendo atualmente utilizada como indicador de contaminação por esgoto doméstico. Pode-se verificar que em aproximadamente 79% dos pontos estudados foi constatada a presença de alguma contaminação por esgotos domésticos, conforme se observa na Tabela 4.43.

Tabela 4.43 - Contagem de E-Coli segundo da CAGEPA e SUDEMA (PERH)

| Sub-bacia | Ausente | Presente |
|---------------|------------|------------|
| Alto Paraíba | 20% | 80% |
| Médio Paraíba | 17% | 83% |
| Baixo Paraíba | 28% | 72% |
| Taperoá | 14% | 86% |
| Total | 21% | 79% |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

- *Fósforo*

O fósforo é um dos principais nutrientes necessários à vida de organismos aquáticos, sendo muitas vezes o principal fator limitante ao crescimento desses organismos. Este elemento está presente em pequenas quantidades na natureza e aumentos em sua concentração estão ligados a ações antrópicas, principalmente ao despejo de esgotos domésticos (DERISIO, 1992) e à drenagem pluvial de áreas agrícolas e urbanas. Torna-se um fator ainda mais preocupante quando introduzido em ambientes lênticos (lagos e reservatórios) já que não é naturalmente degradado como a matéria orgânica.

A eutrofização (aumento da concentração de nutrientes) desses ambientes ocasiona a floração de algas que utilizam este nutriente para se desenvolver (aumento da produtividade primária). Algumas dessas algas produzem toxinas que podem inviabilizar os usos da água para abastecimento público e recreação.

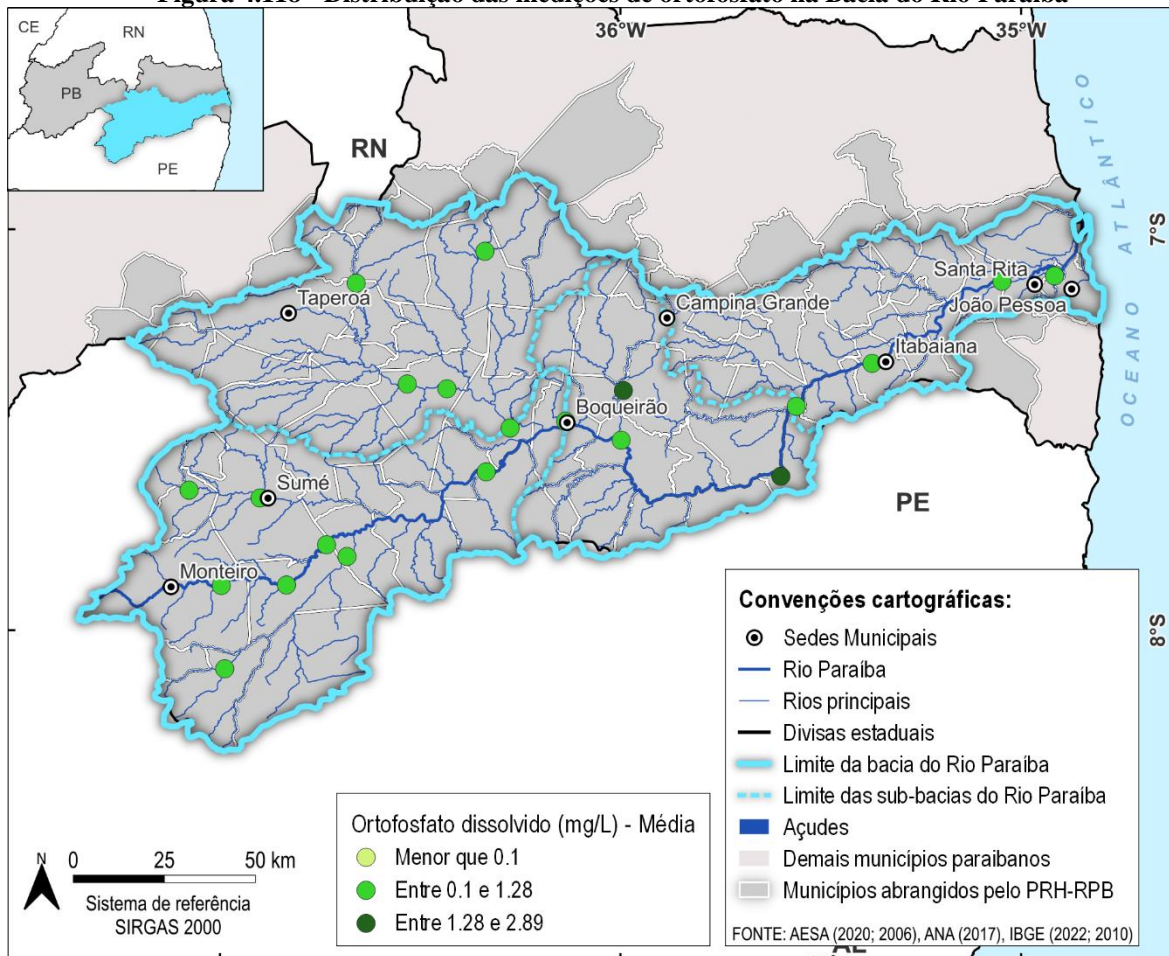
Na água, o fósforo apresenta-se nas formas de ortofosfato, disponíveis para metabolismo orgânico; polifosfato, moléculas mais complexas; e fósforo orgânico, de menor importância (Von Sperling, 1996).

A concentração média de ortofosfato é de 0,76 mg/L, variando entre 2,9 mg/L no parque Bodocongó e 0,1 mg/L no açude Poções. A distribuição destes valores médios é apresentada no mapa da Tabela 4.44. A distribuição das estações de monitoramento é apresentada no mapa da Figura 4.118.

Tabela 4.44 - Valores médios de concentração de Ortofosfato por sub-bacia (mg/L)

| Sub-bacias | Ortofosfato Médio |
|---------------|-------------------|
| Alto Paraíba | 0,40 |
| Médio Paraíba | 1,40 |
| Baixo Paraíba | 0,93 |
| Taperoá | 0,50 |
| Média | 0,76 |

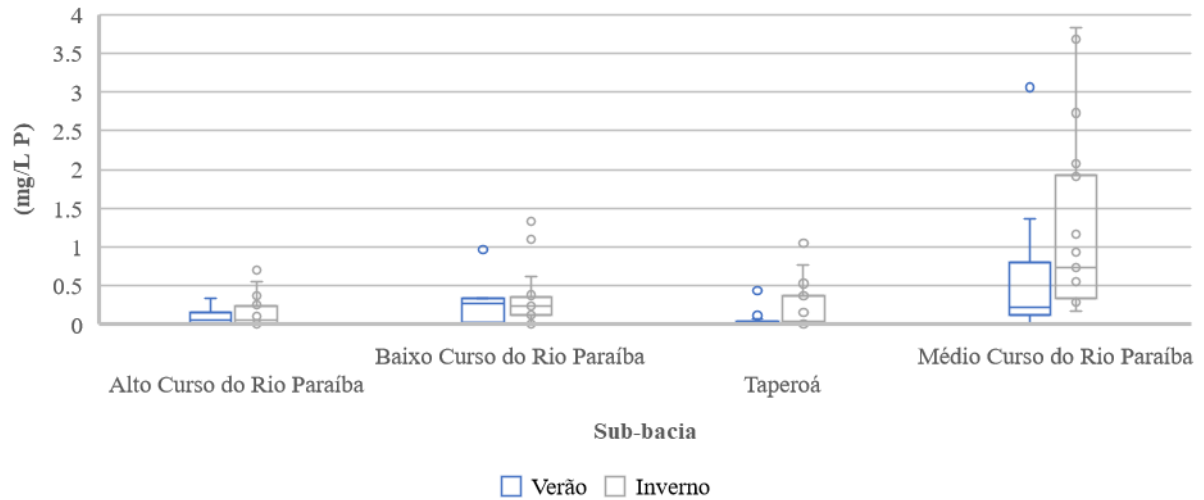
Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

Figura 4.118 - Distribuição das medições de ortofosfato na Bacia do Rio Paraíba

Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

Analisando os dados fornecidos pelo Portal Hidroweb (Figura 4.119), observa-se um maior aporte de fósforo nos períodos de chuvas, principalmente no Médio Curso do Paraíba, devido ao carreamento de solo e partículas sólidas pelas águas de chuva.

Figura 4.119 - Concentrações médias de ortofosfato por estação do Ano



Fonte: adaptado de SNIRH (2024).

- *Nitrogênio*

Assim como o fósforo, o nitrogênio é um importante nutriente que possibilita o crescimento de organismos aquáticos e contribui para a ocorrência de eutrofização (Derisio, 1992). Ele pode estar presente em várias formas no meio aquático.

Quando encontrado na forma de amônia, indica poluição recente, além de ser diretamente tóxico aos peixes. Poluições remotas estão associadas ao nitrogênio na forma de nitrato (Von Sperling, 1996). A principal normativa que caracteriza os corpos hídricos quanto a concentração de amônia é a Resolução CONAMA nº 357 de março de 2005. Neste caso apenas 2% das medições de nitrogênio amoniacal estavam em desacordo com os critérios de Classe I da referida resolução.

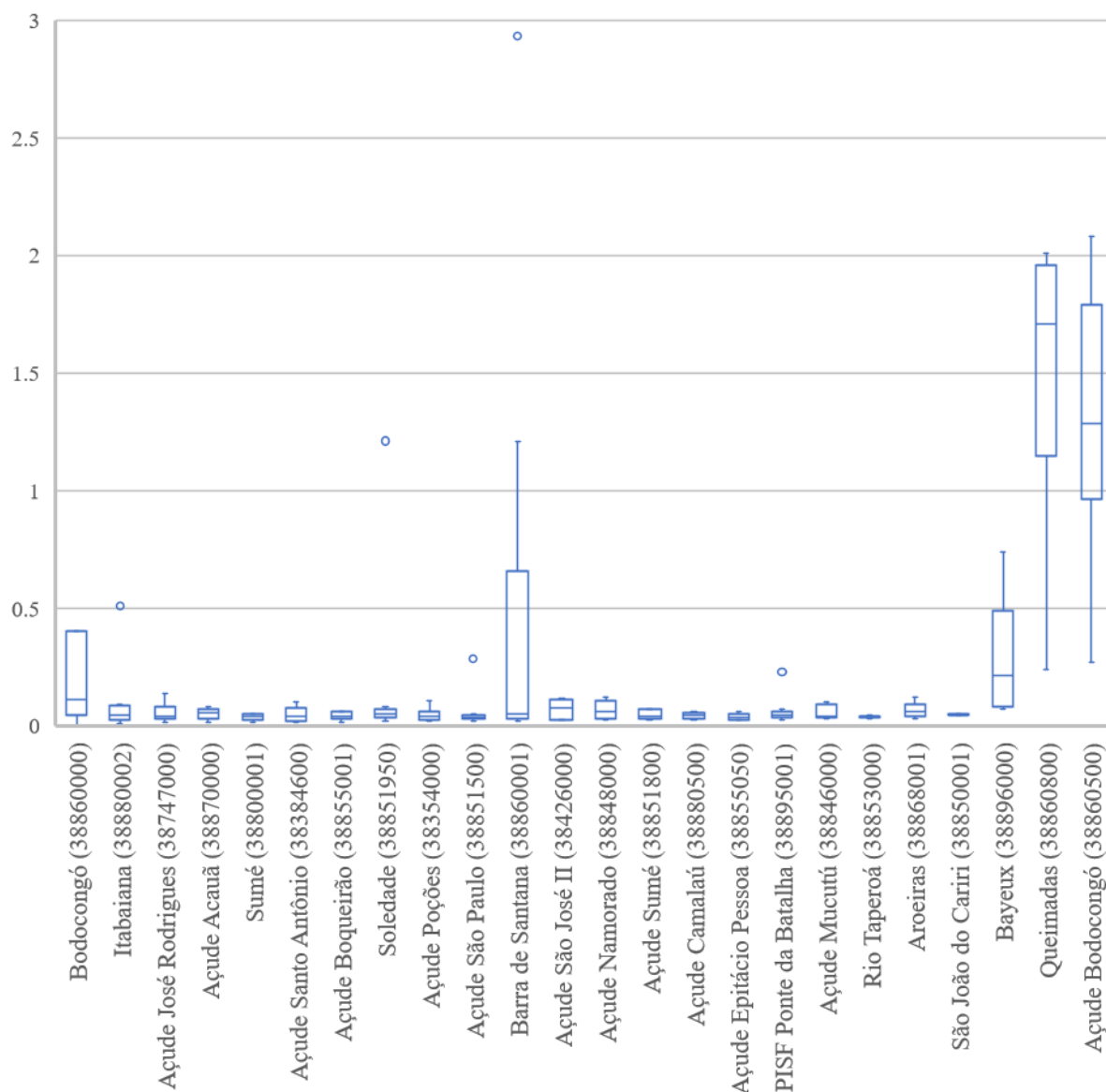
No que se refere à sazonalidade na presença de nitrogênio amoniacal nos corpos hídricos da Bacia do Rio Paraíba (Tabela 4.45), verifica-se um maior aporte de nutrientes na região do Médio Paraíba durante o período de chuvas corroborando o comportamento observado no item relativo ao Fósforo. Os valores médios de nitrogênio amoniacal, obtidos para o período de 2018-2021, são apresentados na Figura 4.120.

Tabela 4.45 - Concentração média de nitrogênio amoniacal por estação do ano (mg/L)

| Sub-bacia | Inverno | Verão | Total Geral |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Alto Paraíba | 0,05 | 0,04 | 0,05 |
| Médio Paraíba | 0,79 | 0,41 | 0,62 |
| Baixo Paraíba | 0,10 | 0,16 | 0,13 |
| Taperoá | 0,06 | 0,13 | 0,09 |
| Total | 0,25 | 0,16 | 0,21 |

Fonte: Adaptado de ANA (2024).

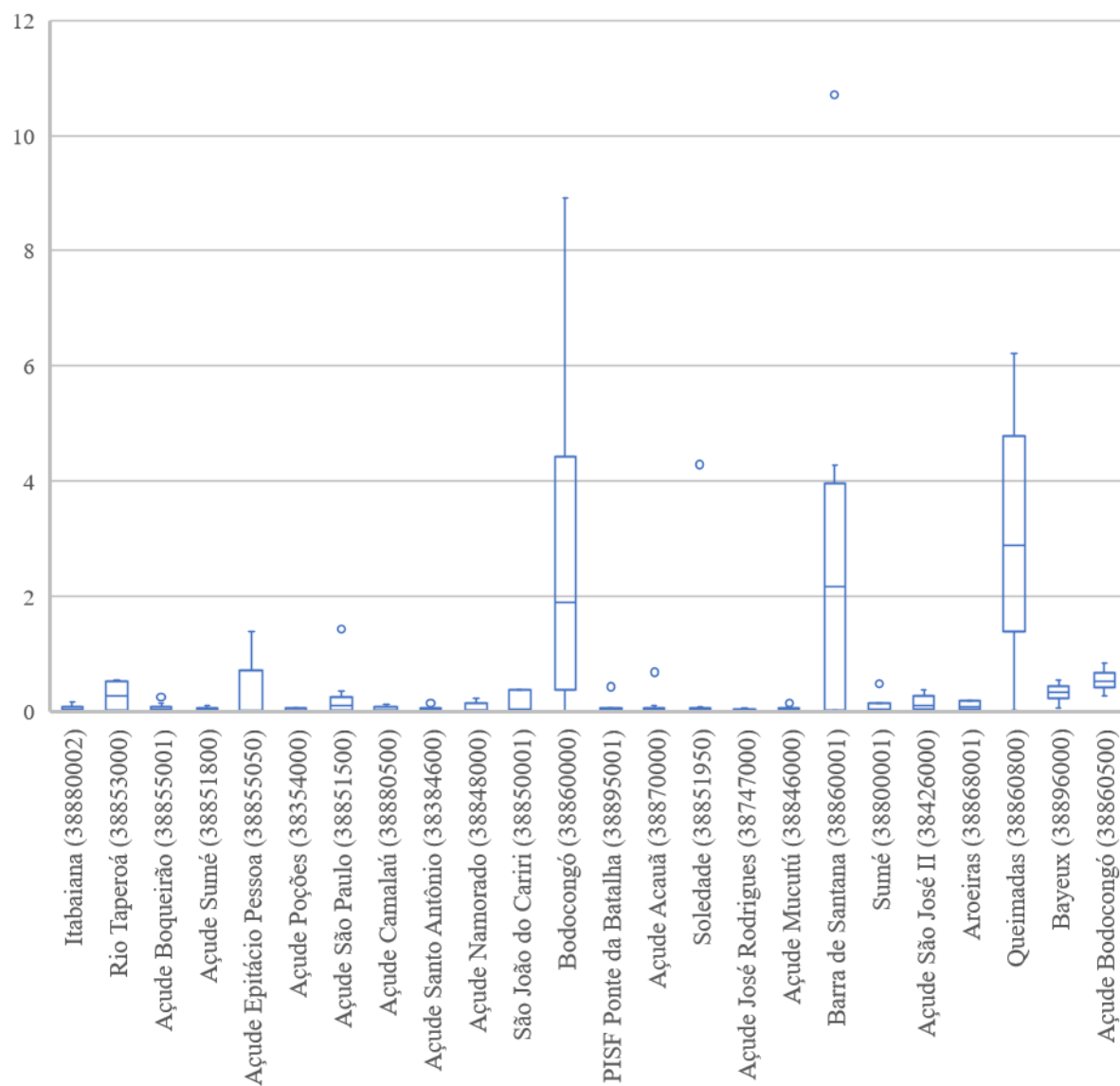
Figura 4.120 - Concentração de Nitrogênio amoniacal medidos pela ANA na Bacia do Paraíba (mg/L)



Fonte: ANA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

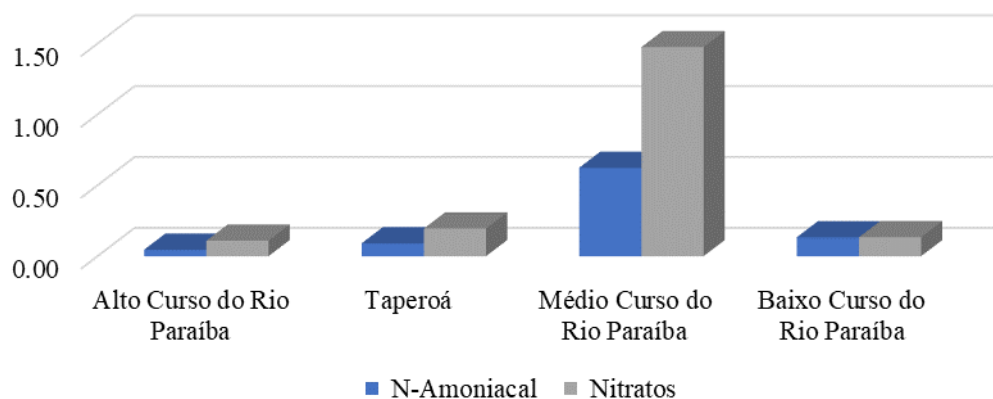
O íon amônio pode estar presente, naturalmente, no meio aquático, porém com concentrações bem baixas. A presença de elevados níveis de amônia podem ser indicativos de poluição recente, por matéria orgânica ou fertilizantes, como também produto da redução de nitrato por bactérias ou por íons ferrosos presentes no solo. A concentração de nitratos obtidos no período de 2018 - 2021 são apresentados na Figura 4.121.

Figura 4.121 - Concentração de Nitrato medidos pela ANA na Bacia do Paraíba (mg/L)



Fonte: ANA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Considerando os dados de monitoramento das frações de nitrogênio ao longo da bacia hidrográfica (Figura 4.122), verifica-se um grande aporte nitrogênio na região de Médio Curso do Rio Paraíba.

Figura 4.122 - Concentração de Nitrogênio amoniacal medidos pela ANA na Bacia do Paraíba (mg/L)

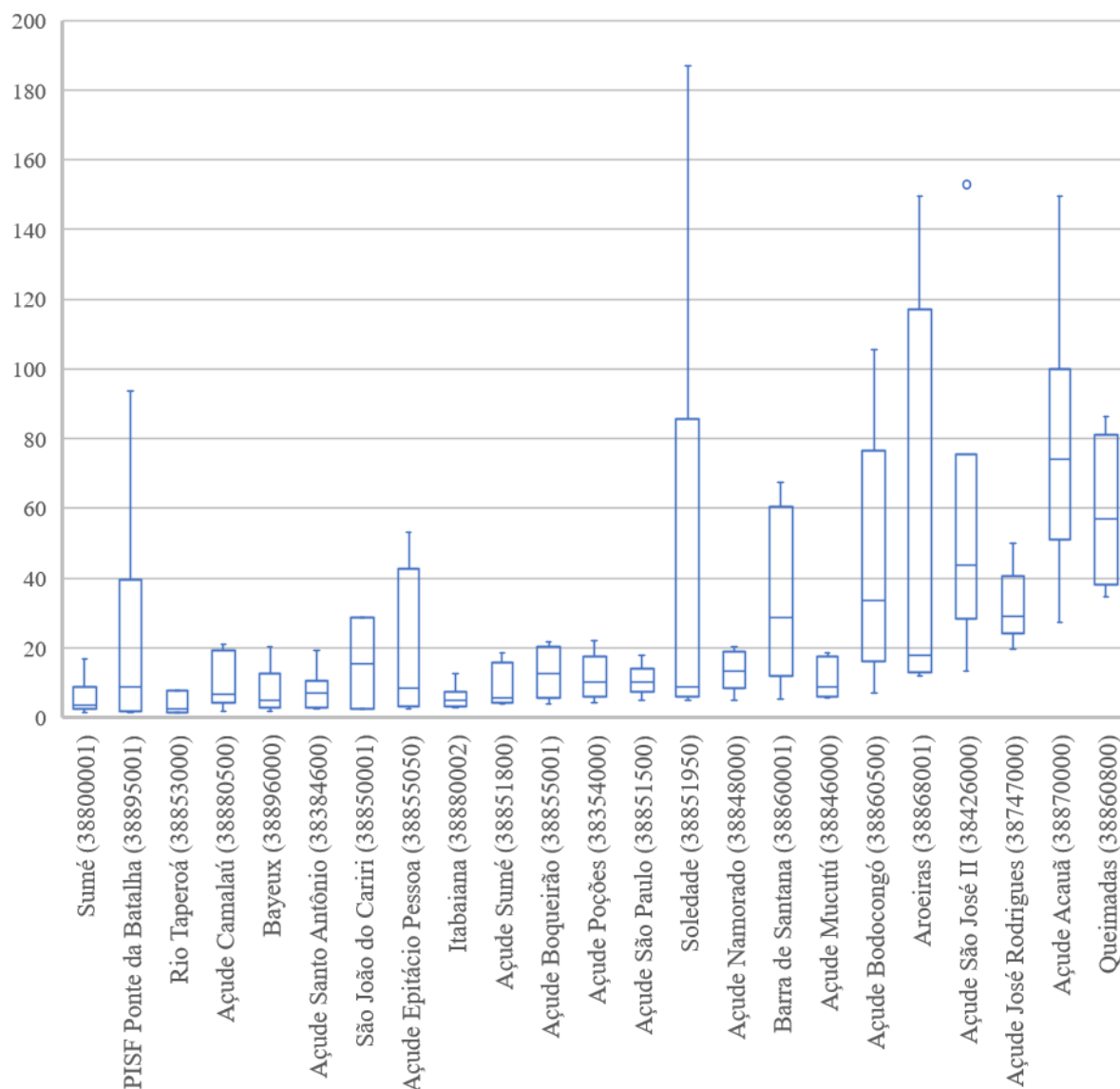
Fonte: ANA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

- *Clorofila-a*

A clorofila-a é o pigmento que dá coloração verde a alguns tecidos vegetais, sendo também um dos compostos responsáveis pela fotossíntese e é considerada a principal variável indicadora do estado trófico dos ambientes aquáticos. A concentração de clorofila-a na água está diretamente ligada a quantidade de algas presentes nos corpos hídricos.

Dentre os pontos monitorados pela ANA, 46% estiveram dentro dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 357/2005, para Classe 1 ($\leq 100 \mu\text{g/L}$), 45% com densidade entre 10 e 60 NMP 100mL⁻¹ (Classe 2), e 10% com valores superiores a 60 $\mu\text{g/L}$. A distribuição dos valores de medição está apresentado na Figura 4.123.

Figura 4.123 - Valores de clorofila-a medidos pela ANA na Bacia do Paraíba ($\mu\text{g/L}$)



Fonte: ANA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

As medições de clorofila-a realizadas pela ANA apresentaram uma pequena sazonalidade, uma vez que o período de maior incidência solar apresentou maiores concentrações de clorofila, como pode ser observado na Tabela 4.46.

Tabela 4.46 - Concentração média de clorofila-a pôr estação do ano ($\mu\text{g/L}$)

| Sub-bacia | Inverno | Verão | Total Geral |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Alto Paraíba | 11,0 | 19,4 | 15,0 |
| Médio Paraíba | 47,2 | 63,1 | 53,6 |
| Baixo Paraíba | 14,4 | 19,4 | 16,9 |
| Taperoá | 27,1 | 17,2 | 22,2 |
| Total | 22,3 | 26,6 | 24,3 |

Fonte: adaptado de ANA (2024).

- *Cianobactérias*

O plâncton consiste na comunidade que vive na água, caracterizado por organismos de pequeno tamanho, desde alguns micrômetros até poucos milímetros, e possuem pouca capacidade de locomoção. Os ambientes aquáticos e, em especial os lagos (incluindo os reservatórios), possuem comunidades planctônicas com variedade, abundância e distribuição próprias, as quais dependem das características abióticas (temperatura, luz, oxigênio dissolvido e concentração de nutrientes) e bióticas (predadores, parasitas, competição) (Di Bernardo *et al.*, 2010).

Uma das principais famílias de fitoplâncton, encontradas em reservatórios tropicais, consiste nas cianobactérias que possuem importante significado ecológico e sanitário, por serem indicadores biológicos de alteração na qualidade das águas. Isso se deve a um enriquecimento artificial dos corpos d'água, por nutrientes em excesso, principalmente nitrogênio e fósforo, os quais provocam uma reprodução acelerada das cianobactérias, levando, assim, ao processo de eutrofização de águas superficiais. Além disso, possuem a capacidade de sintetizar compostos bioativos (cianotoxinas), que promovem efeito toxigênico à biota aquática e a seres humanos (Di Bernardo *et al.*, 2010).

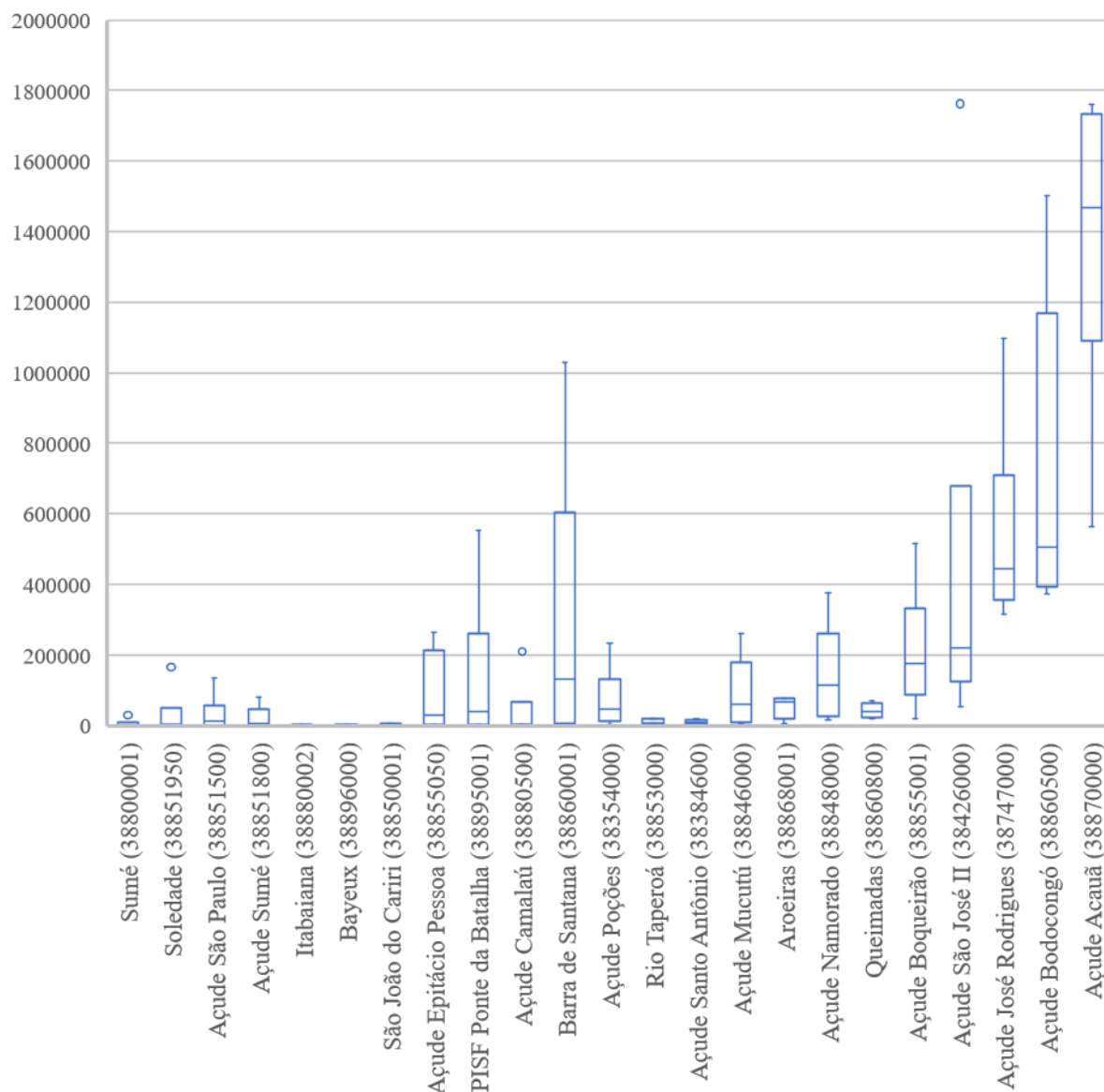
Valores de densidade de fitoplâncton, disponibilizados pela ANA, foram analisados, no período de 2017 a 2021, em pontos estratégicos das bacias hidrográficas. Os valores médios na concentração de cianobactérias ao longo da bacia hidrográfica podem ser observados na Tabela 4.47 e a distribuição dos valores de medição está apresentada na Figura 4.124.

Tabela 4.47 - Concentração média de cianobactérias por estação do ano (células/ml)

| Sub-bacia | Inverno | Verão | Geral |
|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Alto Paraíba | 68.441 | 133.522 | 99.206 |
| Médio Paraíba | 454.024 | 753.436 | 573.789 |
| Baixo Paraíba | 121.621 | 217.673 | 169.647 |
| Taperoá | 122.639 | 38.268 | 80.454 |
| Total | 173.955 | 241.391 | 205.497 |

Fonte: Adaptado de ANA (2024).

Figura 4.124 - Valores de cianobactérias medidos pela ANA na Bacia do Paraíba (células/ml)



Fonte: ANA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

- *Salinidade*

A salinidade mede a quantidade de sais dissolvidos nas águas dos lagos e reservatórios. De acordo com a Resolução CONAMA n° 357/2008, águas com salinidade igual ou inferior a 0,5 ‰ (ppm) são consideradas como águas doces, entre 0,5 e 30 ‰ (ppm), como águas salobras, e superior a esse valor, como salgadas.

Nos ambientes lóticos (rios e riachos), a salinidade teve médias entre 0 e 31 ppm. Ao todo, 53% dos rios e riachos monitorados apresentaram salinidade média superior a 0,5 ppm, sendo apenas 01 (um) ponto superior a 30 ppm (Rio Paraíba - PB 04 Est), por serem amostras coletadas em área estuarina.

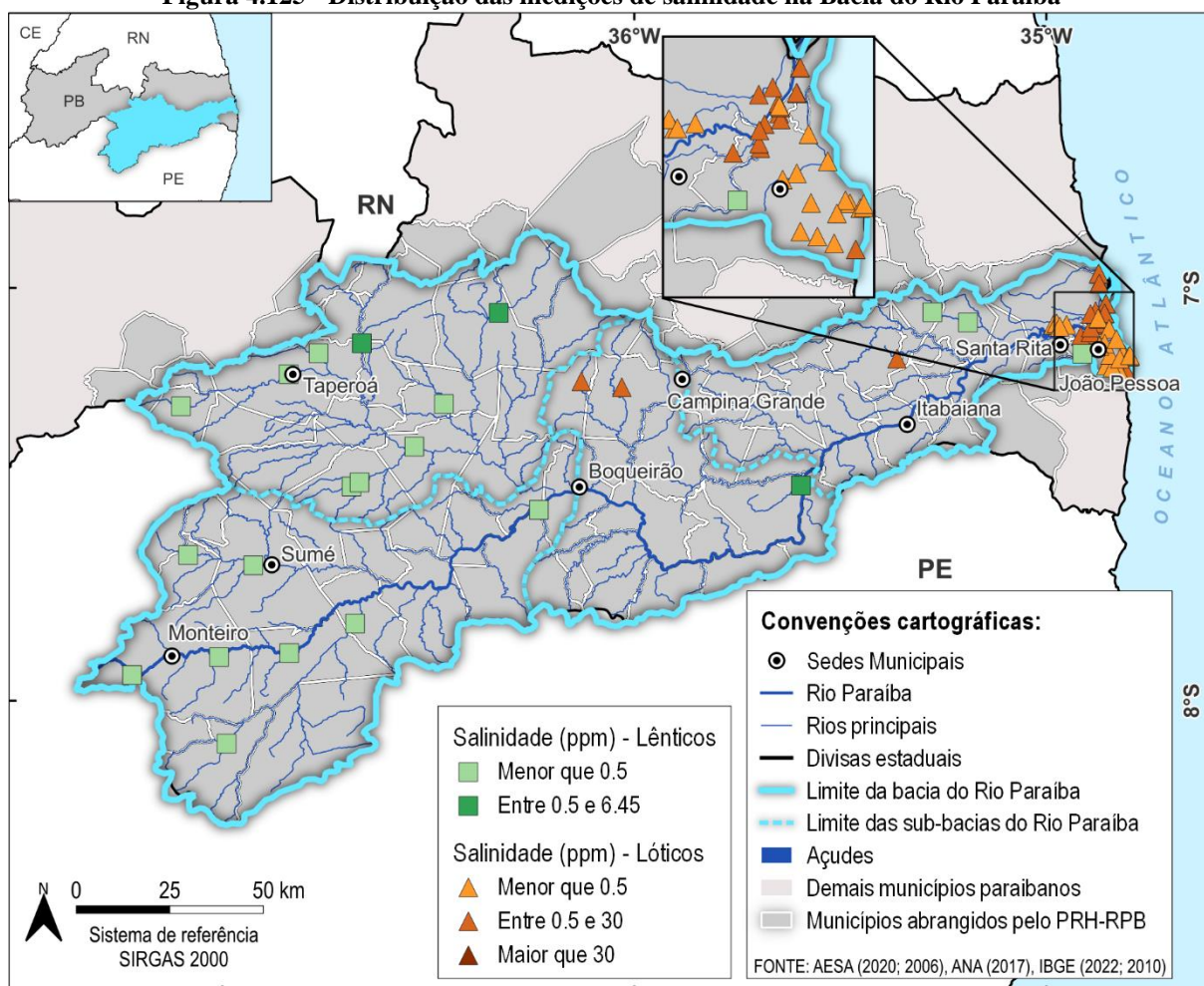
O valor médio de salinidade em diferentes ambientes é apresentado na Tabela 4.48. A distribuição destas estações de monitoramento ao longo da baixa hidrográfica do Rio Paraíba é apresentada no mapa da Figura 4.125.

Tabela 4.48 - Valores médios de salinidade por sub-bacia (ppm)

| Sub-bacia | Lêntico | Lótico | Geral |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Alto Paraíba | 0,00 | | 0,00 |
| Médio Paraíba | 0,64 | 1,33 | 1,10 |
| Baixo Paraíba | 0,03 | 7,50 | 7,01 |
| Taperoá | 1,03 | | 1,03 |
| Total | 0,45 | 7,23 | 5,14 |

Fonte: adaptado de PERH-PB (2022).

Figura 4.125 - Distribuição das medições de salinidade na Bacia do Rio Paraíba



Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

- *Metais Pesados*

Conforme apontado no PERH-PB (2022), algumas inconformidades nas concentrações de metais pesados, em relação à Resolução CONAMA n° 357/2005, foram identificadas na maioria das sub-bacias hidrográficas estudadas. Os metais pesados foram constatados em vários reservatórios e rios monitorados pela CAGEPA e pela SUDEMA, como observado na Tabela 4.49.

Tabela 4.49 - Concentrações média de metais pesados por sub-bacia (mg/L)

| Bacias | Pb | Cu | Fe | Mn | Ni | Zn |
|---------------|-------|--------------|--------------|-------|--------------|------|
| VMP (1) | 0,01 | 0,009 | 0,3 | 0,1 | 0,025 | 0,18 |
| Alto Paraíba | - | - | 0,237 | - | - | - |
| Médio Paraíba | 0,009 | 0,125 | 0,043 | 0,078 | 0,078 | 0,18 |
| Baixo Paraíba | 0,002 | 0,02 | 0,952 | 0,04 | 0,128 | 0,03 |
| Taperoá | - | - | 1,097 | - | - | - |

(1) Valor Máximo Permitido (VMP) Resolução CONAMA n°357/2005 (Classe 2)

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

O ferro foi o elemento mais abundante entre as sub-bacias estudadas, principalmente, na sub-bacia Taperoá, com concentração de 1,097 mg /L. As concentrações mais elevadas de metais pesados possuem, como característica comum, os polos industriais e atividades de extração mineral. A presença de metais pesados, nas águas superficiais, pode ser relacionada com o despejo irregular de efluentes industriais. Por possuir efeito acumulativo nos seres vivos (bioacumulação), essas substâncias são transferidas ao longo da cadeia alimentar, afetando a biota aquática dos ambientes lênticos, lóticos, oceânicos, inclusive, a população humana, devido à ingestão alimentar desses organismos.

4.6.2 Análise da qualidade das águas

A principal normativa que regulamenta a qualidade das águas superficiais é a Resolução CONAMA n° 357, a qual estabelece os padrões de qualidade da água para diversos usos, como abastecimento público, recreação, irrigação, entre outros. Uma forma eficiente para a análise de diferentes parâmetros físicos, químicos e biológicos é o uso de índices que integram estes resultados.

Assim, da mesma forma ao que foi realizado para o PERH-PB (2022), o presente estudo fará uso do Índice de Qualidade da Água (IQA) para avaliar a qualidade da água nos pontos avaliados, bem como, o Índice do Estado Trófico (IET) para classificar os corpos d'água em diferentes níveis de eutrofização.

4.6.2.1 Índice de Qualidade das Águas (IQA)

O IQA é uma ferramenta que integra diversos parâmetros a partir das suas características físicas, químicas e biológicas, para avaliar a qualidade da água de rios, lagos ou reservatórios. Ao analisar o IQA, é possível obter uma visão geral da sua qualidade e verificar se ela atende aos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 357. Assim, se o IQA indicar uma qualidade inadequada, podem ser necessárias ações corretivas para garantir a melhoria da qualidade da água e a conformidade com os regulamentos ambientais.

Dessa forma, a partir de um estudo da *National Sanitation Foundation* dos Estados Unidos, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2022) desenvolveu uma adaptação do IQA.

O Índice é calculado através do produtório ponderado das variáveis coliformes fecais, pH, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio total, fósforo total, temperatura, turbidez, resíduo total e oxigênio dissolvido, conforme a equação a seguir.

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$$

O IQA varia entre 0 e 100, sendo que quanto mais alto o índice, melhor é a qualidade da água, conforme apresentado na Tabela 4.50.

Tabela 4.50 - Classificação do IQA

| Categoria | Ponderação |
|------------------|---------------------|
| Ótima | $79 < IQA \leq 100$ |
| Boa | $51 < IQA \leq 79$ |
| Regular | $36 < IQA \leq 51$ |
| Ruim | $19 < IQA \leq 36$ |
| Péssima | $IQA \leq 19$ |

Fonte: CETESB (2022).

No PERH-PB de 2022 foram calculados valores de IQA utilizando parâmetros obtidos entre os anos de 2007 e 2017 para cada um dos pontos de monitoramento. Na Tabela 4.51 são apresentados os parâmetros estatísticos das sub-bacias do presente estudo.

Tabela 4.51 - Valores de IQAs ao longo da bacia hidrográfica do Paraíba

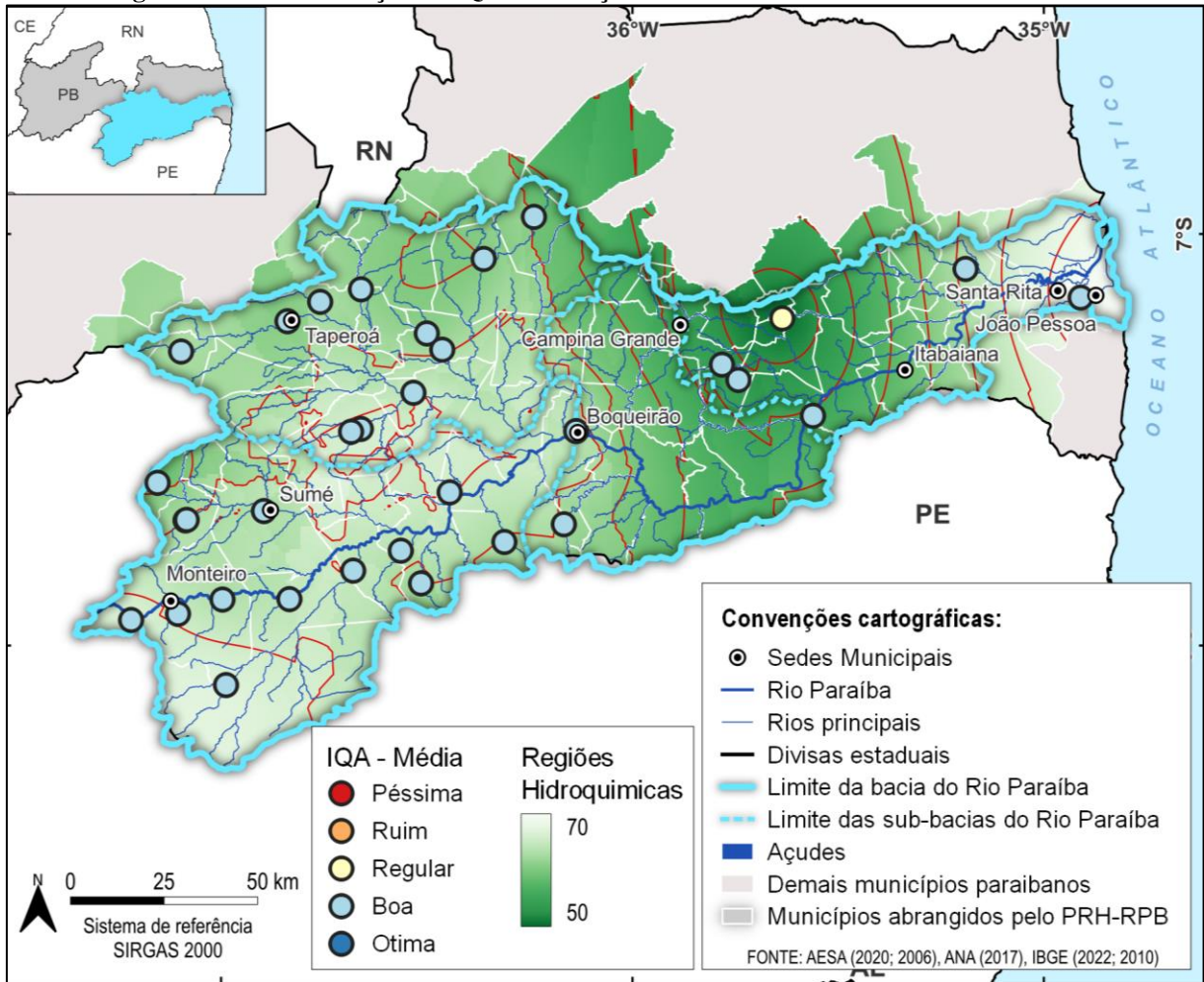
| Sub-bacias | Amostra | Média | Mínimo | Máximo | Variância |
|-------------------|----------------|--------------|---------------|---------------|------------------|
| Alto Paraíba | 163 | 65,43 | 37,00 | 86,00 | 127,05 |
| Médio Paraíba | 38 | 62,58 | 43,00 | 83,00 | 90,90 |
| Baixo Paraíba | 53 | 64,42 | 35,00 | 86,00 | 153,02 |
| Taperoá | 65 | 64,94 | 39,00 | 80,00 | 89,68 |
| Total | 319 | 64,34 | 38,50 | 83,75 | 115,16 |

Fonte: Adaptado do PERH-PB (2022).

Em geral, todas as sub-bacias apresentaram médias de IQA correspondentes à qualidade boa. As bacias do Alto e Baixo Paraíba apresentaram os maiores IQAs máximos, os IQAs mínimos, se caracterizaram como regular, exceto na bacia do Baixo Paraíba que é limítrofe com a classe ruim, e os altos valores de variância sugerem uma grande variação na qualidade das águas superficiais, a qual pode ser decorrente da sazonalidade.

Considerando que os valores de IQAs apresentam a qualidade hidroquímica das águas superficiais segundo a resolução CONAMA nº 357 é possível realizar uma interpolação destes valores, visando uma apresentação de um esboço das regiões geoquímicas cujas águas têm maior ou menor potencial de consumo. Na Figura 4.126 é mapeada a distribuição dos valores médios de IQAs, bem como as regiões com maior potencial hidroquímico da água.

Figura 4.126 - Distribuição do IQA nas estações de monitoramento da Bacia do Paraíba



Fonte: PERH-PB, adaptado por Cobrape (2024).

4.6.2.2 Índice de Estado Trófico (IET)

De forma análoga o Índice do Estado Trófico tem o objetivo de classificar os corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avaliar a qualidade da água quanto ao acúmulo de nutrientes e seu impacto associado ao crescimento excessivo das algas e cianobactérias.

O resultado do fósforo IET(PT) corresponde a uma medida do potencial de eutrofização, uma vez que este nutriente atua como o agente causador do processo. A avaliação correspondente à clorofila IET(CL) é considerada como uma medida de resposta do corpo hídrico ao agente causador, fornecendo uma indicação adequada do nível de crescimento de algas. Além desses dois parâmetros, existe o IET(S) que analisa a transparência da água por meio de disco de Secchi. No entanto, esse parâmetro pode ser afetado pela elevada turbidez resultante de material em suspensão, comum em reservatórios, e, portanto, normalmente não é considerado.

As equações para o cálculo do IET estão representadas abaixo e utilizam a metodologia proposta por Lamparelli (2004).

- Rios:

$$IET (CL) = 10 \times \left(6 - \left(\frac{-0,7 - 0,6 \times (\ln CL)}{\ln 2} \right) \right) - 20$$

$$IET (PT) = 10 \times \left(6 - \left(\frac{0,42 - 0,36 \times (\ln PT)}{\ln 2} \right) \right) - 20$$

- Reservatórios:

$$IET (CL) = 10 \times \left(6 - \left(\frac{-0,92 - 0,34 \times (\ln CL)}{\ln 2} \right) \right)$$

$$IET (PT) = 10 \times \left(6 - \left(\frac{1,77 - 0,42 \times (\ln PT)}{\ln 2} \right) \right)$$

Em que: PT é a concentração de fósforo total medida à superfície da água, em µg/L; e CL é a concentração de clorofila a medida à superfície da água, em µg/L.

O resultado dos valores mensais apresentados do IET será a média aritmética simples com arredondamento da primeira casa decimal, dos índices relativos ao fósforo total e a clorofila a, conforme a equação a seguir.

$$IET = \frac{IET (PT) + IET (CL)}{2}$$

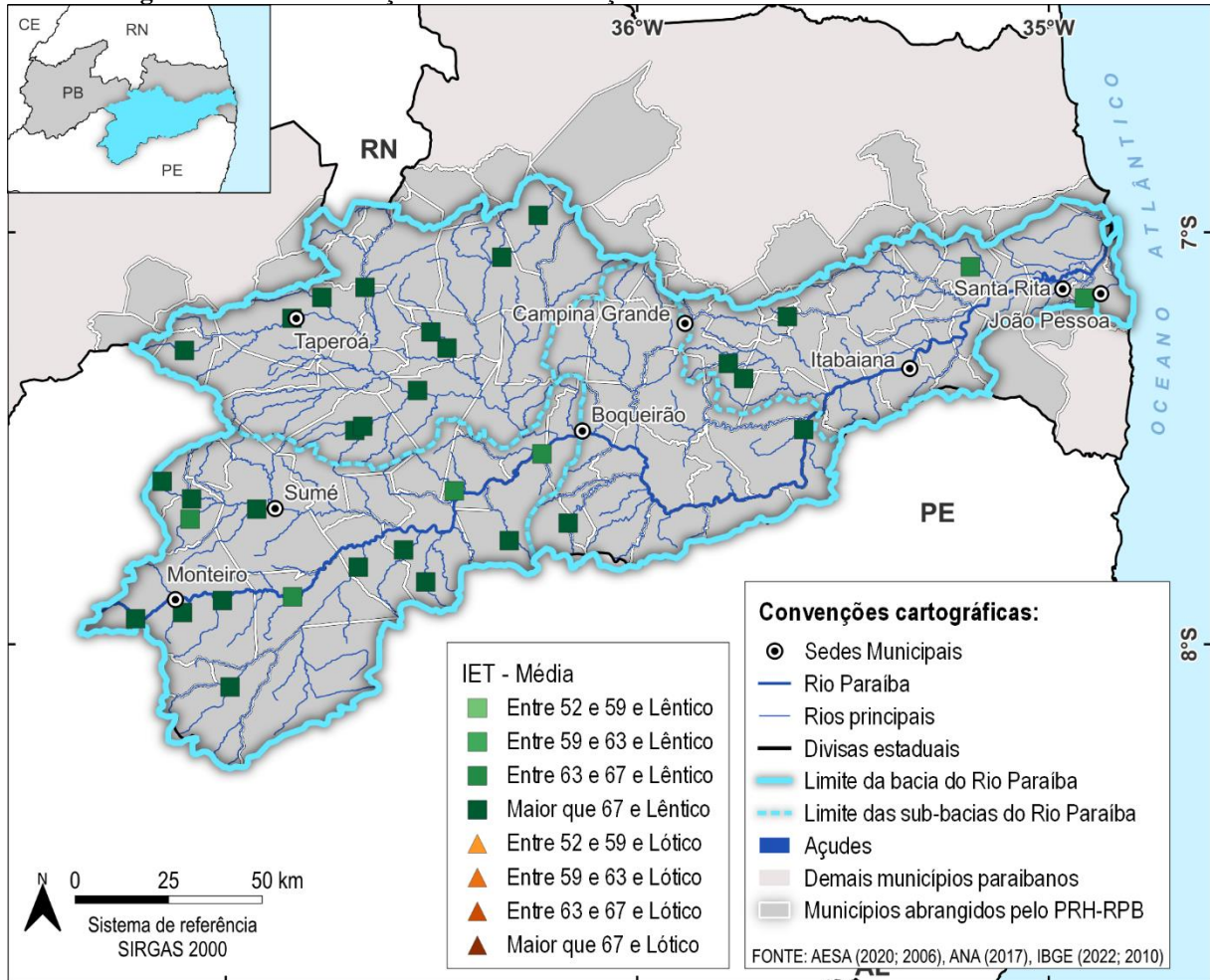
Os limites estabelecidos para as diferentes classes de trofias para rios e reservatórios estão apresentados na Tabela 4.52, enquanto na Figura 4.127 é apresentada a distribuição dos valores médios de IETs.

Tabela 4.52 -Classificação do Estado Trófico para rios segundo IET

| Estado Trófico | Ponderação | Ambiente | P-total (mg/m ³) | Clorofila-a (mg/m ³) |
|--------------------------|---------------|---------------------|---------------------------------|----------------------------------------|
| Ultraoligotrófico | IET ≤ 47 | Rio Reservatório | P ≤ 13 P ≤ 8 | CL ≤ 0,74 CL ≤ 1,17 |
| Oligotrófico | 47 < IET ≤ 52 | Rio Reservatório | 13 < P ≤ 35 8 < P ≤ 19 | 0,74 < CL ≤ 1,31 1,17 < CL ≤ 3,24 |
| Mesotrófico | 52 < IET ≤ 59 | Rio Reservatório | 35 < P < 137 19 < P ≤ 52 | 1,31 < CL ≤ 2,96 3,24 < CL ≤ 11,03 |
| Eutrófico | 59 < IET ≤ 63 | Rio Reservatório | 137 < P ≤ 296 52 < P ≤ 120 | 2,96 < CL ≤ 4,70 11,03 < CL ≤ 30,55 |
| Supereutrófico | 63 < IET ≤ 67 | Rio Reservatório | 296 < P ≤ 640 120 < P ≤ 233 | 4,70 < CL ≤ 7,46 30,55 < CL ≤ 69,05 |
| Hipereutrófico | IET > 67 | Rio Reservatório | 640 < P 233 < P | 7,46 < CL 69,05 < CL |

Fonte: Adaptado de CETESB (2022), Lamparelli (2004).

Figura 4.127 - Distribuição do IET nas estações de monitoramento da Bacia do Paraíba



Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

Observa-se que dos 33 pontos dos reservatórios monitorados 18% destes encontram-se em estado supereutrófico, e os demais 82% em estado hipereutrófico, os valores médios de IET dos reservatórios localizados na bacia é de 68,5 variando entre 63,5 e 72,2, conforme observado na Tabela 4.53.

Tabela 4.53 - Valores de IETs ao longo da bacia hidrográfica do Paraíba

| Sub-bacias | Amostra | Média | Máximo | Mínimo |
|---------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| Alto Paraíba | 15 | 68,3 | 72,2 | 65,4 |
| Médio Paraíba | 2 | 69,1 | 70,5 | 67,8 |
| Baixo Paraíba | 5 | 67,3 | 70,2 | 63,5 |
| Taperoá | 11 | 69,2 | 71,0 | 67,9 |
| Total | 33 | 68,5 | 72,2 | 63,5 |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

4.6.3 Qualidade das águas subterrâneas

Neste capítulo será abordada a qualidade das águas subterrâneas na Bacia do Rio Paraíba, sendo este tema subdividido nos seguintes tópicos:

- Rede de monitoramento da qualidade das águas; e,
- Situação da qualidade das águas.

De forma análoga ao que foi realizado no item relativo as águas superficiais, o presente estudo se utilizará da qualidade das águas subterrâneas como instrumento para subsidiar as discussões entre os usos dos recursos hídricos na bacia e da qualidade de suas águas. Esta abordagem dará suporte à análise de cenários futuros e suas implicações.

Assim, com objetivo de realizar um diagnóstico relativo à qualidade das águas subterrâneas na Bacia do Rio Paraíba, foi organizada uma base de dados de qualidade da água dos poços a partir de relatórios de monitoramento da qualidade das águas públicos e disponibilizados pela própria AESA.

4.6.3.1 Rede de monitoramento

A qualidade das águas subterrâneas é sempre diretamente afetada pela sua interação geoquímica com os variados tipos de rochas subjacentes com os quais a água manterá contato durante a etapa subterrânea do ciclo hidrológico, bem como através de sua interação direta ou indireta com as atividades antrópicas realizadas em superfície - como no caso das indústrias, postos de combustível, lixões e outros.

Normalmente, quanto maior o tempo de contato da água subterrânea com os materiais solúveis que constituem o aquífero, maior será o seu conteúdo em sólidos totais dissolvidos (STD) e maiores serão os teores de compostos minerais encontrados. Este contato pode chegar a denotar uma característica físico-química particular para diferentes tipos de aquíferos - o que permite em alguns casos se observe a mistura de águas de diferentes aquíferos, através da interferência de suas características físico-químicas originais.

Muitas vezes as atividades antrópicas podem interferir na qualidade das águas subterrâneas, através do lançamento de cargas poluidoras das mais diferentes origens, que partem desde o simples vazamento de esgoto sanitário doméstico, passando pela utilização não criteriosa de fertilizantes, adubos químicos, inseticidas e herbicidas na produção agrícola, bem como pelo descarte de contaminantes industriais e vazamentos de tanques subterrâneos de armazenamento de combustíveis, dentre outros.

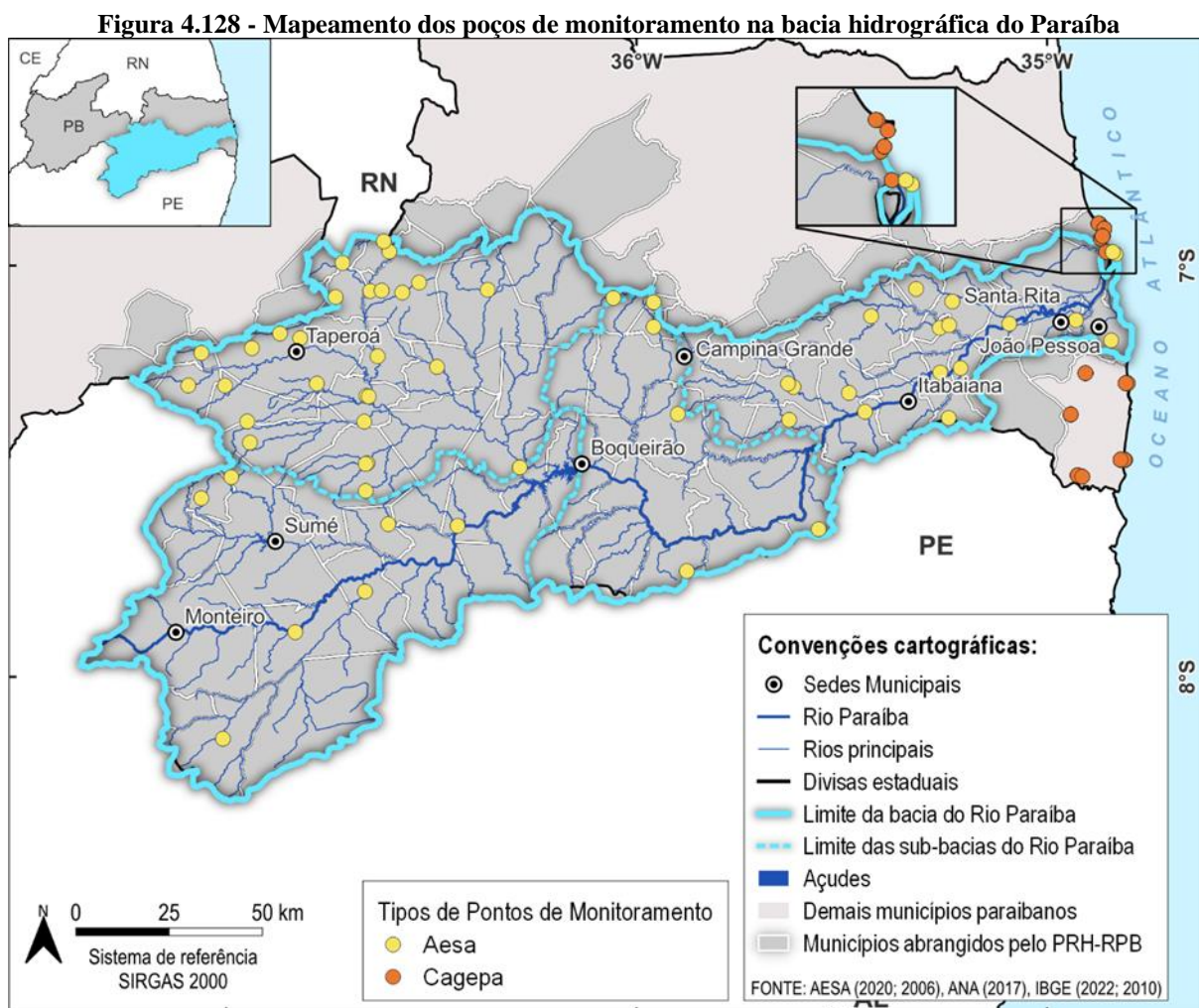
Para avaliação de sua qualidade são feitas análises qualitativas e quantitativas de diversos parâmetros químicos e biológicos, que por sua vez determinam as condições de uso prioritário das águas subterrâneas. Os resultados analíticos podem ser confrontados com diversas legislações de âmbito federal, estadual e municipal que regulamentam a sua utilização.

Neste caso, foram utilizados dados oriundos do Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba, que teve como base as seguintes fontes de dados: (i) Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) do Serviço Geológico do Brasil (CPRM); (ii) Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS), também da CPRM; e (iii) banco de dados da AESA, obtido via Sistema Nacional de Informações em Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (SNIRH/ANA). Para a elaboração dos mapas deste estudo foram considerados 75 poços distribuídos na Bacia do Rio Paraíba, conforme a Tabela 4.54 e espacializados na Figura 4.128.

Tabela 4.54 - Número de Estações do monitoramento

| Sub-bacias | AESA | CAGEPA | Total |
|---------------|-----------|-----------|-----------|
| Alto Paraíba | 09 | | 09 |
| Médio Paraíba | 07 | | 07 |
| Baixo Paraíba | 21 | 10 | 31 |
| Taperoá | 28 | | 28 |
| Total | 65 | 10 | 75 |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).



Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

Apesar de vários poços da CAGEPA estarem localizados fora da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, os dados de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas do aquífero Paraíba-Pernambuco (Sedimentar) são bastante escassos, deste modo este estudo optou por considerar todos os valores disponibilizados pela Companhia, principalmente pelos aquíferos não estarem diretamente ligados com a unidade física da Bacia, sendo possível extrapolar as informações para se ter uma real ideia da área do estudo.

4.6.3.2 Situação da qualidade das águas subterrâneas

Segundo o relatório “Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil” (ANA, 2007) a questão da vulnerabilidade e proteção dos aquíferos é ainda um tema pouco explorado no país e ainda necessita ser incorporado à gestão das águas subterrâneas e ao planejamento do uso e ocupação territoriais.

Atualmente o Brasil não detém uma rede de monitoramento nacional de qualidade de águas subterrâneas, e baseado no fato de que a constituição federal determina que estas águas são de domínio do Estado, cabe a cada governo estadual tomar iniciativas para a implantação e monitoramento.

Dentre as principais legislações de âmbito federal, podemos citar a Portaria do Ministério da Saúde nº 518/2004, que “Estabelece procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências”; a Resolução CONAMA Nº 396, de 03 de Abril de 2008, que “Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências”, definindo também os valores máximos permitidos nas águas subterrânea para uma série de compostos químicos e biológicos, em acordo aos diferentes usos preponderantes, como: i) consumo humano, ii) dessedentação de animais, iii) irrigação e iv) recreação, bem como a Resolução CONAMA Nº 420, de 28 de Dezembro de 2009, que “Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo - e água subterrânea - quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas”.

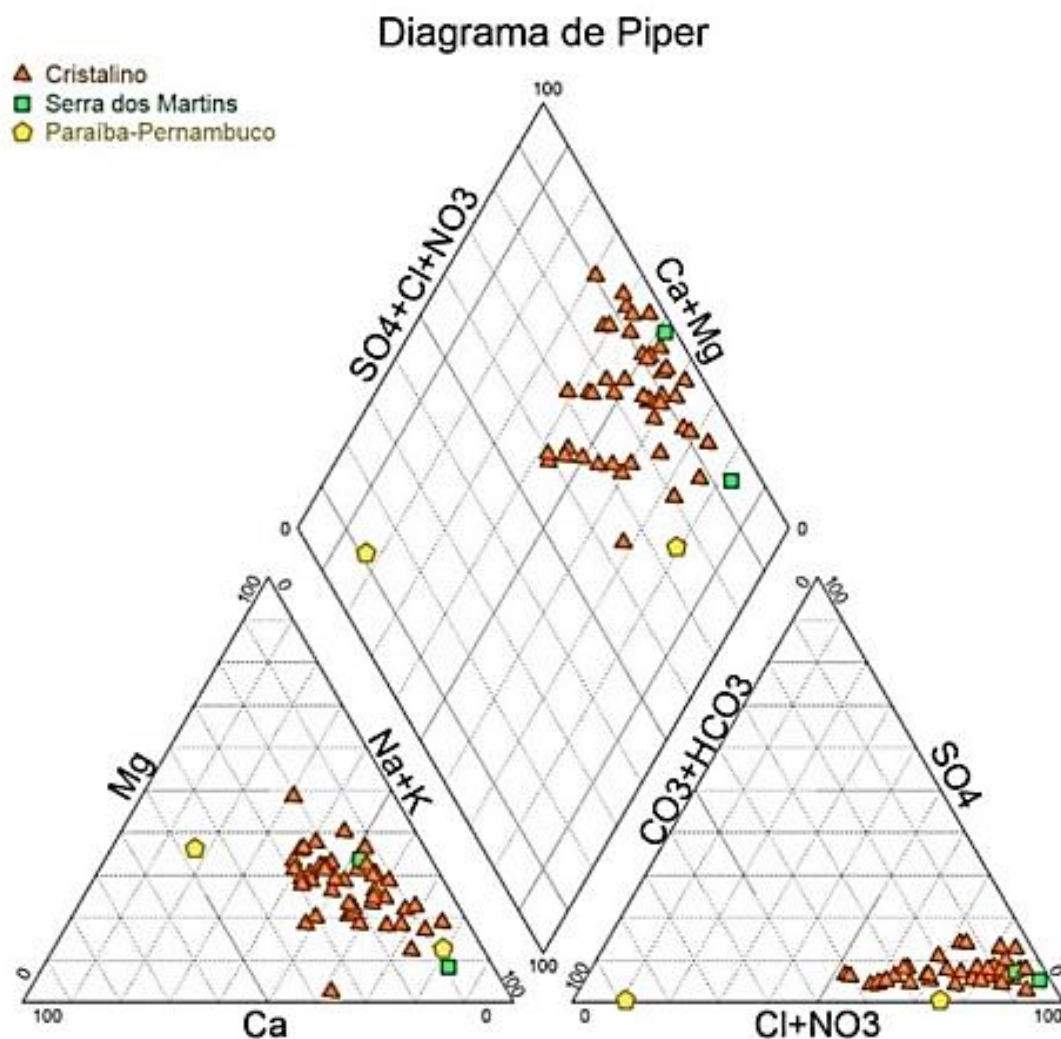
Comumente, os parâmetros Alcalinidade Total, Bicarbonato, Cálcio, Carbonato, Cloreto, Dureza Total, Ferro, Fluoreto, Fosfato, Magnésio, Nitrato, Nitrito, Potássio, Sílica Dissolvida, Sódio, Sulfato, Sólidos Totais Dissolvidos e alguns compostos orgânicos, aliados a parâmetros biológicos como coliformes totais, coliformes termotolerantes e *E. coli*, são mais comumente analisados nas amostras de água subterrânea provenientes de poços tubulares profundos a fim de caracterizar a sua qualidade.

Os parâmetros químicos são diretamente correlacionados as características geológicas locais. Já os ensaios microbiológicos (Coliformes e *E. coli*) podem indicar infiltração de esgoto doméstico nas águas subterrâneas.

- *Caracterização hidro-geoquímica*

Partindo de dados de monitoramento, o PERH-PB elaborou um Diagrama de Piper para todos os aquíferos do Estado, Figura 4.129, onde foi observado a predominância dos cátions Na^{2+} e K^{+} e do ânion Cl^{-} classificando as águas em 3 tipologias: (i) cloretadas sódicas, (ii) cloretadas mistas e (iii) bicabornatadas mistas.

Figura 4.129 - Diagrama de Piper das águas subterrâneas do Estado da Paraíba

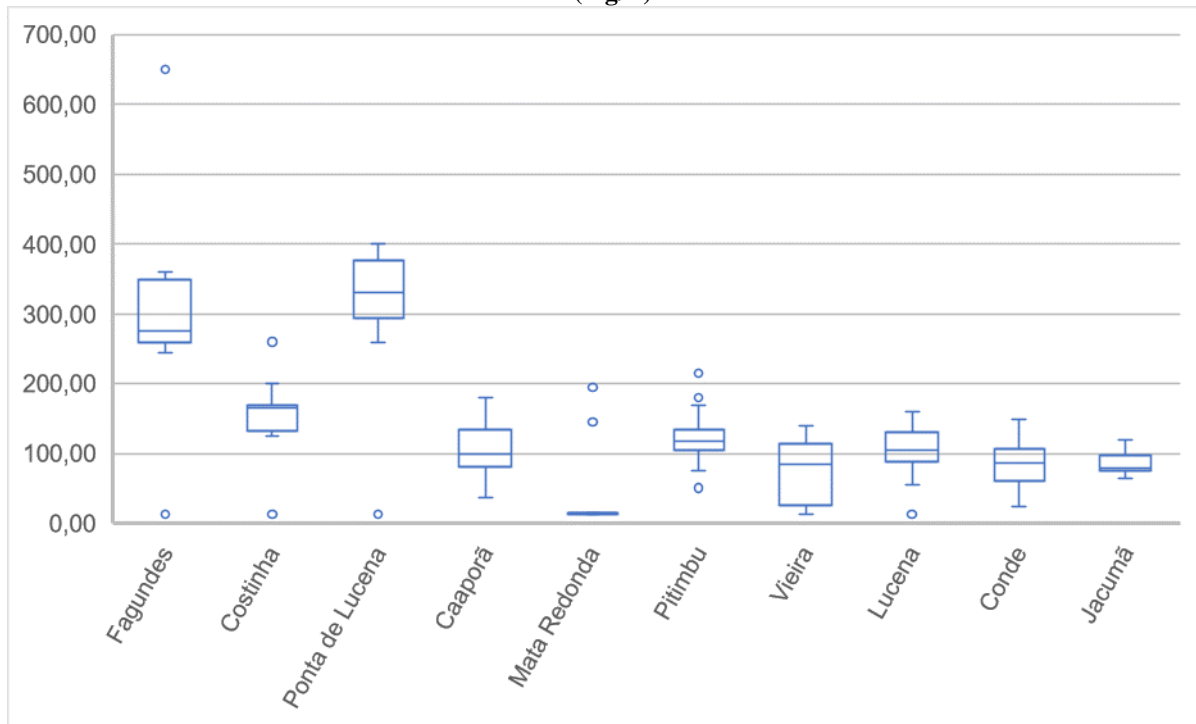


Fonte: PERH-PB (2022).

- *Cloretos e sódios*

Uma vez que a avaliação hidro-geoquímica classificou grande parte águas subterrâneas coletadas como cloretadas sódicas, é esperado concentrações médias elevadas de cloreto, neste sentido, o estudo realizado pelo PERH identificou que as águas subterrâneas oriundas dos Sistemas Cristalinos e Serra Marins apresentavam concentração superiores aos VMP, definidos na Resolução CONAMA n° 396/2008 (consumo humano e irrigação) e na Portaria MS n° 5/2017. Segundo o PERH-PB apenas 6,25 % apresentaram médias de cloreto e sódio, dentro do padrão de potabilidade. Contudo, o Sistema Paraíba-Pernambuco apresenta baixas concentrações médias de cloreto e sódio, como podem ser observados nas análises realizadas pela CAGEPA, apresentados na Figura 4.130.

Figura 4.130 - Distribuição nos valores de concentração de cloretos nos poços monitorados pela CAGEPA (mg/L)



Fonte: CAGEPA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

- *Sulfato*

O sulfato (SO_4^{2-}) é uma das formas de enxofre mais comuns presente na água, suas principais fontes em ambientes aquáticos são a decomposição de solos e rochas e carreamento aditivos agrícolas ricos em enxofre pela ação de chuvas. Em regiões áridas, as concentrações são elevadas devido à presença de sulfatos minerais, tal como o gesso.

Devido as características hidrogeoquímicas dos sistemas aquíferos existentes do Estado da Paraíba as águas subterrâneas captadas, geralmente, apresentam valores elevados de cloreto, sódio, STD e sulfato.

Durante a elaboração do plano estadual verificou que apesar das concentrações médias de sulfato por Sistema Aquífero não tenham ultrapassado o VMP, cerca de um terço das amostras avaliadas tiveram as concentrações fora do padrão de potabilidade, principalmente no Sistema Cristalino.

- *Amônia*

A presença de compostos de nitrogênio é indicativa de contaminação do aquífero e de condições sanitárias insatisfatória. Porém, durante a elaboração do PERH apenas a rede de monitoramento do Programa Água Doce/SERHMACT monitorou as concentrações de amônia nos poços. Concentrações medias de amônia superiores ao VMP estabelecido pela Portaria MS nº 5/2017 (1,5 mg/L) foram constatadas nos Aquíferos Cristalino e na Serra dos Martins.

Avaliando a variação temporal da amônia nos poços, foi observado que no Sistema Aquífero Serra dos Martins, todas as amostras estiveram fora do padrão de potabilidade, por outro lado, no Sistema Cristalino, os valores tenderam a diminuir.

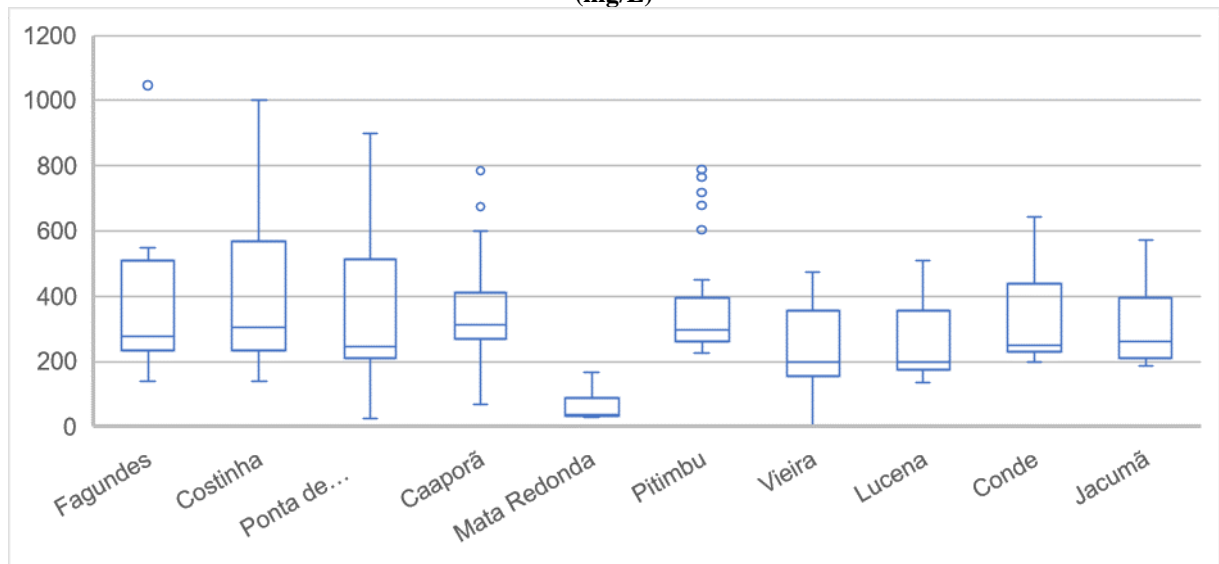
- *Alcalinidade*

Ensaio de alcalinidade podem fornecer informações sobre a origem da água subterrânea e possíveis processos geoquímicos que ocorrem no subsolo, objetivando entender a geologia da região e para avaliar possíveis impactos causados por atividades humanas, como a mineração e a agricultura. Além disso, valores elevados de alcalinidade podem afetar a qualidade da água e sua capacidade de suportar vida aquática, uma vez que está relacionada à capacidade de neutralizar ácidos.

Os limites de alcalinidade em águas subterrâneas podem variar dependendo do uso pretendido da água e das regulamentações locais ou nacionais. Em termos gerais, a alcalinidade em águas subterrâneas é frequentemente expressa em termos de concentração de bicarbonato (HCO_3^-) e costuma variar de acordo com as características geológicas da região. Em águas naturais, os níveis de alcalinidade geralmente variam de 0 a 300 mg/L como carbonato de cálcio. Valores acima desse intervalo podem indicar a presença de fontes externas de alcalinidade, como contaminação por produtos químicos ou atividades humanas

Considerando as análises realizada no Sistema Paraíba-Pernambuco pela CAGEPA, 60% dos valores médios apresentam concentrações de alcalinidade superior a 300 mg/L, como podem ser observados nas análises realizadas, representadas na Figura 4.131 e na Tabela 4.55.

Figura 4.131 - Distribuição nas concentrações de alcalinidade nos poços monitorados pela CAGEPA (mg/L)



Fonte: CAGEPA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Tabela 4.55 - Distribuição análises de Alcalinidade nos poços monitorados pela CAGEPA (mg/L)

| Estações | Média | Máx. | Mín. |
|-----------------|-------|-------|------|
| Caaporã | 374 | 787 | 67,9 |
| Conde | 324 | 644 | 200 |
| Costinha | 407 | 1000 | 140 |
| Fagundes | 372 | 1047 | 140 |
| Jacumã | 304 | 571 | 185 |
| Lucena | 259 | 510 | 135 |
| Mata Redonda | 59 | 165 | 30,6 |
| Pitimbu | 371 | 791 | 227 |
| Ponta de Lucena | 348 | 900 | 24 |
| Vieira | 227 | 474,5 | 0 |
| Total Geral | 303 | 1047 | 0 |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

- *Dureza*

A dureza da água está relacionada à concentração de minerais, principalmente cálcio e magnésio, que podem afetar a qualidade da água para consumo e outros usos. Águas subterrâneas com alta dureza podem causar incrustações em tubulações e equipamentos, além de afetar a eficácia de produtos de limpeza.

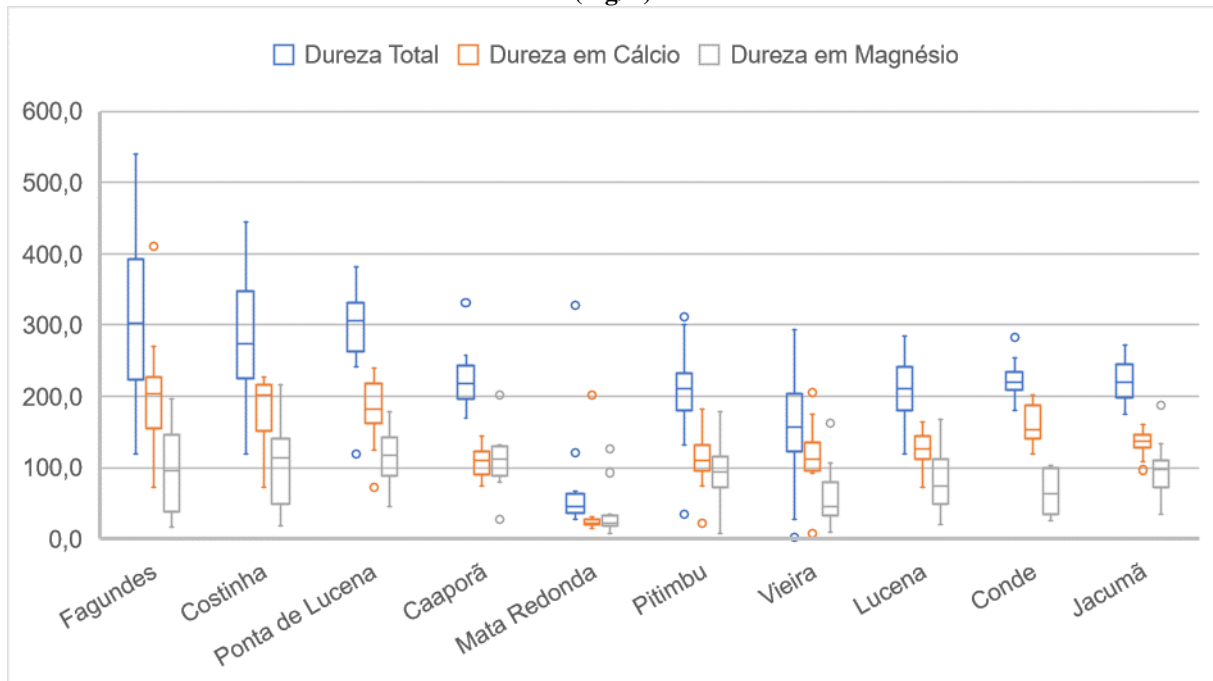
Os limites de dureza da água subterrânea podem variar dependendo das normas e padrões estabelecidos por diferentes órgãos reguladores. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS):

- a água com dureza abaixo de 60 mg/L é considerada "baixa";
- a água com dureza entre 60-120 mg/L é considerada "moderada"; e,
- a água com dureza acima de 120 mg/L é considerada "alta".

Segundo a Portaria nº 5 de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde, e Resolução nº 396/2008 do CONAMA, a qual estabelece o limite máximo de dureza total em água potável que é de 500 mg.

Observando as análises realizadas pela CAGEPA, no Sistema Paraíba-Pernambuco (Figura 4.132), apenas 0,5% das análises realizadas apresentam valores superiores ao VMP conforme a Resolução CONAMA nº 396/08 e Portaria MS nº 5/2017.

Figura 4.132 - Distribuição nos valores de concentração de dureza nos poços monitorados pela CAGEPA (mg/L)



Fonte: CAGEPA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

- *Salinidade*

A salinidade pode afetar diretamente a utilização da água para consumo humano, agricultura, e outros fins industriais. Além disso, a salinidade elevada pode indicar intrusão de água salgada em aquíferos de água doce, o que pode ser prejudicial para o abastecimento de água potável. A análise de salinidade também é crucial para entender a hidrogeologia da região, identificar possíveis fontes de contaminação e monitorar a qualidade da água ao longo do tempo. Isso é essencial para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos e para tomar decisões informadas sobre seu gerenciamento.

No solo, a concentração dos sais varia, principalmente, conforme sua origem, presença de matéria orgânica, adubação e manejo. Em regiões de clima úmido e subúmido, a concentração de sais nas águas é frequentemente expressa por traços de algumas espécies de íons, enquanto em regiões áridas e semiáridas as concentrações podem atingir valores elevados, prejudicando os solos e as plantas.

A salinidade é frequentemente expressa em termos de concentração de sólidos totais dissolvidos em miligramas por litro (mg/L). Em geral, a água doce tem uma baixa concentração de STD, normalmente abaixo de 1.000 mg/L, enquanto águas mais salinas podem ter concentrações mais elevadas. No entanto, os limites específicos de salinidade para águas subterrâneas podem variar com base nas diretrizes governamentais e nas necessidades locais.

A Condutividade elétrica da água (CE) é o parâmetro mais empregado para expressar a concentração de sais solúveis na água. A determinação é rápida e tem boa precisão para a maioria das águas. Este parâmetro é o oposto da resistividade elétrica e corresponde a medida

da capacidade de uma água em conduzir eletricidade, crescendo proporcionalmente à medida que a concentração de sais aumenta.

A água pura tem uma condutividade elétrica (CE) muito baixa, da ordem de 0,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$, podendo crescer muito ao conter impurezas ou substâncias dissolvidas e se tornar um bom condutor elétrico. Como a condutividade elétrica aumenta com a temperatura ambiente, o valor é medido a uma temperatura de referência, geralmente, 25° C.

A condutividade elétrica da água de irrigação (CEa), conforme Rhoades *et al.* (1992), apresenta as seguintes relações com outros parâmetros de salinidade:

- Sais dissolvidos totais - SDT (mg/L) CEa x 640 ($0,1 < \text{CEa} < 5,0 \text{ dS/m}$);
- Sais dissolvidos totais - SDT (mg/L) $\cong \text{CEa} \times 800$ ($\text{CEa} > 5,0 \text{ dS/m}$);

Convertendo os valores de condutividade elétrica para salinidade foi possível verificar como se comporta a salinidade dentro da bacia do Paraíba. Na Tabela 4.56 são apresentados os valores médios de salinidade de aquíferos confinados e livres.

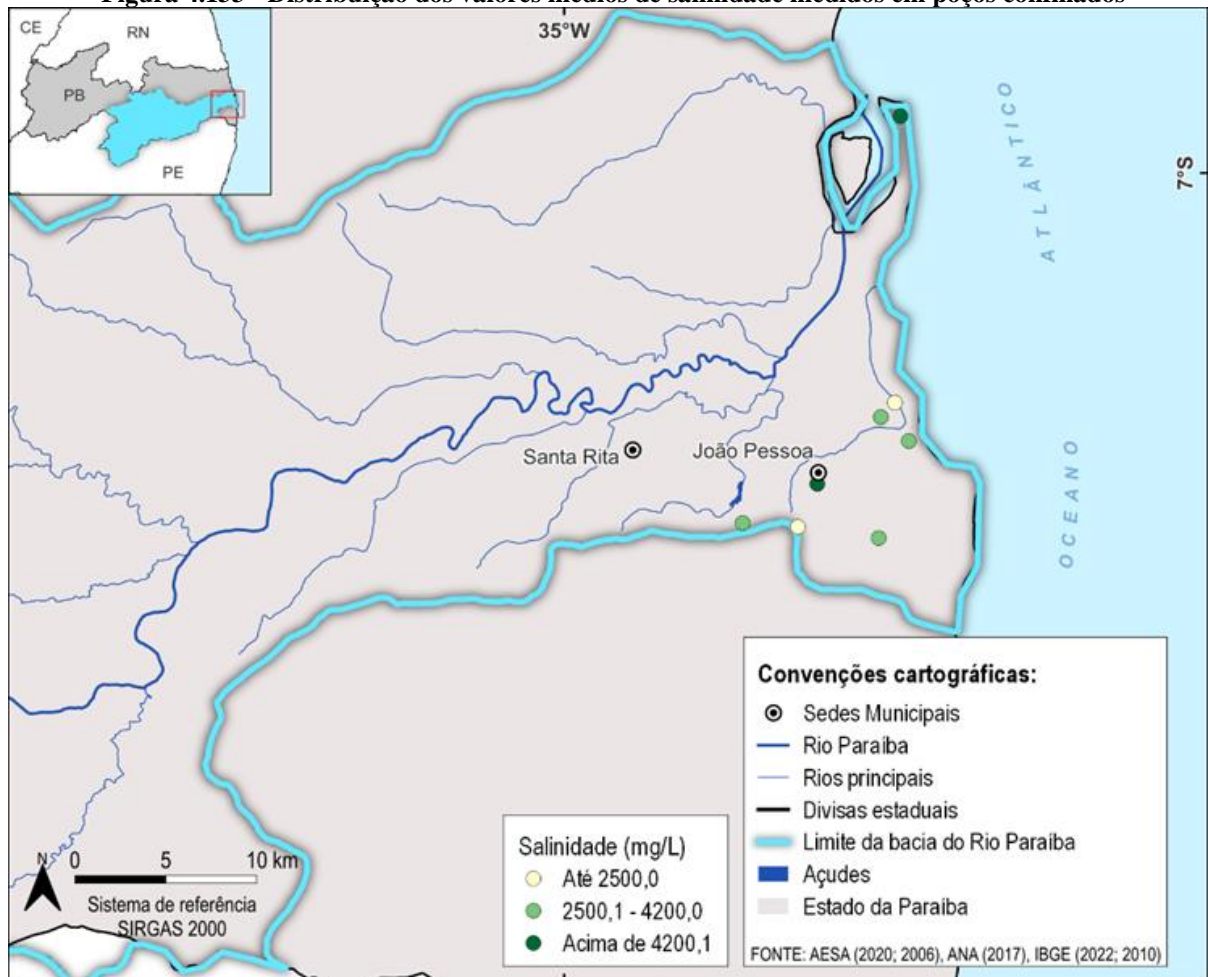
Tabela 4.56 - Valores médios de Salinidade dos poços na Bacia do Paraíba (mg/L)

| Sub-bacias | Sistema Sedimentar (Confinado) | Sistema Cristalino (Livre) | Sistema Sedimentar (Livre) |
|---------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Alto Paraíba | - | 34.653,9 | - |
| Médio Paraíba | - | 66.452,7 | 16.000,0 |
| Baixo Paraíba | 5.194,6 | 47.015,0 | 17.650,8 |
| Taperoá | - | 60.253,7 | - |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

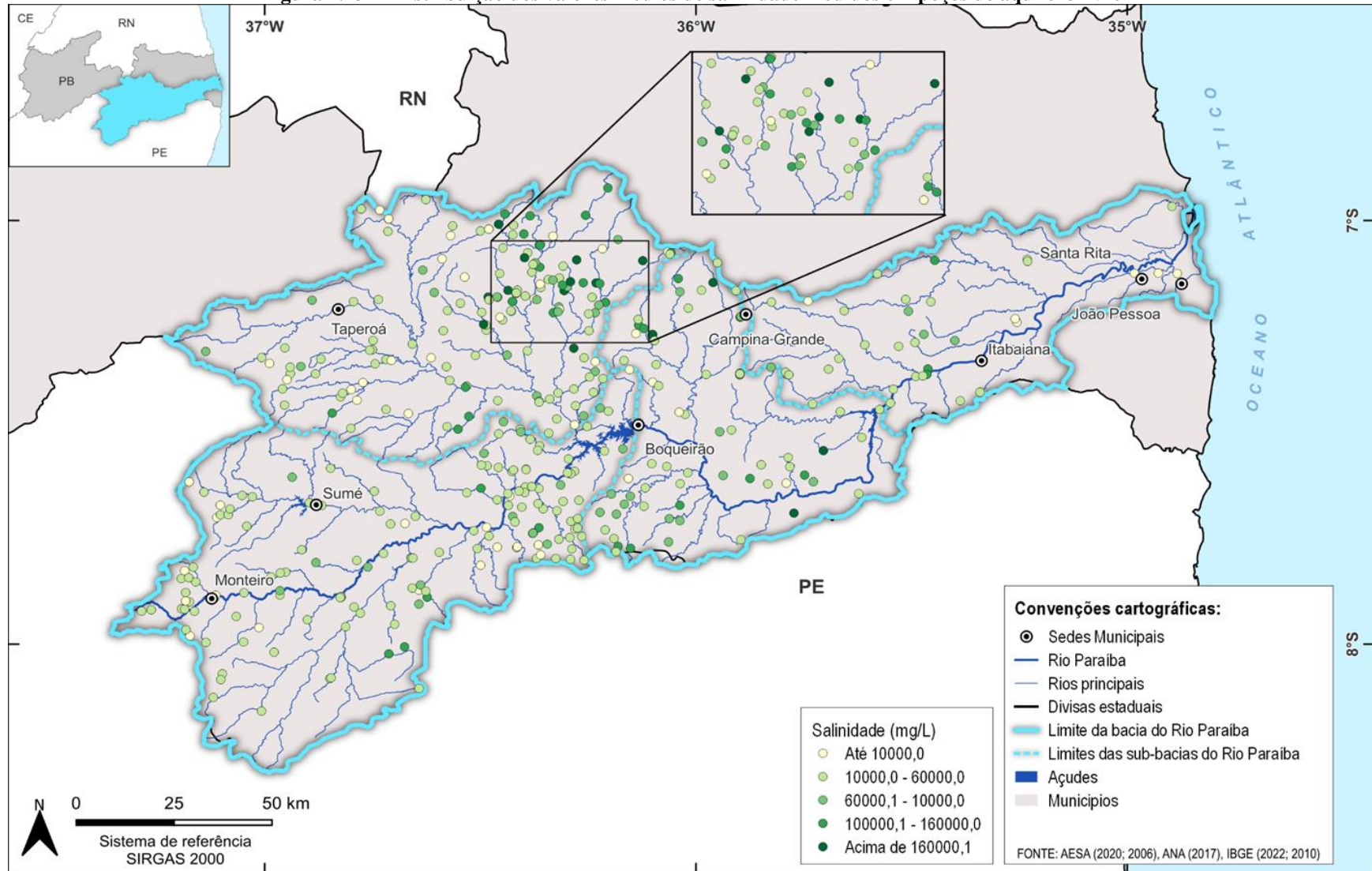
As Figura 4.133 e Figura 4.134 apresentam a distribuição dos poços monitorados que captam suas águas em aquíferos confinados e livres respectivamente.

Figura 4.133 - Distribuição dos valores médios de salinidade medidos em poços confinados



Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.134 - Distribuição dos valores médios de salinidade medidos em poços de aquífero livre



Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

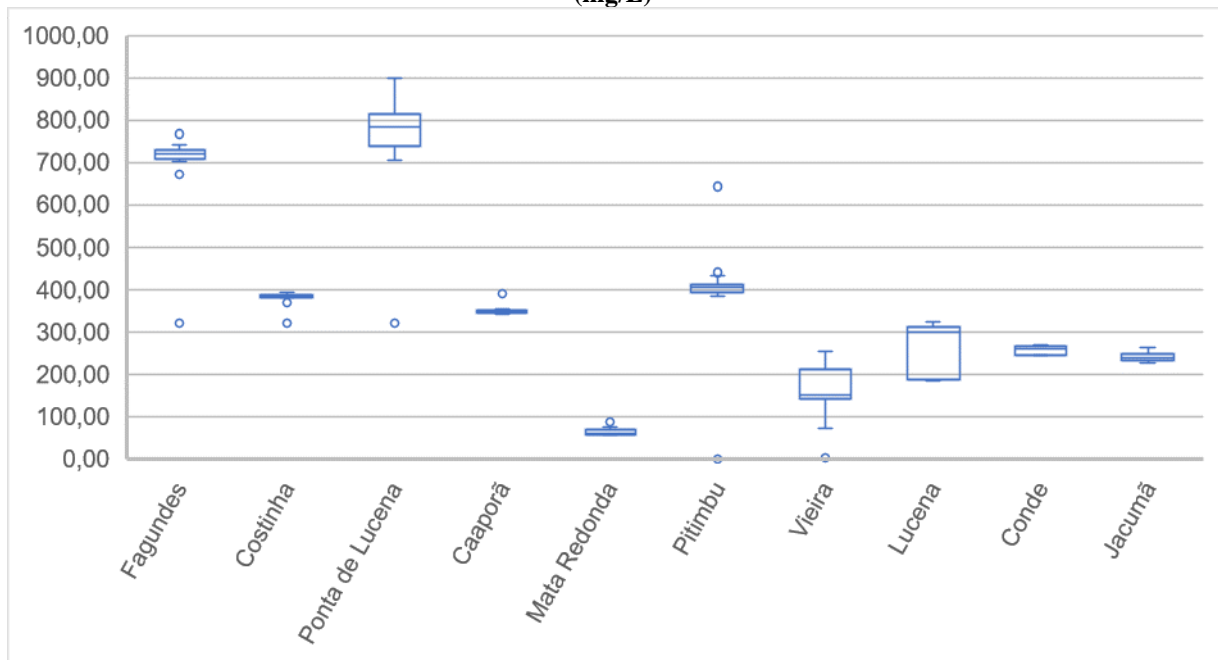
- *Sólidos Dissolvidos Totais*

Durante o Plano Estadual observou-se que os poços perfurados em rochas cristalinas, cujas águas são armazenadas nas fraturas ou foliações das rochas, diluem os sais contidos em seus minerais constituintes. Estes íons podem ser analisados através do ensaio de Sólidos Dissolvidos Totais que consegue medir íons ferro, sulfídrico, nitrato, cálcio, cloreto e partículas que ultrapassem um filtro de 2 μm .

Os valores médios de sólidos dissolvidos totais dos Sistemas Cristalino e Serra dos Martins foram, respectivamente, 3.681,563 e 5.082,625 mg/L, sendo estes valores 3 a 5 vezes superiores ao VMP pelas Resolução CONAMA n° 396/08 e Portaria MS n° 5/2017.

Observados nas análises realizadas pela CAGEPA, no Sistema Paraíba-Pernambuco (Figura 4.135), todos as análises realizadas apresentando valores inferiores ao VMP conforme a Resolução CONAMA n° 396/08 e Portaria MS n° 5/2017.

Figura 4.135 - Distribuição nos valores de concentração de SDT nos poços monitorados pela CAGEPA (mg/L)



Fonte: CAGEPA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

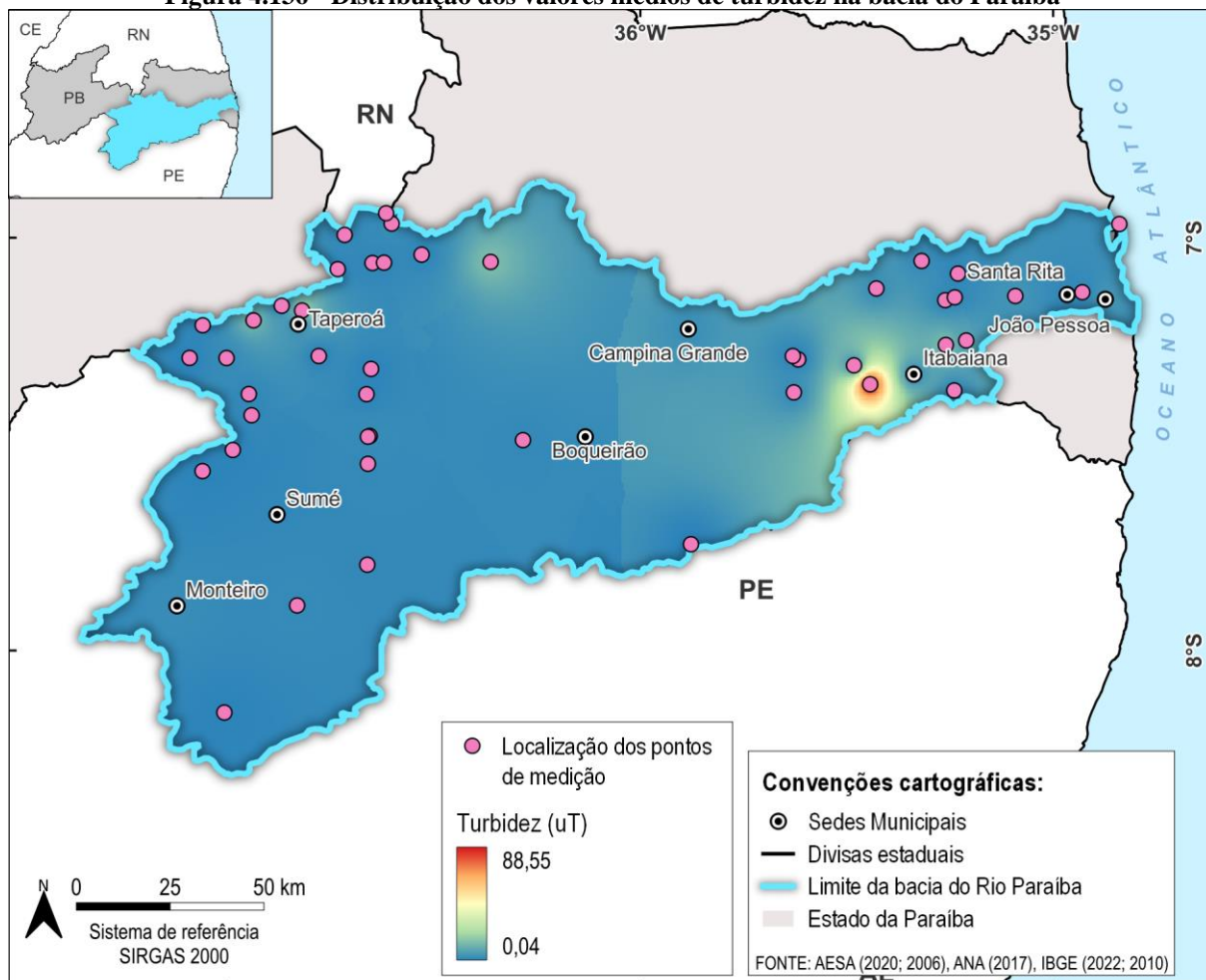
- *Turbidez, cor e pH*

Na elaboração do PERH-PB, as médias de turbidez, cor e pH, de janeiro de 2013 a dezembro de 2017, foram categorizadas como inferior ou superior ao valor máximo permitido (VMP), definido nas Portarias MS n° 5/2017 e n° 888/2021 do Ministério da Saúde (MS).

A turbidez elevada indica uma alta concentração de sedimentos em suspensão, enquanto a cor é resultante dos sólidos dissolvidos do meio físico e da decomposição de matéria orgânica. Já o pH, por sua vez, contribui para a identificação hidrogeológica da água subterrânea.

No mapeamento dos valores de turbidez (Figura 4.136), valores superiores ao VMP (5uT) foram encontrados nos poços cujas águas são provenientes dos Sistemas Cristalino e Paraíba-Pernambuco, principalmente, na parte leste, da bacia hidrográfica.

Figura 4.136 - Distribuição dos valores médios de turbidez na bacia do Paraíba



Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

O valor médio de turbidez entre as estações apresentadas pela AESA foi de 2,1 uT, variando entre 0,035 e 14,7 uT, sendo que as águas do Baixo Curso do Rio Paraíba apresentam os maiores índices de turbidez, como pode ser observado na Tabela 4.57.

Tabela 4.57 - Valores médios de turbidez dos poços na Bacia do Paraíba (uT)

| Sub-bacias | Sistema Cristalino | Sistema Sedimentar | Total |
|---------------|--------------------|--------------------|------------|
| Alto Paraíba | 1,3 | | 1,3 |
| Médio Paraíba | 1,6 | | 1,6 |
| Baixo Paraíba | 3,9 | 2,6 | 3,4 |
| Taperoá | 1,3 | | 1,3 |
| Total | 2,0 | 2,6 | 2,1 |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

Dessas amostras, apenas 7,8% ficaram com a média fora do padrão de potabilidade, estabelecido pelas Portarias MS n° 5/2017 e n° 888/2021 (5uT). Nestes casos a elevada turbidez

nas águas subterrâneas contribuem para abrigar microrganismos, principalmente coliformes totais, os quais utilizam os materiais em suspensão como substrato para a fixação.

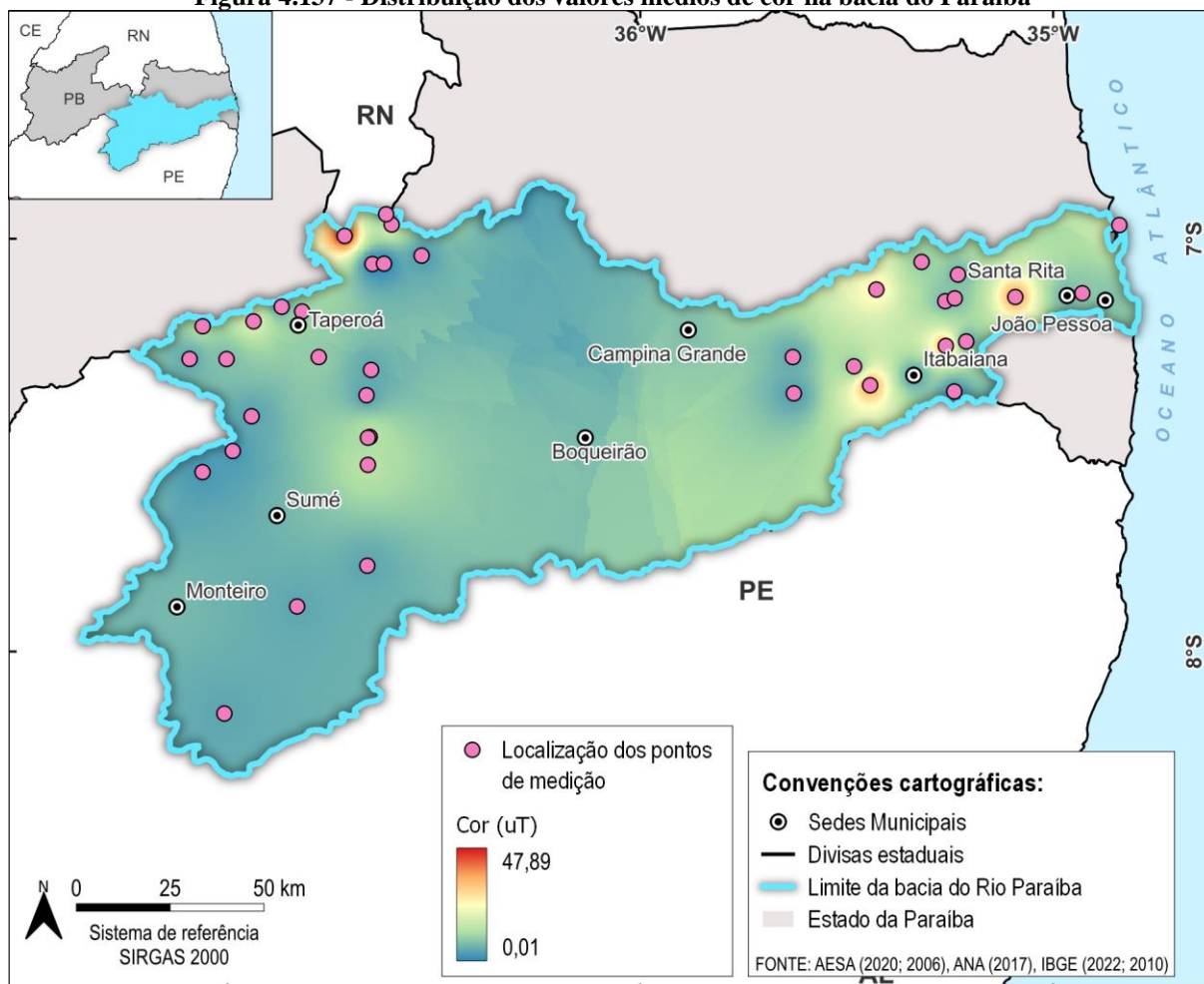
Quando se verifica as médias do parâmetro de cor, constata-se um valor médio de 9,8 uT, com valores variando entre 0,0 e 48,0 uT, e valores mais elevados na região do Baixo Paraíba e na sub-bacia do Taperoá, como pode ser observado na Tabela 4.58 e espacializado na Figura 4.137.

Tabela 4.58 - Valores médios de Cor dos poços na Bacia do Paraíba (uT)

| Sub-bacias | Sistema Cristalino | Sistema Sedimentar | Total |
|---------------|--------------------|--------------------|------------|
| Alto Paraíba | 4,7 | | 4,7 |
| Médio Paraíba | 8,0 | | 8,0 |
| Baixo Paraíba | 10,1 | 11,3 | 10,5 |
| Taperoá | 10,7 | | 10,7 |
| Total | 9,5 | 11,3 | 9,8 |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

Figura 4.137 - Distribuição dos valores médios de cor na bacia do Paraíba



Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

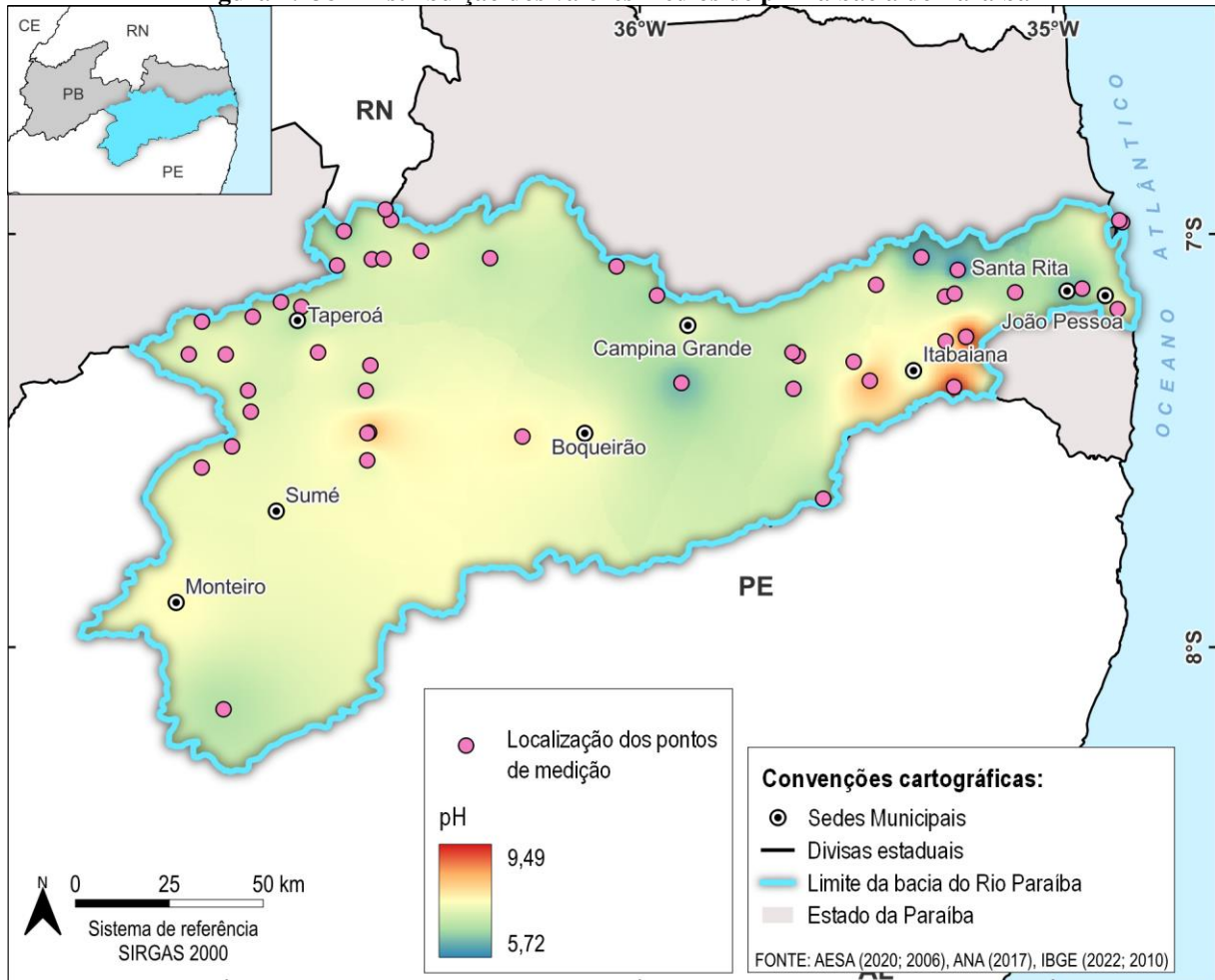
O pH médio constatados nos poços da Bacia do Rio Paraíba foi de 7,28 uT, com valores variando entre 5,7 e 9,5, com valores mais ácidos na região do Médio Paraíba e nos poços localizados no sistema Paraíba-Pernambuco, conforme pode ser observado na Tabela 4.59 e na Figura 4.138.

Tabela 4.59 - Valores médios de pH dos poços na Bacia do Paraíba

| Sub-bacias | Sistema Cristalino | Sistema Sedimentar | Total |
|---------------|--------------------|--------------------|-------|
| Alto Paraíba | 7,33 | | 7,33 |
| Médio Paraíba | 6,92 | | 6,92 |
| Baixo Paraíba | 7,72 | 6,87 | 7,36 |
| Taperoá | 7,27 | | 7,27 |
| Total Geral | 7,36 | 6,87 | 7,28 |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

Figura 4.138 - Distribuição dos valores médios de pH na bacia do Paraíba



Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape (2024).

- *Metais pesados*

A análise de metais pesados é crucial para garantir a segurança das águas subterrâneas para consumo humano. Geralmente este monitoramento da qualidade de águas subterrâneas é utilizado para avaliar a contaminação do solo em áreas industriais e monitorar a presença de metais tóxicos em alimentos, como peixes etc.

Em relação ao monitoramento dos metais pesados realizado no PERH, considera-se as médias por sistema aquíferos (Tabela 4.60), sendo verificado registros de concentrações superiores ao VMP de ferro no Sistema Cristalino, e no Sistema Paraíba-Pernambuco.

Tabela 4.60 - Valores médios de pH dos poços na Bacia do Paraíba

| Metais pesados | Cristalino | Paraíba-Pernambuco | VMP CONAMA396 | VMP MS 5/2017 |
|----------------|------------|--------------------|---------------|---------------|
| Antimônio | | 0,002 | 0,005 | 0,005 |
| Arsênio | | 0,002 | 0,010 | 0,010 |
| Bário | | 0,069 | 0,700 | 0,700 |
| Cádmio | | 0,003 | 0,005 | 0,005 |
| Chumbo | | 0,002 | 0,010 | 0,010 |
| Cobre | | 0,005 | 2,00 | 2,000 |
| Cromo | | 0,005 | 0,050 | 0,050 |
| Ferro | 0,035 | 0,134 | 0,300 | 0,300 |
| Manganês | | 0,05 | 0,100 | 0,100 |
| Mercurio | | 0,00 | 0,001 | 0,001 |
| Níquel | | 0,005 | 0,020 | 0,070 |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

- *Coliformes Totais e Escherichia Coli*

A presença de Coliformes Totais e *Escherichia Coli* em águas subterrâneas pode ser um sinal de que agentes patogênicos, que podem causar doenças, estão presentes na água. Essa presença pode alertar para a necessidade de investigar potenciais fontes de contaminação e tomar medidas para proteger e purificar a água. Neste monitoramento, é possível avaliar a qualidade microbiológica da água subterrânea e garantir que as águas subterrâneas sejam seguras para o consumo humano.

Na Tabela 4.61, verifica-se que cerca de 32,4% das amostras analisadas acusam presença de *E-Coli*, sendo resultados aproximados verificados em toda a bacia hidrográfica, indicando alguma contaminação da água subterrânea por esgotos sanitários.

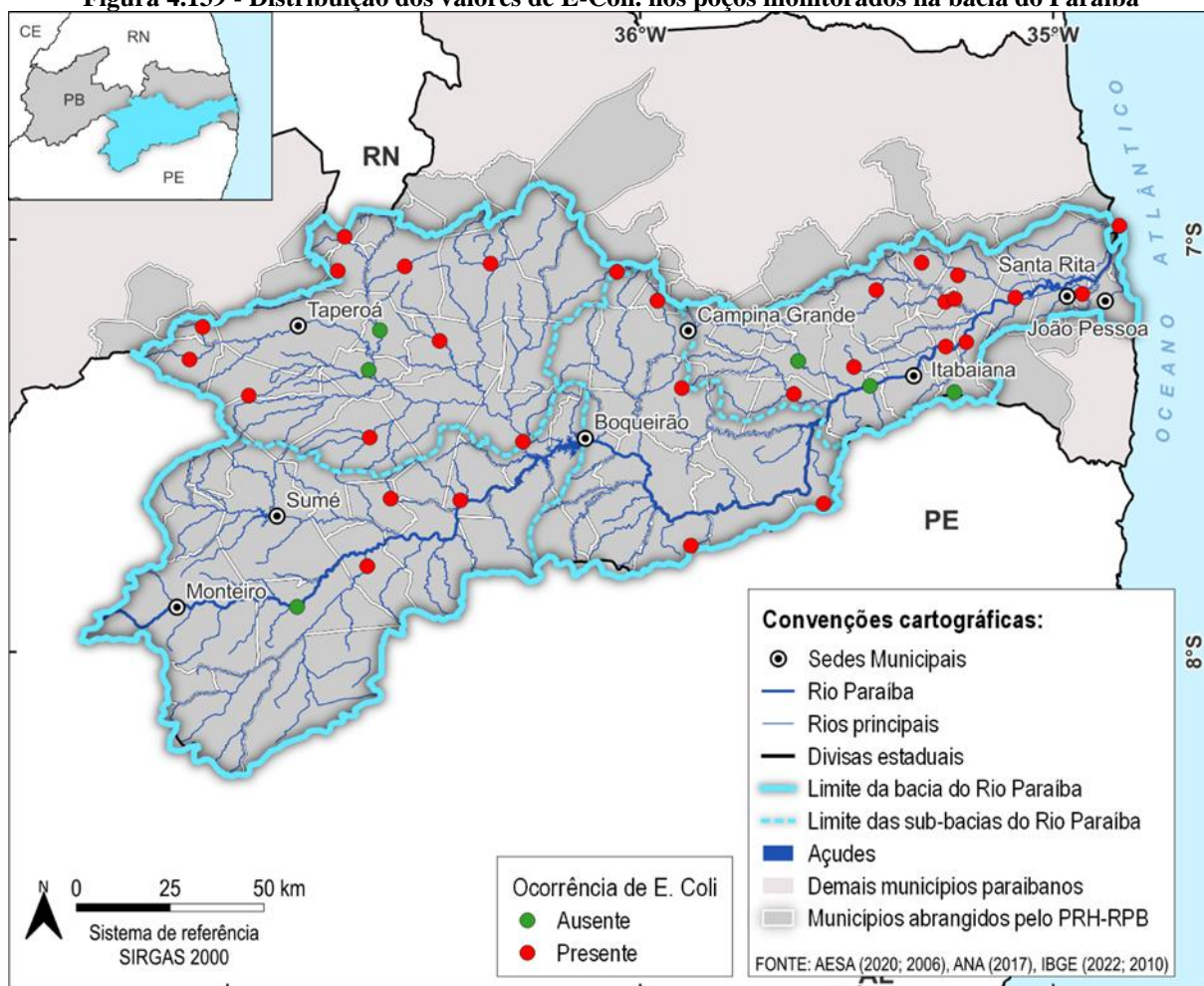
Tabela 4.61 - Distribuição das análises de *E-Coli* nos poços monitorados pela AESA

| Sub-bacias | Sistema Cristalino | | Sistema Sedimentar | | Total | |
|--------------------|--------------------|------------|--------------------|------------|------------|------------|
| | Ausente | Presente | Ausente | Presente | Ausente | Presente |
| Alto Paraíba | 70 | 35 | | | 70 | 35 |
| Médio Paraíba | 29 | 44 | | | 29 | 44 |
| Baixo Paraíba | 305 | 169 | 377 | 133 | 682 | 302 |
| Taperoá | 119 | 50 | | | 119 | 50 |
| Total Geral | 523 | 298 | 377 | 133 | 900 | 431 |

Fonte: Adaptado de PERH-PB (2022).

Apesar de 67% das amostras estarem livres de *E-Coli*, apenas 19% dos poços monitorados sempre estiveram livres de contaminação. A distribuição dos poços foi espacializada na Figura 4.139.

Figura 4.139 - Distribuição dos valores de E-Coli. nos poços monitorados na bacia do Paraíba



Fonte: PERH-PB (2022), adaptado por Cobrape, 2024.

Quando verificadas apenas as análises realizadas pela CAGEPA no Sistema Paraíba-Pernambuco, a presença de E-coli ocorre em apenas 6% das análises realizadas.

4.6.4 Síntese da análise da qualidade das águas

A análise da qualidade das águas superficiais foi realizada a partir da rede de monitoramento e da caracterização da bacia de contribuição. Concluiu-se que a qualidade da água não é uniforme na bacia hidrográfica e apresenta variações tanto em seu componente espacial como em seu componente temporal.

Com base nos dados analisados, observa-se que os parâmetros de qualidade da água superficial na bacia do Rio Paraíba refletem diferentes padrões sazonais e geográficos. Como exemplo, tem-se que as concentrações de OD se mostraram consistentes ao longo das estações de chuva e estiagem, assim como entre as localizadas no litoral e no interior. Outro exemplo é em relação a turbidez, onde a sub-bacia do Taperoá apresentou maior turbidez, especialmente durante o período chuvoso. Em contraste, nas regiões mais agrestes do Médio e Alto Paraíba, a turbidez diminui.

A distribuição dos pontos monitorados revela que a maioria está em áreas adequadas para o contato direto com a água, embora existam pontos impróprios tanto próximo ao litoral quanto

no Médio Paraíba. As medições de coliformes termotolerantes na bacia do Rio Paraíba indicam uma redução da qualidade da água conforme se aproxima da foz, com aproximadamente 79% dos pontos mostrando contaminação por esgotos domésticos, destacando a necessidade de medidas para mitigar esses impactos nas águas superficiais da região.

Durante os períodos de chuvas, há um aumento significativo no aporte de fósforo e nitrogênio, especialmente no Médio Curso do Paraíba, devido ao carreamento de solo e partículas sólidas. Além disso, as concentrações mais elevadas de metais pesados estão associadas a polos industriais e atividades de extração mineral, o que indica um possível despejo irregular de efluentes industriais.

Em geral, as sub-bacias apresentaram IQA médios que indicam boa qualidade. As bacias do Alto e Baixo Paraíba apresentaram os maiores IQAs máximos. Os IQAs mínimos se caracterizaram como regular, exceto na bacia do Baixo Paraíba que é limítrofe com a classe ruim. Observa-se que dos 33 pontos dos reservatórios monitorados, a maior parte encontra-se em estado hipereutrófico, sugerindo altos níveis de nutrientes e possíveis problemas de eutrofização.

A análise de qualidade das águas subterrâneas foi realizada de forma análoga às superficiais. No Sistema Aquífero Serra dos Martins, todas as amostras apresentaram valores fora do padrão de potabilidade, enquanto no Sistema Cristalino, os valores tenderam a diminuir.

Ao mapear os valores de turbidez, verificou-se que os poços localizados nos Sistemas Cristalino e Paraíba-Pernambuco, principalmente na parte leste da bacia hidrográfica, apresentam elevados índices. Apenas 7,8% das amostras ficaram com a média fora do padrão de potabilidade. Nestes casos a elevada turbidez nas águas subterrâneas contribuem para abrigar microrganismos, principalmente coliformes totais, os quais utilizam os materiais em suspensão como substrato para a fixação. Verificou-se que cerca de 32,4% das amostras analisadas acusam presença de E-Coli, sendo resultados aproximados verificados em toda a bacia hidrográfica, indicando alguma contaminação da água subterrânea por esgotos sanitários.

Para uma análise mais detalhada deve-se aprimorar a rede de monitoramento existente, principalmente quanto aos dados contínuos da qualidade da água, bem como a utilização de estudos hidrogeológicos detalhados para entender melhor a dinâmica dos aquíferos e identificar as fontes de contaminação.

4.7 AVALIAÇÃO INTEGRADA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA

Sabe-se de toda a complexidade que envolve esse produto do estudo hidrológico da bacia. Após uma caracterização detalhada de itens que impactam diretamente as disponibilidades hídricas superficiais e subterrâneas na Bacia do Rio Paraíba, verifica-se a necessidade de uma análise integrada dessa disponibilidade de forma que os recursos hídricos disponíveis possam ser bem aproveitados, considerando as interrelações dos compartimentos hidrológicos para uma gestão eficiente das águas na bacia, conforme prevê a Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos nº 202, de 28 de junho de 2018.

Em bacias hidrográficas em que os rios são perenes, a integração entre a disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, em termos de quantidade de água disponível, é mais evidente, uma vez que no período seco, é o lençol subterrâneo que mantém as vazões observadas nos cursos d'água superficiais. A Bacia do Rio Paraíba, está em grande parte sobre o Sistema Aquífero Cristalino, em que há pouca influência da contribuição de águas subterrâneas sobre os rios superficiais na Bacia. Esta característica é mais marcada até a porção média da bacia hidrográfica, sendo que na porção do Baixo Rio Paraíba, sobre o Sistema Aquífero Litorâneo esta integração entre o recurso hídrico disponível, em suas parcelas superficial e subterrânea, é mais fácil de ser observada.

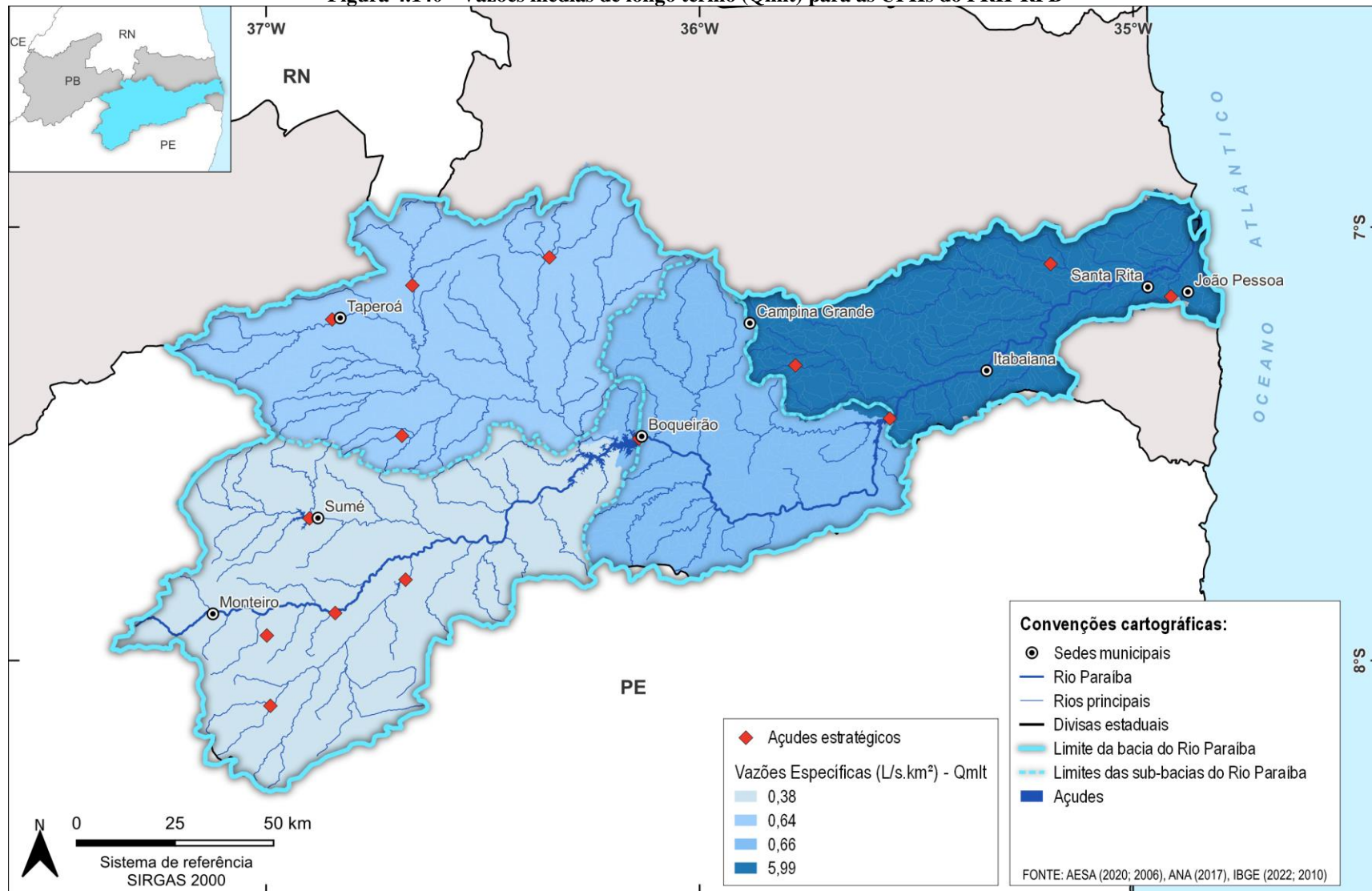
A classificação geral da bacia em termos de disponibilidade hídrica é baixa ou muito baixa, com exceção da região do baixo curso do Rio Paraíba. Isso, em parte, pela característica climática da região, com período seco e úmido bem-marcados, mas também pelas características geológicas da bacia, que está quase toda sobre sistemas aquíferos de baixa produtividade. Os resultados obtidos da modelagem hidrológica chuva-vazão para a obtenção das séries de vazão natural pseudo-históricas em pontos não monitorados da bacia, representam esse comportamento típico da região.

Da mesma forma, a quantidade e distribuição dos poços tubulares na bacia, mostram que o recurso hídrico subterrâneo existente é hidrogeologicamente muito explorado, também como reflexo do comportamento da disponibilidade hídrica superficial naturalmente disponível.

A Figura 4.140 mostra a vazão específica média de longo termo gerada em cada unidade de planejamento (sub-bacias) a partir da aplicação do modelo hidrológico calibrado.

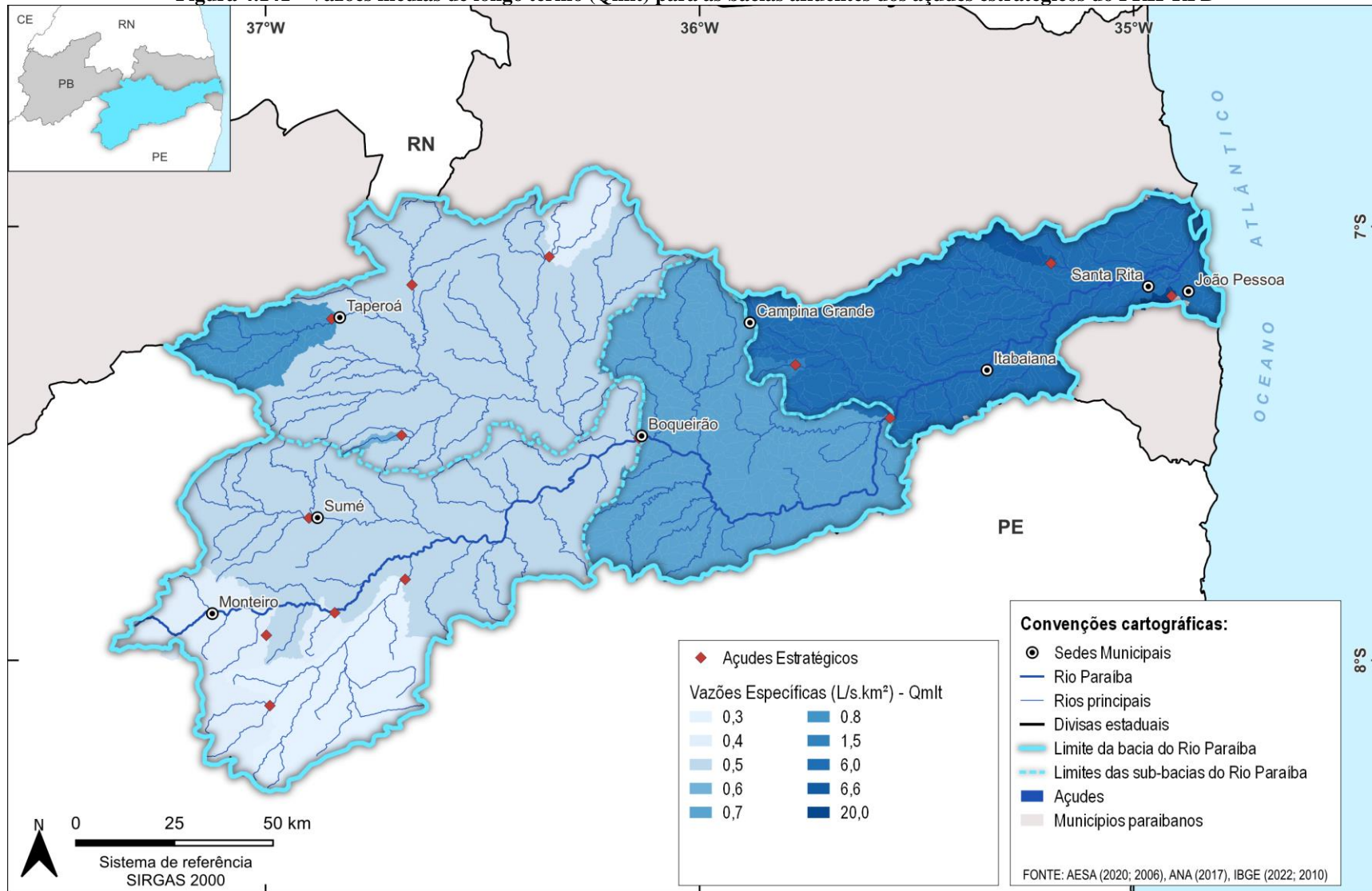
Os resultados apresentados na Figura 4.140 são reflexos do comportamento geológico da bacia, uma vez que a separação do escoamento acontece na camada do solo, quando de um evento de precipitação. Adicionalmente, refletem o comportamento intermitente da bacia, especialmente até a sua porção média, em que se observam poucos picos de vazão e longos períodos de vazões nulas ao longo do ano hidrológico, o que torna a vazão média mais baixa em relação à porção litorânea da bacia em que o curso do Rio Paraíba apresenta vazões em maior parte do tempo.

No que concerne a disponibilidade hídrica superficial, a exploração do recurso hídrico está muito associada à capacidade de acumulação artificial criada a partir de barramentos para a formação de açudes. A Figura 4.141 apresenta as vazões específicas médias de longo termo afluentes aos açudes estratégicos definidos para o PRH-RPB.

Figura 4.140 - Vazões médias de longo termo (Q_{mt}) para as UPHs do PRH-RPB

Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.141 - Vazões médias de longo termo (Qmlt) para as bacias afluentes dos açudes estratégicos do PRH-RPB



Fonte: Cobrape (2024).

Nas sub-bacias do Alto Paraíba e Rio Taperoá; e no Médio Paraíba, a disponibilidade hídrica está muito associada a presença dos açudes, como é possível observar pela distribuição dos açudes de maior volume (acima de 10 hm³) na Figura 4.141. Cabe destacar, que as perdas por evaporação nesses reservatórios podem ser bastante significativas a ponto de comprometer o atendimento a outras demandas, uma vez que, na região, o potencial de evapotranspiração é alto. Esta perda por evaporação é uma das fragilidades deste tipo de reserva hídrica, junto à susceptibilidade a eventos de seca prolongada, como foi possível observar no período entre 2012 e 2017, com índices de chuva acumulada inferiores à média histórica.

Nesse sentido, os resultados obtidos para a modelagem hidrológica chuva-vazão da bacia do Rio Paraíba, bem como das análises realizadas especificamente para análise da disponibilidade hídrica dos açudes estratégicos para o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba, corroboram as análises aqui apresentadas, bem como a divisão da região conforme apresentado na Figura 4.45, caracterizando-as como zonas hidrológicas homogêneas.

O modelo hidrológico escolhido para o estudo permite que se obtenha as vazões de forma espacializada em toda a bacia hidrográfica, considerando suas características em zonas hidrológicas homogêneas, bem como considerando as especificidades de cada região, no que concerne ao tipo de cobertura do solo predominante e declividades do terreno, que influenciam na geração do escoamento. Como o modelo tem integração com um sistema SIG, os dados foram trabalhados de forma georreferenciada, sendo possível averiguar as informações de disponibilidade hídrica natural com diferentes permanências em toda a bacia, e incluindo nessa estimativa, a particularidade de áreas ainda menores que as sub-bacias e as zonas homogêneas observadas.

Desse modo, as vazões mínimas, principalmente, que são de grande importância para a determinação da disponibilidade hídrica, são calculadas de modo a favorecer a segurança hídrica da região. Da mesma forma, a caracterização e estudo dos açudes da região, que consistem em reservatórios imprescindíveis para o atendimento das demandas múltiplas existentes na abrangência do PRH-RPB, fornecem subsídios necessários para o embasamento das próximas fases de estudo: de Cenarização e Prognóstico dos recursos hídricos da bacia do Rio Paraíba, e de desenvolvimento e proposta do Plano de Ações para o PRH-RPB.

Quanto à parcela subterrânea da disponibilidade hídrica, partindo de uma análise de consistência dos bancos de dados hidrogeológicos, o estudo apresentado pode auxiliar como ferramenta de gestão através da análise da relação entre as disponibilidades calculadas para as reservas potenciais exploráveis (RPE) e as vazões outorgadas (Q_{out}).

Ao se avaliar o mapa de distribuição dos poços tubulares na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba (Figura 4.142 a Figura 4.145), observa-se que a sua distribuição é relativamente homogênea por toda a área da bacia, muito provavelmente devido à menor disponibilidade de recursos hídricos superficiais, e com alguma maior concentração em João Pessoa, o que é natural, já que é a área com maior adensamento populacional.

Outros adensamentos de poços, apesar de em menor escala, são observados em outros entornos de cidades do interior, sendo quem em quase todo o resto da bacia hidrográfica este recurso subterrâneo é hidrogeologicamente muito explorado.

Estas áreas mais adensadas em termos de utilização das águas subterrâneas podem já estar sofrendo ou vir a sofrer déficits de produção, decorrente de uma maior demanda em relação às recargas superficiais - em especial nos chamados Sistemas Aquíferos Fraturados - fazendo com que não só as reservas ativas estejam sendo consumidas, mas também parcelas das chamadas reservas permanentes.

Neste sentido, apesar de muitos planos de gerenciamento de recursos hídricos e até mesmo a ANA preverem a utilização de apenas uma parcela da reserva ativa subterrânea - como demonstrado no presente trabalho, onde se adotou um coeficiente de sustentabilidade de 40% da recarga potencial direta para praticamente todos os sistemas aquíferos - salienta-se que esta parcela de utilização poderá ser definida caso a caso e a critério do órgão gestor, preferencialmente embasados em dados atuais e coerentes. Em certos casos, e, dependendo do sistema aquífero explorado, aceita-se até mesmo uma pequena parcela de utilização da reserva permanente - caso os poços operantes estejam de fato nela instalados.

Este valor final disponível poderá ser, então, confrontado - em especial nas áreas com déficit hídrico - com as atuais vazões exploradas pelos poços registrados nos órgãos competentes, ou pelas vazões outorgadas totais de cada sistema aquífero em particular, conforme foi realizado a seguir, neste caso e de maneira experimental.

Visando ainda melhor facilitar o entendimento dos órgãos gestores quanto a maior ou menor disponibilidade hídrica subterrânea nas áreas de estudo, adotou-se na Figura 4.146 e na Figura 4.147 a seguir, a classificação proposta por Correia (2017), que organiza e reclassifica as vazões específicas em classes de produtividade dos poços, nos seguintes intervalos:

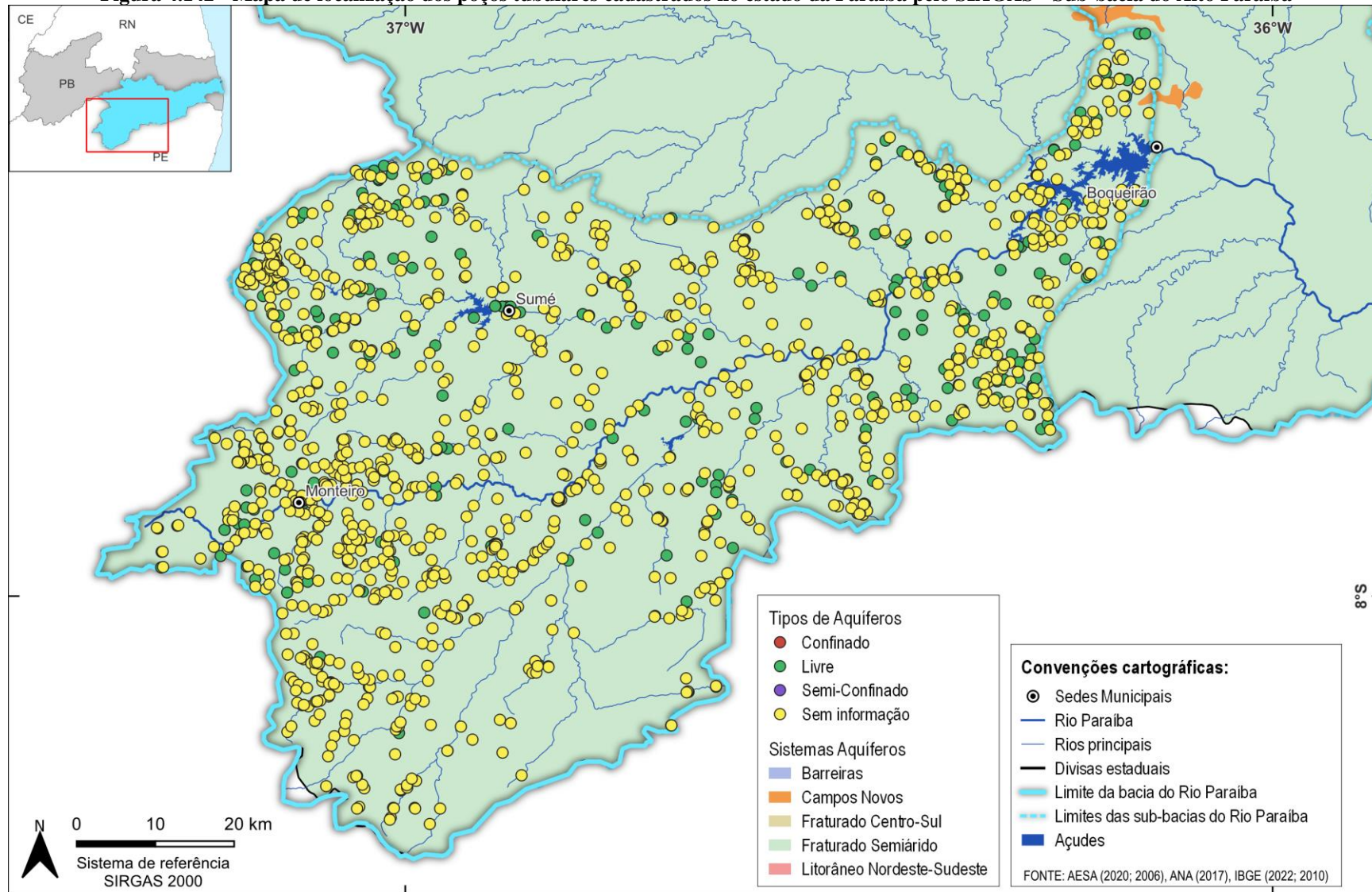
- Produtividade Fraca: vazões específicas inferiores a $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$
- Produtividade Moderada: vazões específicas entre $0,5$ e $3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$
- Produtividade Elevada: vazões específicas entre 3 e $12 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$

Desta forma, analisando toda a bacia hidrográfica fica nítido que mais da metade de sua extensão em área, é coberta por áreas de produtividade fraca, muito decorrente da própria constituição dos sistemas aquíferos fraturados. Esta classe de Produtividade Fraca predomina por exemplo no município de Campina Grande.

De forma mais longitudinal ao próprio eixo principal da bacia, de sudoeste para nordeste, também ocorrem manchas homoganeamente distribuídas de áreas de produtividade moderada, muito provavelmente vinculadas à própria estruturação geotectônica da bacia, e que por sua vez possa ter gerado um maior grau de ocorrência de estruturas (p.ex. falhas, fraturas), de armazenamento de águas subterrâneas.

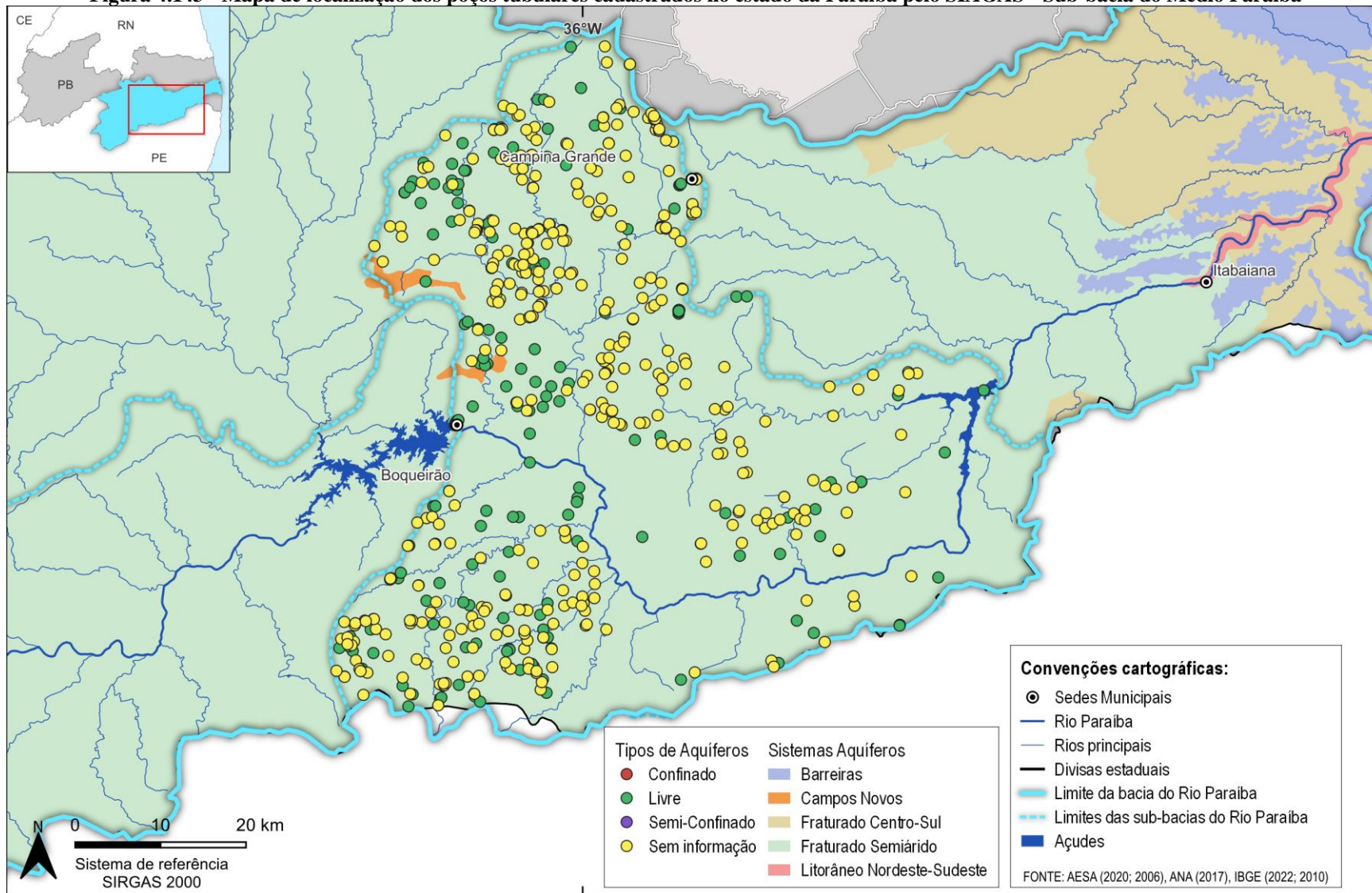
A classe de Produtividade Moderada também prevalece no município de João Pessoa e áreas esparsas, próximas ao litoral (do centro para o norte) onde também se verificam manchas esparsas relativas à classe de Produtividade Elevada.

Figura 4.142 - Mapa de localização dos poços tubulares cadastrados no estado da Paraíba pelo SIAGAS - Sub-bacia do Alto Paraíba



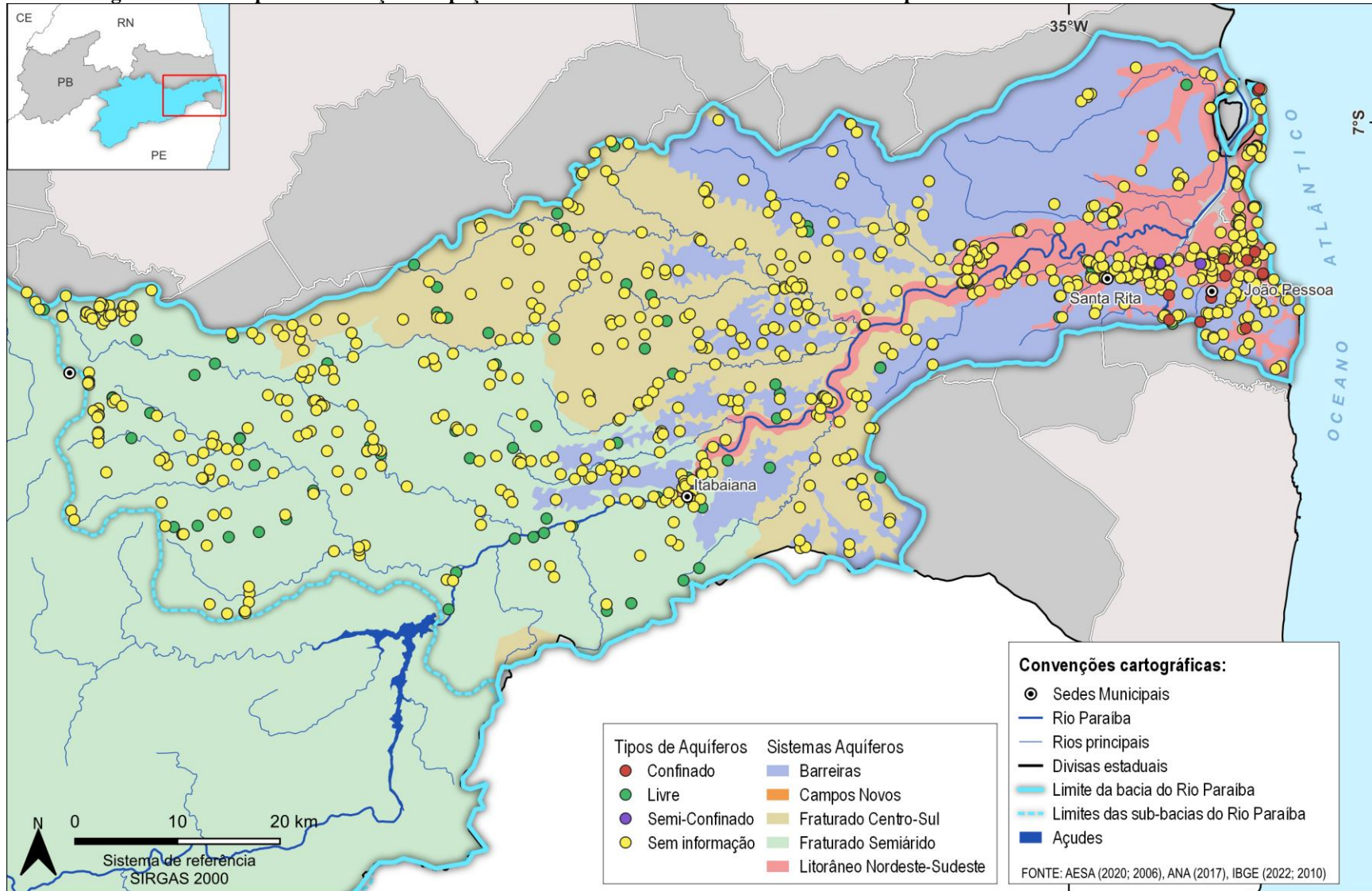
Fonte: SIAGAS (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.143 - Mapa de localização dos poços tubulares cadastrados no estado da Paraíba pelo SIAGAS - Sub-bacia do Médio Paraíba



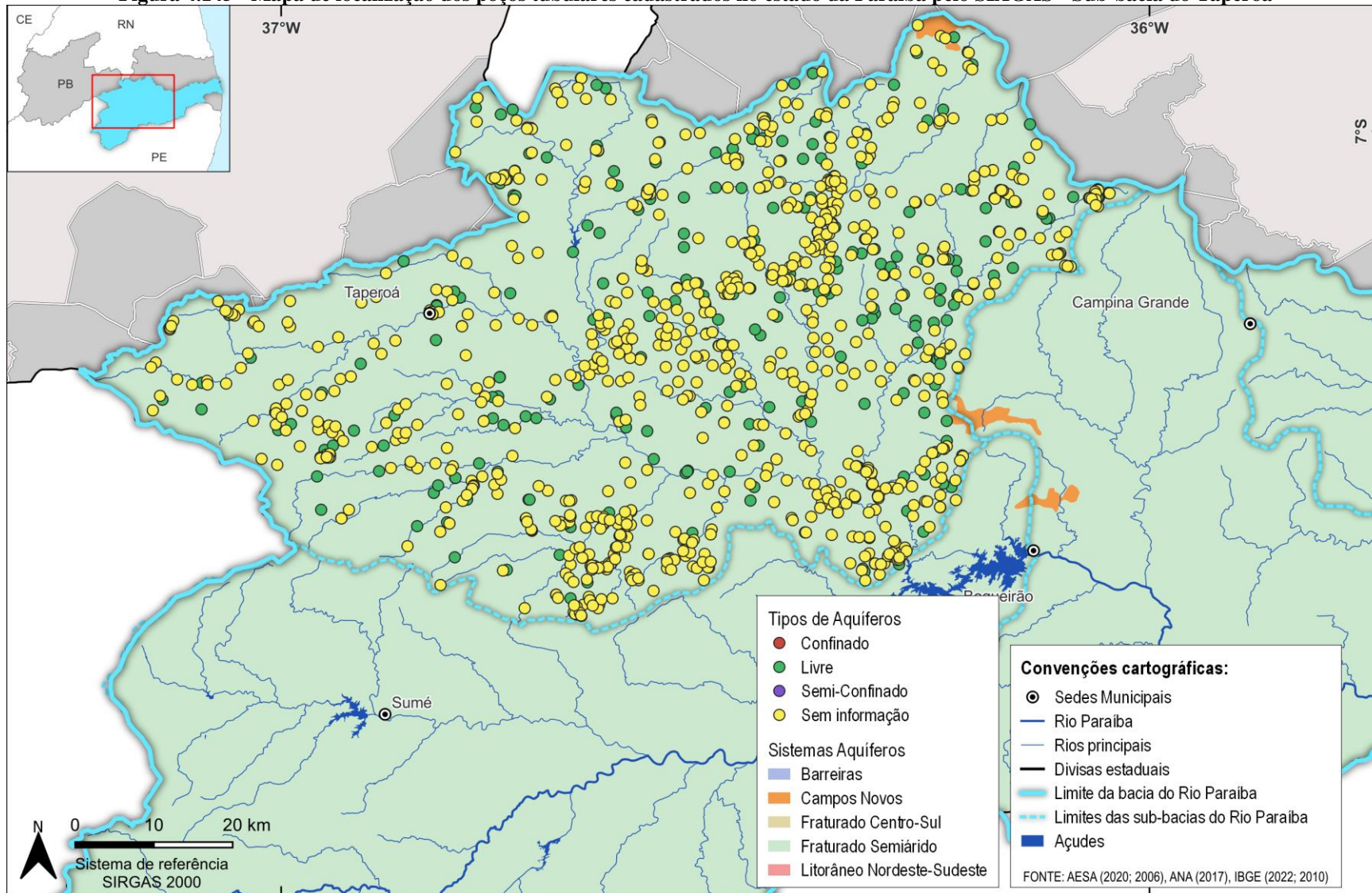
Fonte: SIAGAS (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.144 - Mapa de localização dos poços tubulares cadastrados no estado da Paraíba pelo SIAGAS - Sub-bacia do Baixo Paraíba



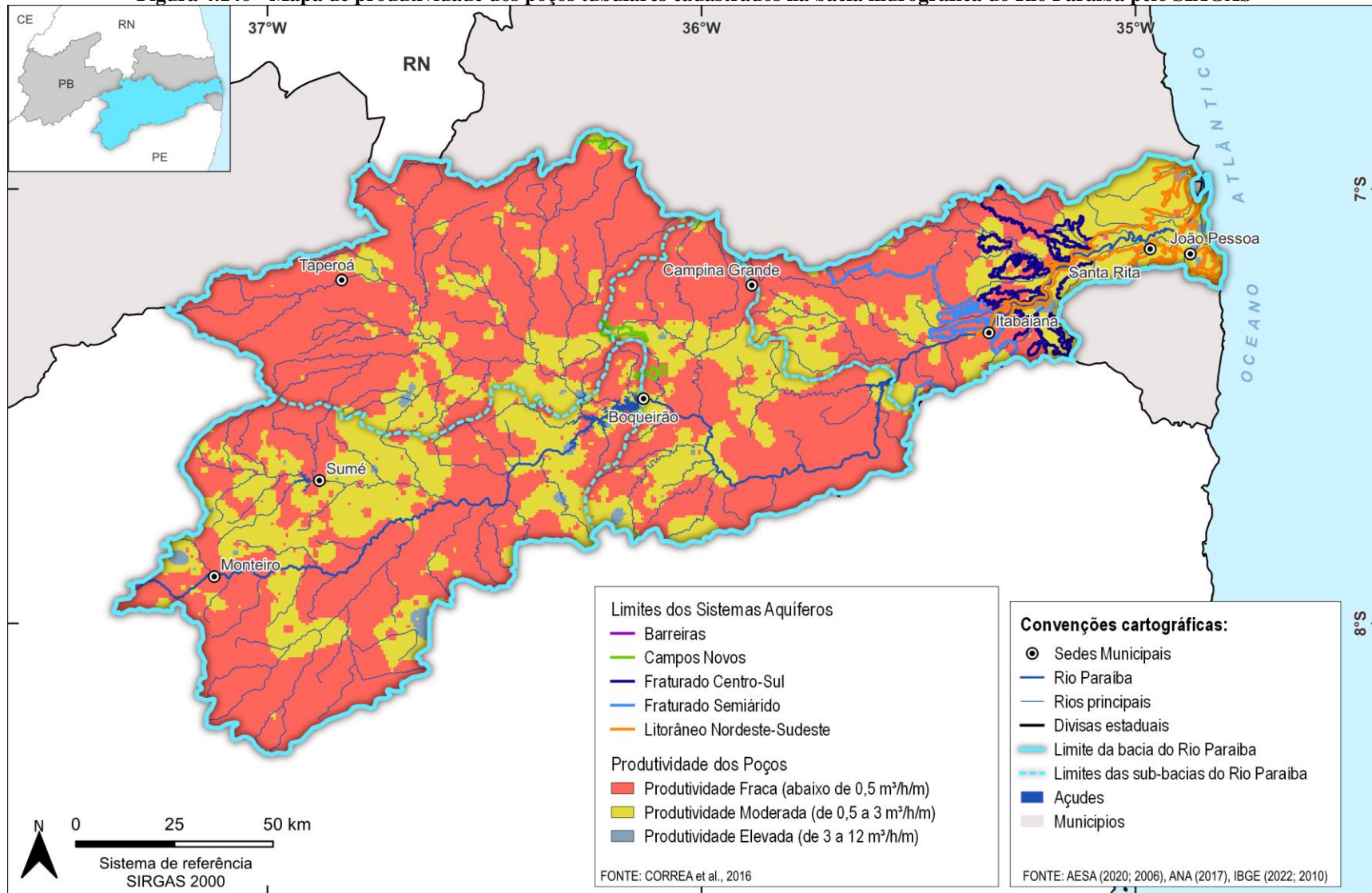
Fonte: SIAGAS (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.145 - Mapa de localização dos poços tubulares cadastrados no estado da Paraíba pelo SIAGAS - Sub-bacia do Taperoá



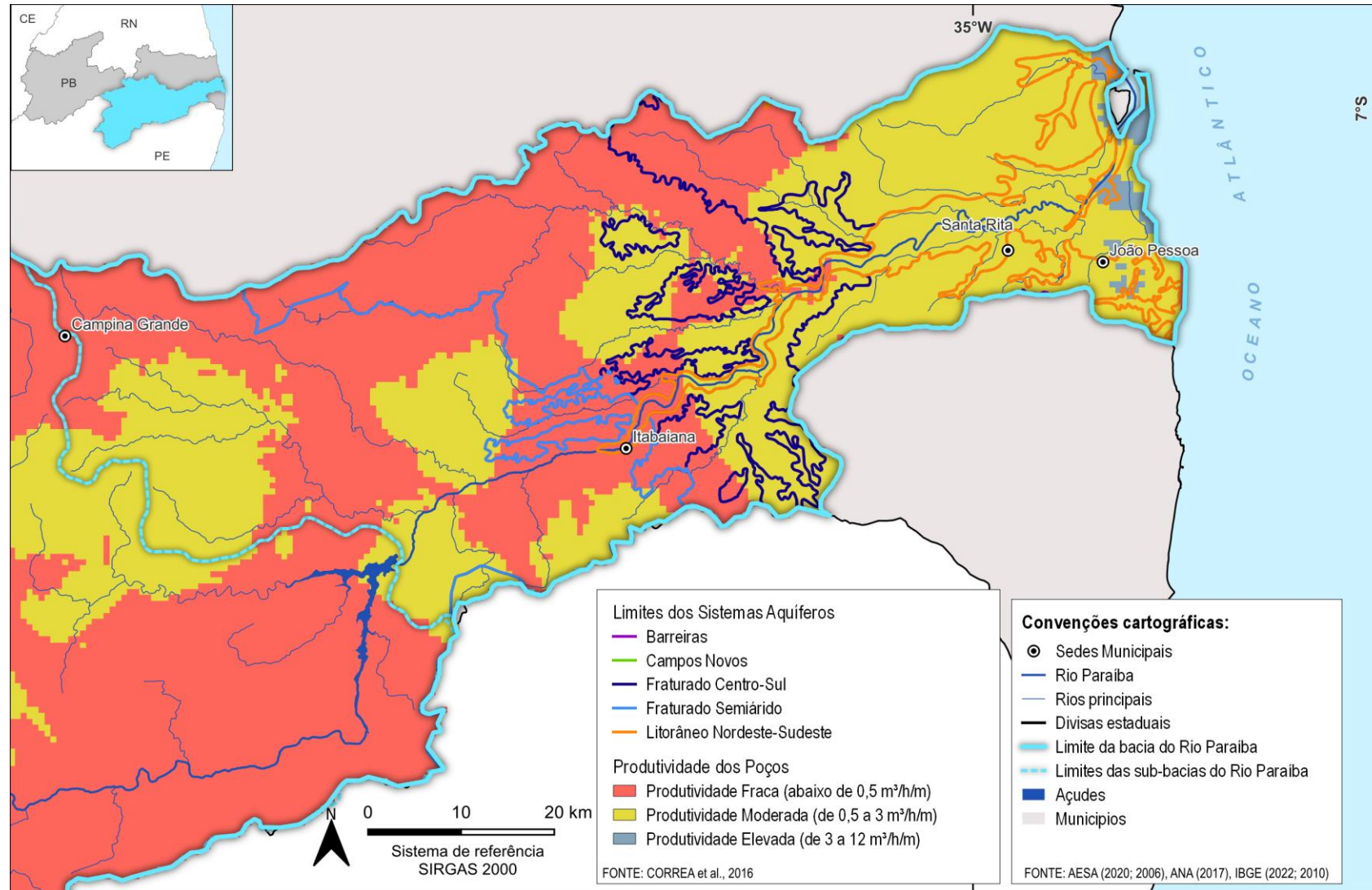
Fonte: SIAGAS (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.146 - Mapa de produtividade dos poços tubulares cadastrados na bacia hidrográfica do Rio Paraíba pelo SIAGAS



Fonte: Cobrape (2024).

Figura 4.147 - Mapa de produtividade dos poços tubulares cadastrados pelo SIAGAS com destaque para a macrorregião entre as cidades de Campina Grande e João Pessoa



Conforme supracitado, e procurando então retratar estas correlações entre disponibilidades e exploração, foram calculadas as relações percentuais entre a RPD de cada sistema aquífero e as vazões totais outorgadas pela AESA, frisando que as últimas são decorrentes da multiplicação da vazão média dos poços, pelo seu número de horas operacionais declaradas (ambas informações presentes no banco de dados da AESA) conforme pode ser observado no próximo mapa.

Ao observador, só é importante mais uma vez frisar que o banco de dados da AESA conta com cerca de 800 poços, o que representa aproximadamente somente 10% do quantitativo total de poços existentes no banco de dados do SIAGAS, mas foram aqui utilizados para tal modelagem, uma vez que por possuírem somente dados recentes (entre 2021 e 2024), retratam muito provavelmente a realidade atual em termos de poços de fato outorgados e operantes.

Já com relação aos mapas de estresse hídrico subterrâneo a seguir demonstrados, também é importante lembrar que o presente estudo sugeriu uma RPE - reserva potencial explorável, de 40% da RPD - recarga potencial direta; portanto os valores acima de 40% e destacados em laranja já refletem de alguma forma, um sinal de alerta para as regiões destacadas do mapa.

Analisando com este viés a Figura 4.148 abaixo, fica claro que o sistema aquífero Centro-Sul é o de menor exploração, não ultrapassando nem 10% da RPE, seguido do sistema aquífero Fraturado Semiárido e de parte do Barreiras, onde os volumes aumentam, mas não ultrapassam 20% da RPE. O sinal de alerta mais importante fica aqui relatado para o sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste, com regimes de exploração que já ultrapassam os 40% recomendados, se considerarmos somente os poços oficialmente outorgados.

Conforme indica os Estudos Hidrogeológicos (AESA, 2024), a sub-bacia do Baixo Paraíba presente na área do Sistema Aquífero Pernambuco-Paraíba tem uma classificação de favorabilidades à recarga variando entre moderada (23,9%) a baixa (19,7%), com alguns pontos de favorabilidade ruim (3,5%). Além disso, a região do Baixo Paraíba possui uma extensa área com cargas hidráulicas baixas, e ao norte encontram-se áreas de alto potencial hidráulico, sendo que a direção de fluxo se apresenta como prioritária na direção sul e se estende de oeste ao mar.

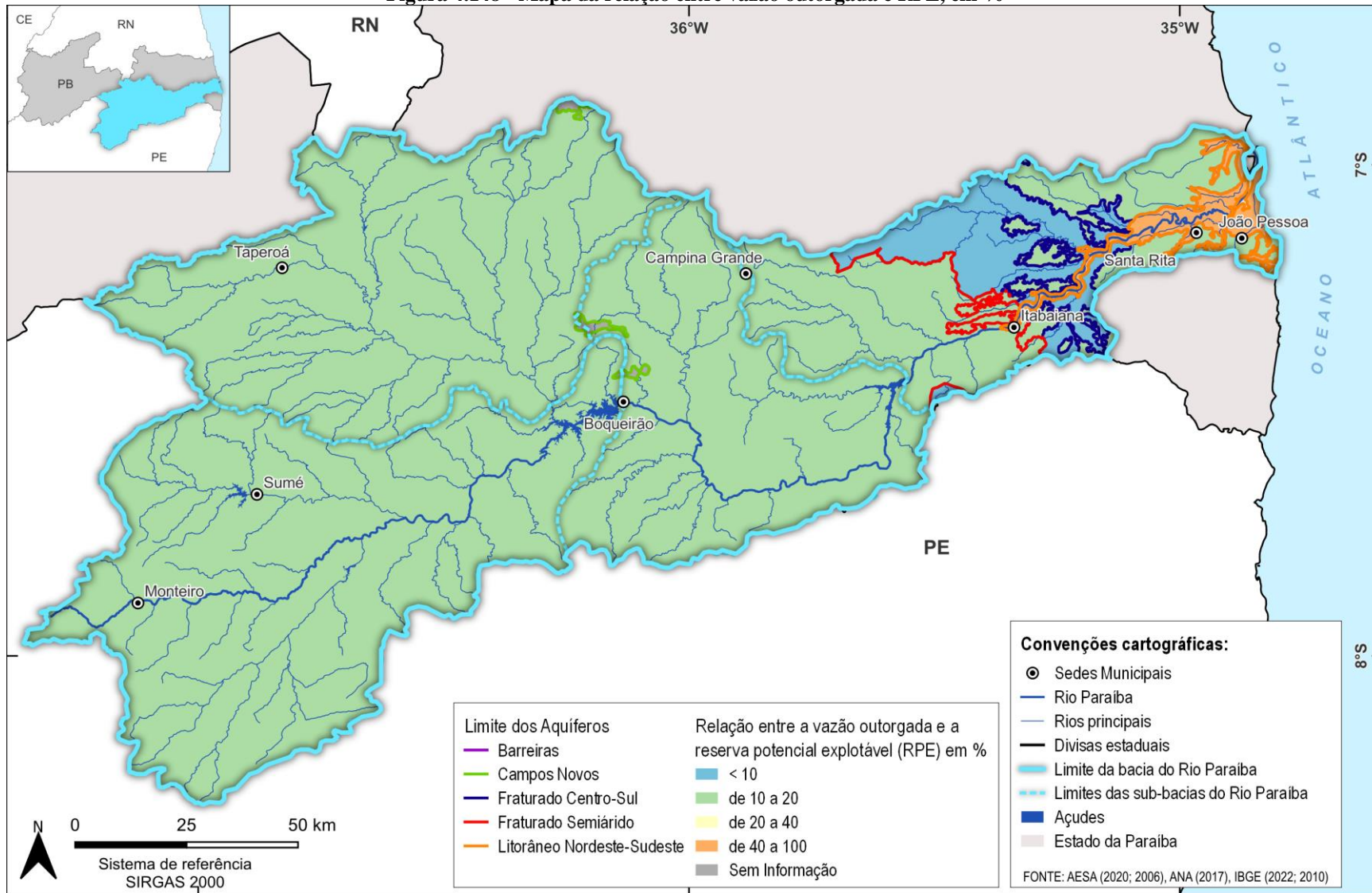
Uma análise posteriormente com mais particularidade pelo poder público do sistema aquífero Litorâneo Nordeste-Sudeste deve ser feita, já que este sistema aquífero é esparsamente utilizado na cidade de João Pessoa e entorno, cabendo frisar, no entanto, que o banco de dados da AESA não separa os poços tubulares profundos localizados em aquíferos livres, daqueles instalados em aquíferos confinados, de tal forma que aqui nesta análise, se assume que todos os poços cadastrados estão de uma forma ou outra utilizando a água dos aquíferos livres, e que são portanto, os sistemas aquíferos que de fato estão correlacionados com os cálculos da RPE.

Em sendo possível a separação futura das vazões outorgadas em poços tubulares profundos localizados em aquíferos confinados - portanto não diretamente correlacionáveis com a reserva ativa - daqueles que sim, são diretamente correlacionáveis com a RPE, tal cenário poderá se diferenciar um pouco, o que também poderá ser ainda mais bem refinado se forem, por exemplo, utilizados hidrômetros nestes poços, de maneira que os volumes utilizados nos cálculos possam ser de fato os realmente bombeados.

Ainda nesta linha de pensamento, e considerando que a literatura técnica afirma que na realidade o número de poços existentes num determinado sistema aquífero pode facilmente ultrapassar em 100% do número daqueles oficialmente outorgados, a Figura 4.149 a seguir retrata uma simulação, onde se duplicaram os dados das vazões outorgadas, tentando desta forma abstrair o que seria o cenário de fato existente e “real” em termos de volumes explorados, e não aqueles oficialmente reportados.

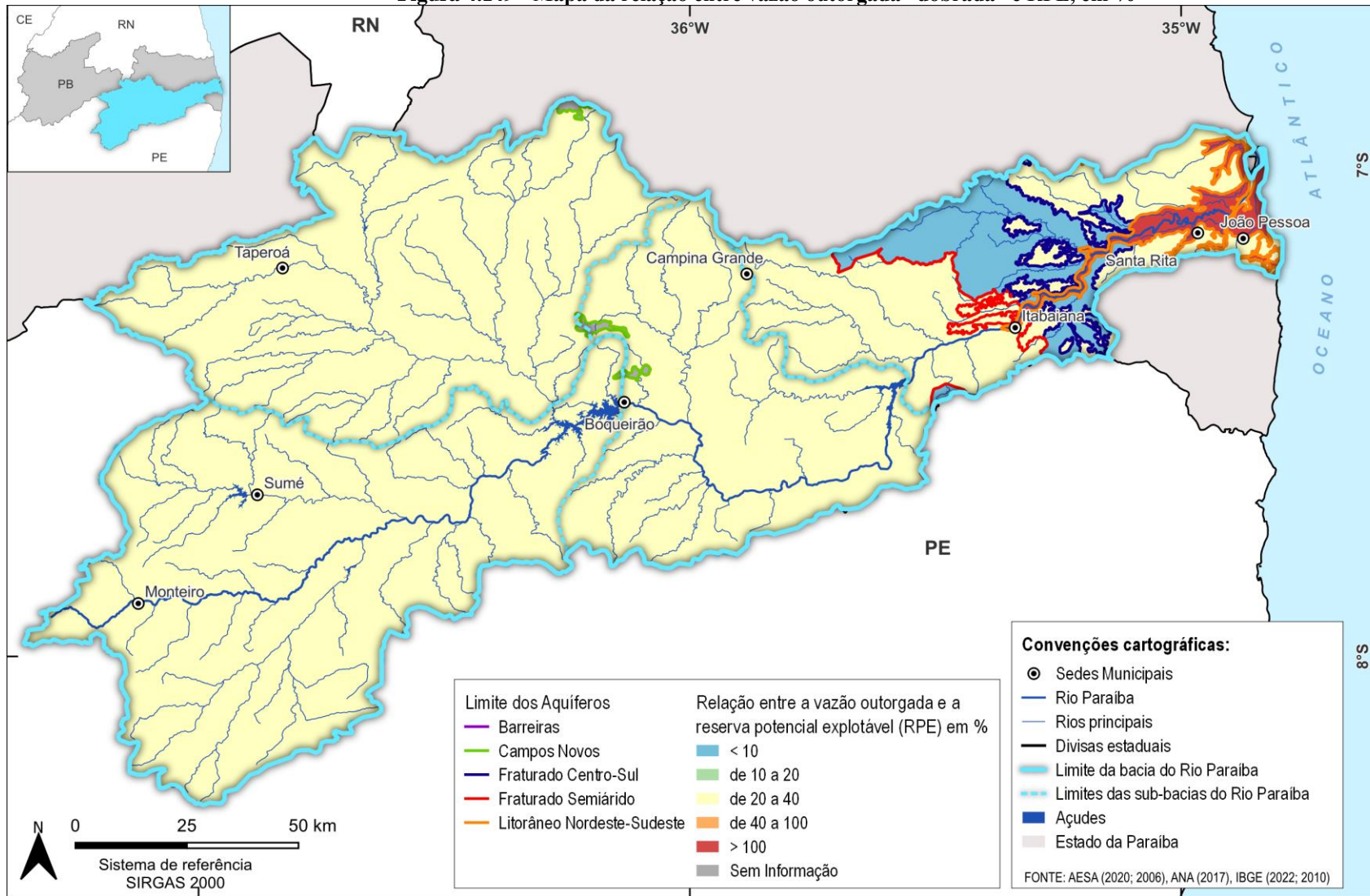
Esta “simulação” não tem o caráter de ser extremista, mas sim o de mais uma vez direcionar para a necessidade de se melhorar as ferramentas de controle e gestão dos recursos hídricos subterrâneos - ao menos na região da grande João Pessoa - estimulando que desta forma se criem ferramentas e campos adicionais das informações cruciais de controle.

Figura 4.148 - Mapa da relação entre vazão outorgada e RPE, em %



Fonte: AESA (2024), adaptado por Cobrape (2024).

Figura 4.149 - Mapa da relação entre vazão outorgada “dobrada” e RPE, em %



Fonte: Cobrape (2024).

Conforme já salientado, hipoteticamente, em se dobrando as vazões outorgadas, considerando que este número talvez representasse o cenário de fato existente com relação ao uso do recurso hídrico subterrâneo, uma grande parte da bacia já apresentaria um percentual de utilização de até 40%, e outras áreas já demonstram maior fragilidade, com demandas que ultrapassariam tal percentual.

De qualquer forma, atenção plena deveria ser dada às áreas onde este percentual de exploração ultrapassou os 100%, porque isso já representaria que se este cenário de fato for verídico, já se estaria utilizando a água subterrânea em volumes que superam a sua recarga, o que geraria no futuro os cenários de escassez e diminuição de sua qualidade já comentados.

Esta análise mais detalhada também poderá ser realizada individualmente em áreas distintas de um sistema aquífero em particular, bem como através da integração com os volumes disponíveis calculados dos recursos hídricos superficiais, quando da realização de balanços hídricos.

Além da superexploração propriamente dita, estas situações de estresse hídrico podem eventualmente ser decorrentes de ambientes geológicos e sistemas aquíferos particulares, e onde a geologia hospedeira seja relativamente homogênea, ou onde os fatores pedológicos e litológicos interfiram nos coeficientes de infiltração superficial (CI), fatores estes que podem ser futuramente melhor mapeados pelos órgãos gestores, otimizando os conhecimentos por sua vez das interações entre os meios e na sua conseqüente interferência nas disponibilidades hídricas subterrâneas.

Sugere-se que os órgãos gestores possam também focar futuramente numa análise de consistência dos bancos de dados hidrogeológicos existentes e utilizados - em especial no tocante às vazões exploradas em cada sistema aquífero em particular - de forma que o presente estudo sirva de modelo de ferramenta de gestão, principalmente através da análise da relação entre as disponibilidades calculadas para as reservas potenciais exploráveis (RPE) e as vazões outorgadas (Q_{out}), bem como na busca e identificação de poços não regularizados e/ou com outorgas não renovadas, mas eventualmente operacionais, com a concomitante consciência de que de forma alguma esta estimativa dos quantitativos dos poços não oficiais possa ser subtraída dos futuros balanços gerenciais e de planejamento.

Por fim, como já salientado, é importante frisar que as disponibilidades hídricas subterrâneas calculadas, representadas no presente estudo como sendo a RPE - reserva potencial explorável, independem do banco de dados utilizado - se SIAGAS e/ou AESA - já que estas grandezas hídricas estão vinculadas aos volumes pluviométricos que ocorrem sobre a bacia hidrográfica, e sobre as características físicas da mesma, em especial sua maior ou menor facilidade em absorver os excedentes pluviométricos (condicionado pelos coeficientes de infiltração) e em relação às vazões superficiais de referência (representadas pela $Q_{90\%}$ e $Q_{50\%}$), que podem por sua vez representar numa maior ou menor influência da descarga da reserva renovável subterrânea na rede hídrica superficial, descarga esta denominada de “escoamento básico”.

Assim sendo, as informações dos bancos de dados a serem considerados, deverão sim, serem utilizadas, mas para se estimarem os percentuais de consumo real (outorgado) ou estimado, por sobre os dados de disponibilidade da RPE.

Para além da análise da quantidade de água disponível, é necessário atentar para as questões relacionadas a qualidade das águas superficiais (Resolução CONAMA nº 357/2005) e subterrâneas (Resolução CONAMA nº 396/2008) que tem impacto direto no aproveitamento do recurso hídrico. A análise da qualidade das águas superficiais considerou as características particulares das bacias de contribuição, como o uso e ocupação do solo e número de outorgas a montante de cada ponto de monitoramento de qualidade das águas. De acordo com a resolução CONAMA nº 357/2005, os valores de IQA (Índice de Qualidade das Águas) apresentam a qualidade hidroquímica das águas superficiais sendo possível realizar uma interpolação destes valores, visando apresentar um esboço das regiões geoquímicas cujas águas têm maior ou menor potencial de consumo. Para a Bacia do Rio Paraíba, em geral, todas as sub-bacias apresentaram médias de IQA correspondentes à qualidade boa.

Ainda, quanto a qualidade das águas superficiais, o PERH-PB (2022) apresenta que mais de 80% dos reservatórios monitorados estavam classificados como hipereutróficos, de acordo com a análise do Índice de Estado Trófico. Quanto à qualidade das águas subterrâneas, cabe destacar que suas características químicas são diretamente correlacionadas às características geológicas locais, portanto, na Bacia do Rio Paraíba, devido às características geoquímicas dos sistemas aquíferos, geralmente as águas subterrâneas apresentam valores elevados de cloreto, sódio, STD e sulfato. Os ensaios microbiológicos (*Coliformes e E. coli*) podem indicar infiltração de esgoto doméstico nas águas subterrâneas. Do histórico de análises disponível, foi identificado que apenas 19% dos poços analisados nunca apresentaram contaminação das águas subterrâneas.

Por fim, é possível analisar a Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba sob uma perspectiva integrada da disponibilidade hídrica, onde os mais diversos temas sobrepostos em uma análise multicriterial permite que as sub-bacias apresentem padrões ou características homogêneas de qualidade e quantidade de água. Este sombreamento dos elementos apresentado ao longo do produto remete a uma tabela resumo, que tem como finalidade concluir as disponibilidades hídricas integradas de maneira simplificada, como um fechamento para o tema.

A Tabela 4.62 apresenta a avaliação integrada da disponibilidade hídrica por sub-bacia, onde tanto o Alto quanto o Médio Paraíba apresentaram disponibilidade hídrica quantitativa baixa, correspondente a uma região com regime pluviométrico baixo, porém, sob efeito de regularização de vazão de alguns reservatórios, principalmente o Eptácio Pessoa, que divide as sub-bacias. Já na parte subterrânea, toda a disponibilidade hídrica é muito baixa em razão do aquífero fraturado presente na região, que não possui uma boa permeabilidade. O Baixo Paraíba possui valores maiores de disponibilidade hídrica quantitativa, tanto superficial por possuir um regime de chuvas mais intenso, quanto subterrânea por conta de ter aquíferos com taxas bem maiores de permeabilidade, inclusive adentrando em uma zona de descarga.

Quanto a qualidade da água, apenas o Baixo Paraíba foi classificado como boa, pelo fato de ter uma maior vazão de diluição e as águas subterrâneas menos susceptíveis à intrusão salina. Já as outras bacias, por apresentarem baixa capacidade de diluição das águas superficiais, pouca eficiência no tratamento de esgoto e alta susceptibilidade a intrusão salina, permitindo o uso

humano, porém com certo tratamento, a disponibilidade hídrica qualitativa foi classificada como média.

Tabela 4.62 - Disponibilidade hídrica integrada (Subterrânea + Superficial)

| Sub-bacia | Quantitativa | Qualitativa |
|----------------------|---------------------|--------------------|
| Alto Paraíba | Baixa | Média |
| Médio Paraíba | Baixa | Média |
| Baixo Paraíba | Média | Boa |
| Taperoá | Muito Baixa | Média |

Fonte: Cobrape (2024).

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas. Açudes Interanuais e Estratégicos. 2018. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/sig-plano/SIGPLANO/AnalisesGerais/acudes_internauais_estrategicos_PLANO.zip>. Acesso em: 29 jan. 2024.
- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas. Análises Gerais: Situação de Estação de Tratamento. Disponível: <<http://www.aesa.pb.gov.br/sig-plano/page2.html>>. Acesso em: 11 dez. 2023.
- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas. Dados espaciais dos açudes do estado da Paraíba. Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH). Paraíba: 2006. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/sig-plano/SIGPLANO/DadosEstaduaisPB/acude_AESA.zip>. Acesso em: 8 dez. 2023.
- AESA. Agência Executiva de Gestão da Água. Fichas de Dados Básicos dos Reservatórios. 2024. Não publicado.
- AESA. Agência Executiva de Gestão da Água. Inventários dos reservatórios estratégicos desenvolvidos PERH-PB 2018. Não publicado.
- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas. Meteorologia - Chuvas: Precipitação máxima dos municípios/postos no ano de 2023. Paraíba: 2023. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/?formdate=&produto=municipio&periodo=anual>>. Acesso em: 23 jan. 2024.
- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas. Realização de Estudos Hidrogeológicos sobre as áreas de recarga no Sistema Pernambuco-Paraíba com elaboração do Mapa de Zonas de Gerenciamento e elaboração de proposta de Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas do Estado – Banco de Dados. Paraíba: 2024.
- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas. QualiÁguas. Relatórios de dados sobre a qualidade de água de reservatórios. 2020. Disponível em: <<http://siegrh.aesa.pb.gov.br:8080/aesa-relatorio/paginas/publico/dashboard.xhtml>>. Acesso em: 05 fev. 2024.
- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas. Relatório Anual de Gestão Dos Recursos Hídricos do Estado da Paraíba. Paraíba: 2022. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2023/04/Ano-2022.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2023.
- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas. Relatórios de Outorgas para Consumo Externo. S.d. Disponível em: <<http://siegrh.aesa.pb.gov.br:8080/aesa-relatorio/paginas/publico/relatorio.xhtml>>. Acesso em: 14 dez. 2023.
- AESA. Agência Executiva de Gestão da Água. Rio Paraíba. s.d. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/comite-de-bacias/rio-paraiba/>>. Acesso em: 28 nov. 2023.
- AESA. Agência Executiva de Gestão da Água. Shapefile de Barragens. 2024. Não publicado.
- ALBRECHT, K. J.; MIGLIORINI, R. B.. Metodologia aplicada na avaliação construtiva de poços tubulares profundos em Cuiabá - MT. XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. 2005. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/23212/15323/84054>>. Acesso em: 17 mai. 2024.
- ALEXANDRE, A. M. B.; FILHO, F. A. S.; CAMPOS, J. N. B.. Incorporação do Impacto da Rede de Reservatórios Superficiais Artificiais de Caráter Interanual na Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 18 n. 2 - abr./jun. 2013, 67-82. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/ri/handle/riufc/72747?locale=pt_BR>. Acesso em: 31 jan. 2024.
- ALVES, S. A. F. D. S.. Potencial para aplicação da recarga gerenciada de aquífero na bacia do Rio Gramame e parte do baixo curso do Rio Paraíba. Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/22735>>. Acesso em: 14 mai. 2024.

- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Atlas esgoto: Despoluição de bacias hidrográficas. Brasília: 2017. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1d8cea87-3d7b-49ff-86b8966d96c9eb01/attachments/Capacidade_de_Diluicao_dos_Esgotos_por_Municipio.zip>. Acesso em: 22 nov. 2023.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017 5k (BHO 2017 5k). Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/f7b1fc91-f5bc-4d0d-9f4f-f4e5061e5d8f>>. Acesso em: 7 dez. 2023.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Dados espaciais dos trechos de drenagem do Brasil. Brasília: 2017. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/files/4fd91f0d-f34f-4fca-a961-c2dcb3e0446e/geoft_bho_2017_50k_trecho_drenagem.gpkg>. Acesso em: 7 dez. 2023.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Evaporação Líquida de Reservatórios Artificiais no Brasil. Parceria: Universidade Federal do Paraná (UFPR). 2021. Disponível em: <https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/asp/download.asp?codigo=151534&tipo_midia=2&iIndexSrv=1&iUsuario=0&obra=90848&tipo=1&iBanner=0&iIdioma=0>. Acesso em: 31 jan. 2024.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Massas d'Água. 2019. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/7d054e5a-8cc9-403c-9f1a-085fd933610c>>. Acesso em: 31 jan. 2024.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil. Brasília: 2007. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes>>. Acesso em: 09 ago. 2024.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Plano Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas. 2ª edição. Brasília: 2015.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Portal Hidroweb. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). S.d. Disponível em <<https://www.snirh.gov.br/Hidroweb/apresentacao>>. Acesso em: 02 de abr. 2024.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Relatório da Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasília: 2013. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>>. Acesso em: 02 fev. 2024.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação. Anexo A. Brasília: 2007. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/cc25b76-f711-41ea-a79e-c8d30c287e53/attachments/ANEXO_A_-_Apodi,_Curimata,_Paraba.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2024.
- BARBEDO, R.; FERNANDEZ, G. M. R.; OLIVEIRA, R. C.; LAIPET, L.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Manual de aplicação BHO2MGB. HGE IPG/UFRGS. Maio de 2022. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/bho2mgb/>> Acesso em: 10 abr. 2024.
- BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Projeto de Integração do Rio São Francisco: O Projeto. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/projeto-sao-francisco/o-projeto>>. Acesso em: 20 dez. 2023.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Projeto de Integração do Rio São Francisco. Andamento das Obras, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/projeto-sao-francisco/o-projeto/andamento-das-obras>>. Acesso em: 08 mar. 2024.
- CAGEPA. Companhia de Água e Esgoto da Paraíba Apresentação. s.d.. Disponível em: <<https://www.cagepa.pb.gov.br/institucional/apresentacao/>>. Acesso em: 12 dez. 2023.
- CAGEPA. Companhia de Água e Esgotos da Paraíba. Programa Segurança Hídrica do Estado da Paraíba – PSH/PB. S.d. Disponível em: <<https://www.cagepa.pb.gov.br/programa-seguranca-hidrica-do-estado-da-paraiba-pshpb/>>. Acesso em: 19 dez. 2023.

CAGEPA. Companhia de Água e Esgotos da Paraíba. Sistema Adutor Transparaíba Ramal Cariri – Síntese da Solução Técnica. Junho de 2020. Disponível em: <<https://paraiba.pb.gov.br/diretas/secretaria-de-infraestrutura-e-dos-recursos-hidricos/arquivos/ramal-cariri/anexos-ramal-cariri-1.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2023.

CBH-PB. Comitê de Bacia do Rio Paraíba. Regimento Interno do Comitê de Bacia do Rio Paraíba do Estado da Paraíba. 2014. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2017/05/Regimento-Interno-Do-Comit%C3%AA-Da-Bacia-Hidrogr%C3%A1fica-Do-Rio-Para%C3%ADba.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2023.

CBHSF/AGB. Comitê de Bacia Hidrográfica do São Francisco - Agência Peixe Vivo. Gestão e Operação do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF). Segunda Parte - O Modelo Gestão e Operação do PISF. Outubro de 2018. Disponível em: <<https://cdn.agenciapexivivo.org.br/media/2019/07/Gest%C3%A3o-do-PISF-volume-2-1.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2024.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatórios de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo. São Paulo: 2022. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 04 mar. 2024.

CIRILO, J. A., VERÇOSA, L. F. DE M., GOMES, M. M. DE A., FEITOZA, M. A. B., FERRAZ, G. DE F., & SILVA, B. DE M. Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. RBRH, 25, e15. 2020. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbrh/a/8YwnNxmX8RWZnkYVFZLVN8y/?lang=en#>>. Acesso em: 14 mai. 2024.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 202, de 28 de junho de 2018. Estabelece diretrizes para a gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos que contemplem a articulação entre a União, os Estados e o Distrito Federal com vistas ao fortalecimento dessa gestão. 2018. Disponível em: <<https://comitebaiadeguanabara.org.br/wp-content/uploads/2022/11/Resolucao-CNRH-202-28.06.2018.pdf>>. Acesso em: 14 mai. 2024.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre, 2ª. Edição revisada e ampliada. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). 336p. 2015. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=5&LIVRO=216&TITULO=hidrologia_para_engenharia_e_ciencias_ambientais>. Acesso em: 14 mai. 2024.

COLLISCHONN, W.; GAMA, C.H.A.; SIQUEIRA, V.A; PAIXA, R.C.D.; FLEISCHMANN, A.S. Manual de Referência Teórica do MGB. HGE, IPH, UFRGS, 2020. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/mgb-4-6-2/>>. Acesso em: 22 mar. 2024

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 274, de 29 de novembro de 2000. Revoga os artigos 26 a 34 da Resolução no 20/86 (revogada pela Resolução no 357/05) e define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. 2000. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2000/res_conama_274_2000_p_arametrosambientaisqualidadedasaguas.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2024.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2005. Disponível em: <https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/legislacao/federal/resolucoes/2005_Res_CONAMA_357.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2024.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 396, de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. 2008. Disponível em: <<https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/projetos/qualidade-da-agua/legislacao/resolucoes/resolucao-conama-no-396-de-3-de-abril-de-2008/view>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas

- substâncias em decorrência de atividades antrópicas. 2009. Disponível em: <conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=601>. Acesso em: 22 mar. 2024.
- CORREIA, L. C. Análise da Produtividade de Poços Tubulares Profundos no Município de São João da Barra/RJ. *Águas Subterrâneas*, [S. l.], 2017. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28681>>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- COSTA, W. D. Avaliação de Reservas, Potencialidade e Disponibilidade de Aquíferos. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 10., 1998. São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22276>>. Acesso em: 22 mar. 2024.
- CPRM. Serviços Geológicos do Brasil. Disponível em: <<https://www.sgb.gov.br/publique/>>. Acesso em: 12 jan. 2024.
- CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)*. V. 13. Jan/Mar 2008, p.111-124. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/232847>>. Acesso em: 12 jan. 2024.
- DERISIO, J. C. Introdução ao Controle da Poluição Ambiental. 1ª Edição. ed. São Paulo: CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1992.
- DI BERNARDO, L.; MINILLO, A.; DANTAS, A.D. Florações de algas e de cianobactérias: suas influências na qualidade da água e nas tecnologias de tratamento. São Carlos: Editora LDiBe, 2010. 538p.
- DNOCS. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. Relatório. Ministério da Integração Nacional. Fortaleza: 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/dnocs/pt-br/centrais-de-conteudo/documentos/audi/auditorias-lai/relatorios-anuais-de-gestao/dnocs_relatorio_anual_2005.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2024.
- FAN, F.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB com Sistema de Informação Geográfica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)*. 2014. V.19.p243-254. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/229590/000914627.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 15 fev. 2024.
- FEITOZA, M. A. B.. Aplicação de modelo de simulação hidrológica com regionalização de parâmetros para regiões semiáridas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Núcleo de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2021. 144 f. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/40725>>. Acesso em: 14 maio 2024.
- FELIX, V.S.; PAZ, A. R.; Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Porto Alegre, v. 21, n.3, p. 556-569, jul./set. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616009>. Acesso em: 08 abr. 2024.
- FOSTER, S.;HIRATA,R. - Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Peru. 81p. 1988.
- FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D., Climatologia do Estado da ParaíbaEDUFG.Campina Grande: 2017. Disponível em: <<https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/573985/2/Climatologia%20do%20Estado%20da%20Paraiba.pdf>>. Acesso em: 01 mar. 2024.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil. PROVÍNCIAS estruturais, compartimentos de relevo, tipos de solos, regiões fitoecológicas e outras áreas. Rio de Janeiro: 2021. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101648.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2023.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Balanço Hídrico Climatológico Normal. Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária (SISDAGRO). 2024. Disponível em:

- <<https://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/climatologiaProdutos;jsessionid=6f10def4e9a3a54e66d4ac320fc5>>. Acesso em: 13 mai. 2024.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. Normal Climatológica do Brasil 1961-1990. Brasília - DF, 1992. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/servicos/normais-climatol%C3%B3gicas>>. Acesso em: 13 mai. 2024.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. Normal Climatológica do Brasil 1981-2010. Brasília - DF, 2018. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/servicos/normais-climatol%C3%B3gicas>>. Acesso em: 13 mai. 2024.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Planilhas de dados de estações convencionais e automáticas do Estado da Paraíba. 2023. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/#>>. Acesso em: 05 dez. 2023.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Dados hipsométricos da região da Bacia do Rio Paraíba. Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA). São José dos Campos: 2011. Disponível em: <<https://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>>. Acesso em: 19 set. 2023.
- LAMPARELLI, M. C. Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. São Paulo: 2004. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41134/tde-20032006-075813/pt-br.php>>. Acesso em: 04 mar. 2024.
- LANNA, A. E.; SCHWARZBACH, M. MODHAC: Modelo Hidrológico Auto-Calibrável. Recursos Hídricos, Publicação, v. 21, 1989.
- LIMA, G. D.; LIMA, T. B. R.; SOARES, N. S.; ARAÚJO, J. C. Modelling intermittence and river flow in the semi-arid region of Brazil: The Umbuzeiro River, Ceará. Revista Ciência Agronômica, v. 53, e20218162, 2022. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rca/a/CMYTXyJvxYFncTPJvWHgDL/>>. Acesso em: 04 mar. 2024.
- LOPES, J. C.; BRAGA, Jr. B. F.; CONEJO, J. L. . Simulação Hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado. Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 1981. V. 2, pp. 42-62.
- MACHADO R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese de doutorado de agronomia. Área de concentração: irrigação e drenagem. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. São Paulo: 2002. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-10072002-161200/publico/ronalton.pdf>>. Acesso em: 04 mar. 2024.
- MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas. Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. Brasil: 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR>. Acesso em: 24 nov. 2023.
- MARENCO, J; CUNHA, A. P. e ALVES, L. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. Climanalise. 04. 49-54. 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/311058940_A_seca_de_2012-15_no_semiarido_do_Nordeste_do_Brasil_no_contexto_historico>. Acesso em: 24 nov. 2023.
- MCCOY, J.; JOHNSTON, K. Using ArcGis Spatial Analyst. New York - NY:ESRI, 2002. 232 p. Disponível em: <<https://archive.org/details/usingarcgisspati0000mcco>>. Acesso em: 24 nov. 2023.
- MEDEIROS, A. M. T.; BRITO, A. C. A seca no Estado da Paraíba - Impactos e ações de resiliência. Parc. Estrat. Brasília-DF. v. 22, n. 44, p. 139-154. jan-jun, 2017. Disponível em: <https://seer.cgee.org.br/parcerias_estrategicas/article/view/849>. Acesso em: 24 nov. 2023.
- MORAD, M.; PÉREZ, A. T. Sistemas de información geográfica y modelizaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, ISSN 0212-9426, ISSN-e 2605-3322, N°. 31, 2001, págs. 23-46. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1122528>>. Acesso em: 24 nov. 2023.
- MS. Ministério da Saúde. Portaria nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. 2017. Disponível em:

<http://www.portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria_Consolidacao_5_28_SETEMBRO_2017.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2023.

MS. Ministério da Saúde. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. 2004. Disponível em: <https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2004/prt0518_25_03_2004.html>. Acesso em: 24 nov. 2023.

NEGREIROS, B. M. F.; MEDEIROS, J. C. F. Aplicação do Modelo Hidrológico MGB-IPH na Bacia Hidrográfica do Rio Seridó. In: Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis: 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/40646>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

PARAÍBA. Decreto Estadual nº 19.260, de 31 de outubro de 1997. Regulamenta a outorga do direito de uso dos recursos hídricos e dá outras providências. João Pessoa: 1997. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2016/11/DECRETO_14.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2023.

PARAÍBA. História da Paraíba. Disponível em: https://www.pm.pb.gov.br/arquivos/Historia_da_Paraiba.pdf. Acesso em: 05 jan. 2024.

PARAÍBA. Lei Estadual nº 9.260, de 25 de novembro de 2010. Institui princípios e estabelece diretrizes da política estadual de saneamento básico, autoriza e disciplina a gestão associada de serviços públicos de saneamento básico, estabelece os direitos e deveres dos usuários dos serviços de saneamento básico e dos seus prestadores, e dá outras providências. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=146146>>. Acesso em: 20 dez. 2023.

PARAÍBA. Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba, João Pessoa: 2022. Disponível em: <[aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2022/06/perh_final/RF-01/RF-01_PERH-PB.pdf](https://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2022/06/perh_final/RF-01/RF-01_PERH-PB.pdf)>. Acesso em: 20 dez. 2023.

PARAÍBA. Resolução nº 02, de 05 de novembro de 2003. Estabelece a Divisão Hidrográfica do Estado. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2018/02/Resolu%C3%A7%C3%A3o-n%C2%BA-2-de-05-de-Novembro-de-2003-CERH.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2023.

RAMPINELLI, C.; COSTA, M.. Calibração do modelo chuva-vazão smap em uma estação do semiárido nordestino com os algoritmos pso ag e nelder mead e seus efeitos na definição das séries de vazões médias mensais. In: 21st Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Cassio-Rampinelli-2/publication/314299601_Calibracao_do_Modelo_Chuva-Vazao_SMAP_em_uma_Estacao_do_Semiarido_Nordestino_com_os_Algoritmos_PSO_AG_e_Nelder_Mead_e_seus_Efeitos_na_Definicao_das_Series_de_Vazoes_Medias_Mensais_Calibration_of_The_S/links/58c0272aa6fdcca74cff0b70/Calibracao-do-Modelo-Chuva-Vazao-SMAP-em-uma-Estacao-do-Semiarido-Nordestino-com-os-Algoritmos-PSO-AG-e-Nelder-Mead-e-seus-Efeitos-na-Definicao-das-Series-de-Vazoes-Medias-Mensais-Calibration-of-The.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2024.

SANTOS, B. V. C. D. dos; FONTES, A. S. Modelagem Hidrológica de Sistema Hídrico Complexo do Semiárido Baiano. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA), v.2, n. 1 - p.152-162, 2014 - ISSN: 2317-563X. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/294734320_MODELAGEM_HIDROLOGICA_DE_SISTEMA_HIDRICO_COMPLEXO_DO_SEMIARIDO_O_BAIANO>. Acesso em: 14 mai. 2024.

SANTOS, S.; MONTEIRO, A.; MOURATO, S.; FERNANDEZ, P. Os sistemas de informação geográfica na modelagem hidrológica. XII Congresso Nacional de Tecnologias de La Información Geográfica. Granada, 2006 “El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas” p 465-479.

SILANS, A. M. B. P., ALMEIDA, C. N., ALBUQUERQUE, D. J. S., & PAIVA, A. E. D. B. Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia hidrográfica do rio do PEIXE-Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 5-19, 2000. Disponível em:

- <https://abrh.s3.saeast1.amazonaws.com/Sumarios/44/6f185875495f46381a51346a928e2ca8_ab199d38d643584467e1a06e0ec56583.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; Simulação da bacia do Rio São Francisco através do modelo hidrológico MGB-IPH, 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Walter-Collischonn-2/publication/239551794_SIMULACAO_DA_BACIA_DO_RIO_SAO_FRANCISCO_ATRAVES_DO_MODELO_HIDROLOGICO_MGB-IPH/links/0c9605314ceca226cb00000/SIMULACAO-DA-BACIA-DO-RIO-SAO-FRANCISCO-ATRAVES-DO-MODELO-HIDROLOGICO-MGB-IPH.pdf>. Acesso em: 26 de mar. 2024.
- SILVA, D. S.; MEDEIROS, J. D. F. Aplicação do modelo hidrológicos MGP-IPH na bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu. XIV Simpósio de Recurso Hídricos do Nordeste. Maceió: 2018. Disponível em: <<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/81/10695.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2024.
- SILVA, G. N. S. D. Regionalização automatizada de parâmetros de modelos chuva-vazão integrada a um sistema de informações geográficas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/handle/tede/5466>>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- SNIRH. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Banco de dados do Portal Hidroweb. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 05 dez. 2023.
- SOARES, P. F. Projeto e Avaliação de Desempenho de Redes de Monitoramento de Qualidade da Água Utilizando o Conceito de Entropia. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Paulo: 2001. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-18032002-121042/publico/tde.pdf>>. Acesso em: 05 dez. 2023.
- SOUSA, D. S. D.. Impactos da mudança na temperatura e precipitação sobre a resposta hidrológica de uma bacia do semiárido. Orientadora: Joana Darc Freire de Medeiros 2022. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/50037>>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- SOUSA, F. R. C. de, COSTA, L. H. M.; PAULA, D. P. de. Modelagem hidrológica chuva-vazão aplicada ao estudo de chuvas intensas na bacia hidrográfica Semiárida do Rio Pesqueiro (Ceará - Brasil). In: XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada / I Congresso Nacional de Geografia. Campinas, SP. 2017. DOI - 10.20396/sbgfa.v1i2017.2189 - ISBN 978-85-85369-16-3. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/323434809_Modelagem_hidrologica_chuva-vazao_aplicada_ao_estudo_de_chuvas_intensas_na_bacia_hidrografica_Semiarida_do_Rio_Pesqueiro_Ceara_-_Brasil>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- SRHU/MMA. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano do Ministério do Meio Ambiente. Documento base – Programa Água Doce. 2010. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2016/11/doc_PAD_01.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2023.
- SUDEMA. Superintendência de Administração do Meio Ambiente. Nota de Esclarecimento. João Pessoa: 2020. Disponível em: <<https://sudema.pb.gov.br/noticias/nota-de-esclarecimento>>. Acesso em: 11 dez. 2023.
- TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). 2ª edição - Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 678p. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=4&LIVRO=124&TITULO=modelos_hidrológicos>. Acesso em: 11 dez. 2023.
- VIDAL, C. L. R.; MEDEIROS, R. B.. Influência do perfil construtivo na produtividade de poços d'água - Uma experiência de campo. XII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. 2001. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24481/16441>>. Acesso em: 17 mai. 2024.

- VIRÃES, M. V.. Regionalização de parâmetros de modelo hidrológico para a região semiárida do nordeste brasileiro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2018. 293 f. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/30589>>. Acesso em: 14 mai 2024.
- VIRÃES, M.V.; CIRILO, J. A. Regionalização de parâmetros de modelo hidrológico para a região semiárida do nordeste brasileiro. RBRH, v. 24, p. e49, 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbrh/a/kkTNTn585LdhDprDTZzKyK/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 14 mai 2024.
- VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: 1996. Universidade Federal de Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Disponível em: <<https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=4729135&forceview=1>>. Acesso em: 09 ago. 2024.
- WMO. World Meteorological Organization. Methods of observation. In: Guide to Hydrological Practices: hydrology from measurement to hydrological information. WMO-No. 168. Genebra, Suíça. 2008. Updated in 2020. Disponível em: < https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/monitoramento-hidrologico/orientacoes-manuais/entidades/hydrology-2013-from-measurement-to_2020.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2024.
- ZANI, M. A. Entre sinais e incertezas: a espera pelas chuvas em 7 anos de seca no Cariri Paraibano. Novos Cadernos NAEA, [S.l.], v. 26, n. 1, abr. 2023. ISSN 2179-7536. Disponível em: <<https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/11107>>. Acesso em: 27 mai. 2024.



GOVERNO DA PARAÍBA

SECRETARIA DE ESTADO DA INFRAESTRUTURA E DOS RECURSOS HÍDRICOS



BANCO MUNDIAL
BIRF - AIF | GRUPO BANCO MUNDIAL



PSH-PB
PROJETO DE SEGURANÇA HÍDRICA DA PARAÍBA



AESA

