



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Oceanografia

Sálua Cristina Saldanha Cezar Guimarães da Silva

**Impactos das barragens sobre os parâmetros hidrológicos e a morfologia do canal do Rio Paraíba do Sul**

Rio de Janeiro

2019

Sálua Cristina Saldanha Cezar Guimarães da Silva

**Impactos das barragens sobre os parâmetros hidrológicos e a morfologia do canal do  
Rio Paraíba do Sul**

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Caracterização, diagnóstico e evolução de ambientes marinhos

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Josefa Varela Guerra

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

S586 Silva, Sálua Cristina Saldanha Cezar Guimarães da.  
Impactos das barragens sobre os parâmetros hidrológicos e a morfologia do canal do Rio Paraíba do Sul / Sálua Cristina Saldanha Cezar Guimarães da Silva. – 2019.  
366 f. : il.

Orientador: Josefa Varela Guerra.  
Tese (Doutorado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Oceanografia.

1. Oceanografia –Morfologia Fluvial - Paraíba do Sul, Rio, Bacia – Teses. 2. Bacias sedimentares – Paraíba do Sul, Rio, Bacia –Teses. 3. Recursos naturais – Conservação – Paraíba do Sul, Rio, Bacia –Teses. 4. Barragens – Plumas fluviais – Paraíba do Sul, Rio, Bacia –Teses. 5. Fotografias aéreas – Paraíba do Sul, Rio, Bacia –Teses. I. Guerra, Josefa Varela. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Oceanografia. III. Título.

CDU 551.46(815.3)

Bibliotecária responsável: Fernanda Lobo / CRB-7:5265

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Sálua Cristina Saldanha Cezar Guimarães da Silva

**Impactos das barragens sobre os parâmetros hidrológicos e a morfologia do canal do Rio Paraíba do Sul**

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Caracterização, diagnóstico e evolução de ambientes marinhos

Aprovada em 25 de abril de 2019.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Josefa Varela Guerra  
Faculdade de Oceanografia - UERJ

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Antonio Tadeu dos Reis  
Faculdade de Oceanografia - UERJ

---

Prof. Dr. Eduardo Negri de Oliveira  
Faculdade de Oceanografia - UERJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Carla Bernadete Madureira Cruz  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Prof. Dr.<sup>a</sup> Cleverson Guizan Silva  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Susana Beatriz Vinzon  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2019

## DEDICATÓRIA

Aos três grandes mestres de minha vida acadêmica e profissional, que mudaram também minha vida pessoal:

Luiz Carlos Ferreira da Silva, que, ao nos perguntar, jovens calouros, o que esperávamos da Oceanografia da UERJ, nos mostrou que não se pode mudar a direção do vento, mas é possível ajustar as velas para tornar a viagem possível. Com ele, acertamos o rumo, enfrentamos algumas calmarias e muitas tempestades, mas nenhuma delas forte o suficiente para nos fazer pular do barco e desistir de nossos sonhos. Sou oceanógrafa porque você não desistiu de nós. Privilegiada por ter sido sua aluna.

Luís Henrique Aguiar de Azevedo (*in memoriam*), que me apresentou a beleza e o potencial do sensoriamento remoto em encontros prazerosos, que deveriam ter sido aulas, mas acabaram se tornando “cafés da tarde entre imagens Landsat” que ampliaram meu espectro de possibilidades profissionais e me deram um novo olhar sobre a vida, o universo e tudo mais.

A Marco Antônio de Oliveira, meu primeiro chefe no IBGE que, ao mesmo tempo em que aprendia, pacientemente me ensinava a manipular o computador para, assim, compartilhar comigo a autoria dos primeiros mapas do IBGE totalmente digitais, elaborados a partir de imagens de satélite: Campina Grande e Limoeiro do Norte, obras-primas de um mestre em interpretação de imagens que se desviava dos holofotes.

A esses grandes homens, que em vários momentos de suas atribuladas vidas me concederam um espaço para estar por perto, e, com isso, mudaram minha vida profissional, incentivaram meu amor pela ciência e, principalmente, me deram (e continuam dando) inspiração para enfrentar a batalha diária de tentar ser plenamente humana.

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, à Josefa Varela Guerra, minha orientadora, amiga e primeira a embarcar comigo nesta jornada ao aceitar o desafio de se embrenhar pelas águas doces do meu querido Paraíba do Sul.

À Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), minha segunda casa, cujos professores e funcionários me acolheram desde que eu era uma menina do interior sonhando em estudar o mar. Pelos anos em que praticamente vivi em suas salas, laboratórios e corredores, pelas oportunidades de estágios, de cursar o mestrado e, agora, o doutorado. Pelo carinho especial da equipe da Oceanografia (Luiz Carlos, Josefa, Tadeu, Hélio, Eduardo Negri, Alexandre Fernandes, Gleyci, Mário, Silvia e tantos outros, meus professores; Vanessa, Cássia e Letícia, que dividiram salas de aula comigo e agora fazem parte do corpo docente; e à querida D. Marli e ao André, da Secretaria, ambos sempre tão gentis comigo), muito obrigada pelas lições de oceanografia e pelo convívio durante esses anos maravilhosos.

Ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), extensão também de minha casa, que desde 1997 me dá condições para continuar aprendendo e, simultaneamente, manter e educar minhas filhas no caminho da ciência. Obrigada ao amigo Marco Antônio de Oliveira, meu primeiro chefe, que me mostrou, há mais de vinte anos, as fotografias aéreas das décadas de 1950/60 utilizadas neste trabalho. Agradeço a cessão desse material ao IBGE, sem o qual não teria sido possível descobrir como era a morfologia pretérita do Paraíba do Sul, antes do advento das barragens.

Muitíssimo obrigada a José Maurício Leandro da Silva, da Mapoteca do IBGE, que pacientemente me ajudou a encontrar todas as fotos necessárias para compor o sistema fluvial do Rio Paraíba do Sul. Seu trabalho de guardião e organizador dessas relíquias deveria ser o mais valorizado de nossa Instituição, pois protege a memória de nossos levantamentos e, com isso, nossa história. Desculpe pela perturbação, e obrigada por toda sua atenção e ajuda.

Ao Vitor Oliveira França, do IBGE, que me ajudou muito na identificação e aquisição das fotografias aéreas ortorretificadas.

Aos queridos professores Carla Bernadete Madureira Cruz e Antonio Tadeus dos R que acompanharam todas as etapas de desenvolvimento deste trabalho, e deram sugestões valiosas.

À D. Odília, minha sogra e mãe, pela acolhida todas as vezes que precisei ir a Anta fazer minhas amostragens. Com seu carinho e seus biscoitinhos o trabalho de campo ficou

ainda mais gostoso, deixando uma saudade quando terminou...Ao Allan, meu cunhado, por ter me emprestado seu carro algumas vezes para coletar as amostras em Anta.

Aos amigos ibegeanos Eutamar Amorim da Costa e Dalvan Francisco de Souza, por me acompanharem em uma das coletas de água na barragem de Anta (mesmo quase sem gasolina!), só para eu não quebrar a sequência de amostragens.

Ao Secretário do Meio Ambiente de Sapucaia (RJ), Sr. Jorge Luiz Gonçalves da Silva, que gentilmente intermediou junto à Eletrobrás/Furnas, em 2016, minha visita à Pequena Central Hidrelétrica de Anta e à Usina Hidrelétrica de Simplício, e me mostrou o funcionamento das Estações de Tratamento de Esgoto de Anta e Sapucaia e do Aterro Sanitário de Sapucaia.

A Rosilene (Kita) e ao Cabinho, meus queridos amigos de Sapucaia, que me colocaram em contato com o Secretário do Meio Ambiente e me passaram muitas informações sobre as obras da usina de Anta.

À equipe de Comunicação Social do Aproveitamento Hidrelétrico de Simplício, que planejaram minha visita às usinas do complexo e esclareceram minhas dúvidas.

À Sra. Andreлина, da Agência Nacional de Águas (ANA), que prontamente me cedeu os dados hidrológicos que precisava e que ainda não estavam disponibilizados na página institucional da agência.

À Tatiana Dadalto (Tati), que pacientemente me ensinou a realizar a filtração das amostras de água. Ao Moisés e ao Leandro, que me auxiliaram em alguns momentos no laboratório de Oceanografia Geológica.

Ao professor Eduardo Negri, que me apresentou ao Python (Hello World!) e, assim, mostrou que programar, além de útil, pode ser prazeroso, facilitando muito minha pesquisa.

Ao professor (e sempre ibegeano), Cláudio João Barreto dos Santos, com quem adorei fazer meu estágio à docência.

À querida Lucy Mary Soares Souza, minha amiga e companheira de setor no IBGE. Pelo incentivo constante, pela leveza como conduz a vida e vem me contagiando ao longo de tantos momentos difíceis nesses últimos anos...

À minha amiga Sylvania Oliveira Fróes (D. Joaquina), pela força, carinho e incentivo.

À minha amada Vó Mida (*in memoriam*), que acompanhou toda minha vida acadêmica, vibrando a cada pequena vitória e me levantando a cada tropeço, minha eterna gratidão. Minha tão sábia avó, que partiu no meio deste projeto e da qual ainda não consegui me despedir; que algumas vezes precisou fugir das águas do córrego Purys, que, alimentadas pelas enchentes do Paraíba, inundavam seu quintal. O abandono do barco de madeira, num

canto do seu porão, foi o primeiro sinal que tive, quando ainda menina, de que algo diferente vinha acontecendo com o nosso rio. Este trabalho é uma tentativa de responder por que as águas deixaram de invadir seu quintal. Pena que não deu tempo de te dizer ou de você ler...

Às minhas queridas irmãs, Alessandra, Giselle e Érika, e aos meus sobrinhos Mayara, Victor e Elmo, que amo e admiro pela força e coragem. Minha eterna gratidão por terem ficado ao lado de nossas mães (Edla e Naná) e nossas avós (Mida e Lourdes) quando elas mais precisaram e eu não pude estar.

Às minhas mães, que amo tanto: Edla, que me educou para ser forte e independente (e que eu ainda estou aprendendo), e Naná, que me mostrou, com seu exemplo, que além de força e independência, na vida são necessários amor e empatia.

Ao meu Vô Mário (*in memoriam*) e ao tio Elmo, dois pais maravilhosos que preencheram a minha vida com amor e muitos risos.

Finalmente, às minhas filhas, Sâmia e Inah, e ao meu marido Silas, pelo apoio do início ao fim deste projeto. Talvez por serem da área das ciências, compreenderam as horas de ausência e silêncio necessários aos quatro anos de doutorado e, ainda, aceitaram ser minhas cobaias na discussão de ideias e no compartilhamento de minhas descobertas. À Sâmia, em especial, pelo capricho com que digitalmente ilustrou as minhas ideias e resultados, enriquecendo e colorindo meu trabalho, como vem fazendo com minha vida. À Inah, minha estrela da sorte desde que veio ao mundo, que tornou algumas de minhas coletas em Anta e aquela lá da foz, mais felizes. Ao Silas (meu Soul), que capitaneia comigo nosso barco, sempre incansável, me acompanhando em todas as viagens, sob sol e chuva, e se adaptando às mudanças necessárias para que este trabalho acontecesse. Sem vocês três eu não teria sobrevivido até aqui, nem este trabalho teria saído do campo das ideias. *Cousteau*, mas terminou!! E ele é nosso.

A todos vocês (e a quem de alguma maneira contribuiu com esse trabalho, mas foi traído por minha memória), meus sinceros agradecimentos.



*Ubi dubium ibi libertas.* (Onde há dúvida, há liberdade).

*Provérbio latino*

... queria subir o rio até a nascente. Ele desejava decifrar os primórdios da água, ali onde a gota engravida e começa o missanguear do rio.

*Mia Couto*

Nós vamos morrer, e isso nos torna afortunados. A maioria das pessoas nunca vai morrer, porque nunca vai nascer. As pessoas potenciais que poderiam estar no meu lugar, mas que jamais verão a luz o dia, são mais numerosas que os grãos de areia da Arábia. Certamente esses fantasmas não nascidos incluem poetas maiores que Keats, cientistas maiores que Newton. Sabemos disso porque o conjunto das pessoas possíveis permitidas pelo nosso DNA excede em muito o conjunto de pessoas reais. Apesar dessas probabilidades assombrosas, somos eu e você, com toda a nossa banalidade, que aqui estamos...

Nós, uns poucos privilegiados que ganharam na loteria do nascimento, contrariando todas as probabilidades, como nos atrevemos a choramingar por causa do retorno inevitável àquele estado anterior, do qual a enorme maioria jamais nem saiu?

*Richard Dawkins*

## RESUMO

SILVA, Sálua Cristina Saldanha Cezar Guimarães da. *Impactos das barragens sobre os parâmetros hidrológicos e a morfologia do canal do Rio Paraíba do Sul*. 2019. 366 f. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Há séculos submetido a interferências antrópicas, o Rio Paraíba do Sul começou, a partir de meados do século XX, a sofrer também os impactos da instalação de uma série de barragens em seu canal fluvial. Juntas, essas interferências vêm alterando seus parâmetros hidrológicos e morfológicos há décadas e, graças a sua extensão de mais de 1100 km, os estudos existentes se concentram em pequenos trechos do rio. A proposta deste trabalho consistiu na avaliação dos impactos das barragens sobre os sinais vitais (paisagem, parâmetros hidrosedimentológicos e morfológicos) de todo o seu sistema fluvial. A análise das séries hidrológicas do Paraíba do Sul mostrou que suas vazões/cotas vêm apresentando comportamento decrescente, apesar da tendência positiva das séries pluviométricas das últimas décadas. As séries de concentração de material particulado em suspensão também mostraram comportamento negativo ao longo das décadas analisadas, provavelmente graças à retenção de sedimentos nos grandes reservatórios das barragens e à regularização de fluxo realizada por essas estruturas que, ao diminuírem a frequência dos picos de vazão, impactam o volume de sedimentos transportados rio abaixo. Amostragens mensais de água superficial para determinação de concentração de material particulado em suspensão durante dois anos, em um ponto a montante e outro a jusante de uma das barragens com reservatório do Rio Paraíba do Sul, corroboraram essa hipótese. Por meio de fotografias aéreas das décadas de 1950/60 (anteriores à instalação de algumas barragens) e de 2004 a 2006 (posteriores à maioria das barragens existentes), foi possível quantificar as mudanças na sua morfologia de vista em planta. Dentre as alterações identificadas, a mais significativa foi a diminuição da largura média do canal fluvial, com maiores percentuais nos trechos imediatamente a jusante das barragens com reservatório. Para avaliar o quanto as barragens afetaram a morfologia longitudinal do canal foram comparados perfis de declividade x extensão construídos a partir de cartas topográficas elaboradas antes da instalação de algumas barragens com perfis relativamente mais recentes, gerados a partir de modelos digitais de elevação elaborados após a instalação das mesmas. O surgimento de *knickpoints* artificiais nos locais onde foram construídas duas grandes barragens com reservatório mostrou que essas obras contribuíram com o desequilíbrio da morfologia longitudinal. O cálculo de alguns parâmetros extraídos dos perfis transversais de trechos a montante e a jusante de barragens possibilitou verificar o quanto a regularização que essas obras exercem sobre o fluxo fluvial afetou a variabilidade natural desses parâmetros. Complementando a investigação sobre o Paraíba do Sul, um estudo de caso na foz para estimar o material particulado em suspensão do trecho final do canal e de sua pluma sedimentar costeira, em épocas anteriores e posteriores à instalação de sua mais recente barragem, confirmou o impacto dessa obra sobre a quantidade de sedimentos que chega à porção mais distal do canal fluvial antes de, finalmente, se dispersar nas águas do Atlântico.

Palavras-chave: Rio Paraíba do Sul. Morfologia fluvial. Parâmetros hidrológicos e sedimentológicos. Impactos de barragens. Fotografias aéreas. Pluma costeira.

## ABSTRACT

SILVA, Sálua Cristina Saldanha Cezar Guimarães da. *Dam impacts on Paraíba do Sul River hydrologic parameters and channel morphology*. 2019. 366 f. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

For centuries undergoing anthropic activities, the Paraíba do Sul River has been impacted by the installation of several dams in its channel since the middle of the last century. Together, these activities have been changing its hydrological and morphological parameters for decades but, due to its extension of more than 1,100 km, the existing studies focus only on small reaches of the river. This work's proposal was the evaluation of dam impacts on the entire fluvial system vital signs (landscape, hydrosedimentological and morphological parameters). The hydrological series analysis showed decreasing behavior after the beginning of reservoir dams operations in spite of the positive trend observed in the pluviometric series of the same period. The total suspended solids concentration series also showed negative behavior, probably due to sediment trapping in large dam reservoirs and to regulation, which decreases the frequency of flow peaks and, consequently, the volume of sediments transported downstream. Monthly surface water samplings to determine the total suspended solids concentration were carried out at an upstream and a downstream point of one of the Paraíba do Sul reservoir dams' and the results corroborated this hypothesis. Using 1965-1966 and 2004-2006 aerial photographs (prior and after the existing dams, respectively) it was possible to evaluate the river's plan view morphological changes. There was a significant decrease in the channel mean width, with the highest percentages observed in the segments immediately after dams, as a consequence of upstream water retention. To evaluate how dams affected the channel longitudinal morphology, slope x distance profiles, constructed from topographic maps elaborated prior to some dam's installation were compared with recent profiles, built from digital elevation models. The emergence of artificial knickpoints in the reaches where two large dams with reservoirs were built showed that these ventures contributed to the evolution of the longitudinal morphology misalignment. The calculation of some parameters extracted from fluvial cross-sectional profiles allowed the verification of how much flow regularization performed by dams affected the expected natural variability of these parameters. Complementing the investigation about the Paraíba do Sul River, a case study at its mouth to estimate the total suspended solids in the final portion of the channel and in the coastal sedimentary plume, in years prior and after the installation of its most recent dam with reservoir, confirmed this construction's impact on the amount of sediments that reaches the channel final stretch before its dispersion into the Atlantic waters.

Keywords: Paraíba do Sul River. Fluvial morphology. Hydrological and sedimentological parameters. Dams impacts. Aerial photographs. Coastal plume.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Localização da Bacia do Rio Paraíba do Sul.....	33
Figura 2 –	Localização do AHE de Simplício.....	37
Figura 3 –	Limites da BRPS.....	38
Figura 4 –	Principais municípios da Região Sudeste integrantes da BRPS.....	40
Figura 5 –	RPS e seus principais afluentes. ....	41
Figura 6 –	Unidades de Conservação da região da BRPS.....	43
Figura 7 –	Classificação do RPS na qual seu curso fluvial foi subdividido em quatro trechos, segundo suas características físicas.....	44
Figura 8 –	Perfil longitudinal aproximado do RPS onde seu curso fluvial foi subdividido em quatro trechos, segundo suas características físicas.....	45
Figura 9 –	Principais domínios geomorfológicos da BRPS.....	48
Figura 10 –	Tipos de clima presentes na Bacia do RPS.....	49
Figura 11 –	Precipitação média do mês de janeiro na BRPS.....	50
Figura 12 –	Precipitação média do mês de julho na BRPS.....	51
Figura 13 –	Precipitação média anual da BRPS.....	52
Figura 14 –	Domínios de vegetação da BRPS.....	55
Figura 15 –	Cobertura e uso do solo da BRPS.....	56
Figura 16 –	Mapa de susceptibilidade à erosão da BRPS.....	58
Figura 17 –	Escada de peixes da barragem de Anta, AHE de Simplício.....	62
Figura 18 –	Empreendimentos hidrelétricos e reservatórios do Sistema Light.....	69
Figura 19 –	Esquema hidráulico de geração de energia elétrica e transposição do RPS.....	70

Figura 20 –	Localização das barragens instaladas no canal do RPS.....	79
Figura 21 –	Esquema de classificação de canais fluviais de Schumm (1981).....	81
Figura 22 –	Esquema de classificação de canais fluviais de Church (1992).....	83
Figura 23 –	Localização das estações fluviométricas e pluviométricas utilizadas neste trabalho.....	90
Figura 24 –	Localização dos pontos de coleta de água para determinação da concentração de MPS no entorno da barragem de Anta.....	93
Figura 25 –	Data dos voos para tomada das fotografias aéreas das décadas de 1950/60, organizadas por blocos segundo o recorte da folha topográfica escala 1:50.000 do IBGE.....	102
Figura 26 –	Data dos voos para tomada das fotografias aéreas de 2004-2006 (projetos SP-25 e RJ-25), organizadas por blocos segundo o recorte da folha topográfica escala 1:50.000 do IBGE.....	103
Figura 27 –	Localização das fotografias aéreas das décadas de 1950/60 geometricamente corrigidas. ....	105
Figura 28 –	Série temporal de precipitação da estação São Luís do Paraitinga .....	120
Figura 29 –	Série temporal de precipitação da estação Santa Branca .....	120
Figura 30 –	Correlogramas das séries temporais de chuvas totais mensais das estações São Luís do Paraitinga e Santa Branca.....	121
Figura 31 –	Série temporal da vazão média mensal da estação Estrada do Cunha.....	122
Figura 32 –	Série temporal de vazão média mensal da estação Santa Branca.....	124
Figura 33 –	Correlogramas das séries temporais de vazão média mensal durante o pico de vazão (dezembro a fevereiro) para as estações Estrada do Cunha e Santa Branca.....	124
Figura 34 –	Série temporal de concentração de MPS e vazão média mensal da estação Santa Branca.....	126
Figura 35 –	Correlograma da série temporal de concentração de MPS da estação Santa Branca.....	127

Figura 36 – Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso superior do RPS a partir de fotografias aéreas do IBGE (1965-1966).....	129
Figura 37 – Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso superior do RPS a partir de fotografias aéreas do IBGE (2004).....	130
Figura 38 – Área 1 do curso superior.....	132
Figura 39 – Área 2 do curso superior.....	132
Figura 40 – Área 3 do curso superior.....	133
Figura 41 – Área 4 do curso superior.....	133
Figura 42 – Área 7 do curso superior.....	135
Figura 43 – Área 8 do curso superior.....	135
Figura 44 – Área 13 do curso superior.....	136
Figura 45 – Área 14 do curso superior.....	136
Figura 46 – Área 15 do curso superior.....	138
Figura 47 – Área 16 do curso superior.....	138
Figura 48 – Área 17 do curso superior (reservatório Paraibuna).....	139
Figura 49 – Área 18 do curso superior (reservatório Santa Branca).....	139
Figura 50 – Área 19 do curso superior .....	140
Figura 51 – Área 20 do curso superior.....	140
Figura 52 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Estrada do Cunha.....	142
Figura 53 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Santa Branca.....	143
Figura 54 – Perfis longitudinais do curso superior do RPS.....	146
Figura 55 – Série temporal de precipitação da estação São José dos Campos.....	152
Figura 56 – Série temporal de precipitação da estação Pindamonhangaba.....	152
Figura 57 – Série temporal de precipitação da estação Guaratinguetá.....	153

Figura 58 – Correlogramas das séries temporais de chuvas totais mensais das estações São José dos Campos, Pindamonhangaba e Guaratinguetá.....	153
Figura 59 – Série temporal de cotas médias mensais da estação Pindamonhangaba.....	155
Figura 60 – Série temporal de cotas médias mensais da estação Guaratinguetá.....	155
Figura 61 – Correlogramas das séries temporais de cotas médias mensais dos meses de pico (dezembro a fevereiro) para as estações Pindamonhangaba e Guaratinguetá.....	157
Figura 62 – Série temporal de concentração de MPS e cotas médias mensais da estação Pindamonhangaba.....	159
Figura 63 – Correlograma da série temporal de concentração de MPS da estação Pindamonhangaba.....	160
Figura 64 – Localização dos recortes para elaboração dos produtos cartográficos resultantes da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias aéreas do IBGE de 1966 e 2004.....	162
Figura 65 – Recorte A: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 1966.....	163
Figura 66 – Recorte B: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 1966.....	164
Figura 67 – Recorte C: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 1966.....	165
Figura 68 – Recorte D: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 1966.....	166
Figura 69 – Recorte A: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 2004.....	167
Figura 70 – Recorte B: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 2004.....	168
Figura 71 – Recorte C: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do a partir de fotografias de 2004.....	169
Figura 72 – Recorte D: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 2004.....	170
Figura 73 – Área 1 do curso médio superior.....	172

Figura 74 – Área 2 do curso médio superior.....	172
Figura 75 – Área 3 do curso médio superior.....	173
Figura 76 – Área 4 do curso médio superior.....	173
Figura 77 – Área 10 do curso médio superior.....	175
Figura 78 – Área 11 do curso médio superior.....	175
Figura 79 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Pindamonhangaba.....	177
Figura 80 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Guaratinguetá.....	178
Figura 81 – Perfis longitudinais do curso médio superior do RPS.....	181
Figura 82 – Série temporal de precipitação da estação Queluz.....	185
Figura 83 – Série temporal de precipitação da estação Volta Redonda.....	186
Figura 84 – Série temporal de precipitação da estação Moura Brasil.....	186
Figura 85 – Série temporal de precipitação da estação Anta.....	187
Figura 86 – Correlogramas das séries de chuvas totais mensais das estações Queluz, Volta Redonda, Moura Brasil e Anta.....	188
Figura 87 – Série temporal de vazão média mensal da estação Queluz.....	189
Figura 88 – Série temporal de cotas médias mensais da estação Itatiaia.....	190
Figura 89 – Série temporal de vazão média mensal da estação Resende .....	191
Figura 90 – Série temporal de vazão média mensal da estação Volta Redonda.....	192
Figura 91 – Série temporal de vazão média mensal da estação Barra do Piraí.....	193
Figura 92 – Série temporal de vazão média mensal da estação Paraíba do Sul.....	194
Figura 93 – Série temporal de vazão média mensal da estação Anta.....	196
Figura 94 – Correlogramas das séries temporais de vazões ou cotas médias mensais das estações Queluz, Itatiaia, Resende, Volta Redonda, Barra do Piraí, Paraíba do Sul e Anta.....	196



Figura 95 – Série temporal de concentração de MPS e vazão média mensal da estação Resende.....	199
Figura 96 – Série temporal de concentração de MPS e vazão média mensal da estação Barra do Piraí.....	200
Figura 97 – Série temporal de concentração de MPS e vazão média mensal da estação Anta.....	201
Figura 98 – Correlogramas das séries temporais de concentração de MPS das estações Resende, Barra do Piraí e Anta.....	203
Figura 99 – Concentração de MPS determinado após filtração das amostras superficiais de água coletadas a montante (Ponto 1 – Pré-Barragem) e a jusante (Ponto 2 – Pós-Barragem) da barragem de Anta.....	205
Figura 100 – Produto cartográfico da vetorização manual da primeira metade do curso médio inferior do RPS a partir de fotografias aéreas de 1956-1966.....	208
Figura 101 – Produto cartográfico da vetorização manual da segunda metade do curso médio inferior do RPS a partir de fotografias aéreas de 1956-1966.....	209
Figura 102 – Produto cartográfico da vetorização manual da primeira metade do curso médio inferior do RPS a partir de fotografias aéreas de 2005 e 2006.....	210
Figura 103 – Produto cartográfico da vetorização manual da segunda metade do curso médio inferior do RPS a partir de fotografias aéreas de 2005 e 2006 e imagem <i>Google Earth</i> de 2017.....	211
Figura 104 – Área 1 do curso médio inferior.....	213
Figura 105 – Área 2 do curso médio inferior.....	213
Figura 106 – Área 3 do curso médio inferior (localizada 20 km a montante do reservatório de Funil, entre as PCH Lavrinhas e Queluz).....	214
Figura 107 – Área 4 do curso médio inferior (área alagada pelo reservatório da UHE Funil).....	214
Figura 108 – Área 5 do curso médio inferior (cerca de 60 km a jusante do reservatório de Funil).....	216
Figura 109 – Área 6 do curso médio inferior.....	216
Figura 110 – Área 10 do curso médio inferior (AHE de Simplício/Barragem de Anta).....	218

Figura 111 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Queluz.....	223
Figura 112 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Itatiaia.....	224
Figura 113 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Resende.....	225
Figura 114 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Volta Redonda.....	226
Figura 115 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Barra do Piraí.....	227
Figura 116 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Paraíba do Sul.....	228
Figura 117 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Anta.....	229
Figura 118 – Perfis longitudinais do curso médio inferior do RPS.....	232
Figura 119 – Série temporal de precipitação da estação Dois Rios.....	235
Figura 120 – Correlograma da série temporal de chuvas da estação Dois Rios.....	236
Figura 121 – Série temporal de vazão média mensal da estação São Fidélis.....	237
Figura 122 – Série temporal da vazão média mensal da estação Campos/Ponte Municipal.....	238
Figura 123 – Correlogramas das séries temporais de vazão média mensal durante o pico de vazão (dezembro a fevereiro) para as estações São Fidélis e Campos/Ponte Municipal.....	239
Figura 124 – Série temporal de concentração de MPS e vazão média mensal da estação Campos/Ponte Municipal.....	241
Figura 125 – Correlograma da série temporal de concentração de MPS da estação Campos/Ponte Municipal.....	241
Figura 126 – Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso inferior do RPS a partir de fotografias aéreas do IBGE (1956).....	243
Figura 127 – Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso inferior do RPS a partir de fotografias aéreas do IBGE (2005-2006).....	244

Figura 128 – Área 1 do curso inferior.....	246
Figura 129 – Área 2 do curso inferior.....	246
Figura 130 – Área 5 do curso inferior.....	247
Figura 131 – Área 6 do curso inferior.....	247
Figura 132 – Canal sul da foz do RPS, em 2003 e 2015.....	248
Figura 133 – Evolução do canal sul da foz do RPS, de 2003 a 2016.....	250
Figura 134 – Praia de Atafona, São João da Barra (RJ).....	251
Figura 135 – Canal sul da foz do RPS em 1956 e 2005.....	252
Figura 136 – Logradouros identificados na Praia de Atafona.....	253
Figura 137 – Linha de costa da Praia de Atafona em dois momentos: 2005 e 1956.....	254
Figura 138 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica São Fidélis.....	256
Figura 139 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Campos /Ponte Municipal.....	257
Figura 140 – Perfis transversais (da estiagem) da estação Campos/Ponte Municipal, de 2010 e 2016 (anterior e posterior, respectivamente, ao alagamento do reservatório de Anta).....	258
Figura 141 – Perfis longitudinais do curso inferior do RPS.....	261
Figura 142 – Tendências hidrosedimentológicas e pluviométricas do RPS nas últimas décadas.....	264
Figura 143 – Vazão média de longo termo da estação Estrada do Cunha, calculada entre os anos de instalação de barragens com reservatório.....	267
Figura 144 – Vazão média de longo termo da estação Anta, calculada entre os anos de instalação de barragens com reservatório.....	268
Figura 145 – Aumento da urbanização em municípios do curso superior (1966 a 2004)...	271
Figura 146 – Principais interferências antrópicas e alterações observadas na morfologia de vista em planta dos quatro cursos fluviais do RPS.....	275

Figura 147 – Percentual de variação dos parâmetros de Su et al, 2015) para a época da estiagem das estações fluviométricas utilizadas neste trabalho.....	277
Figura 148 – Percentual de variação dos parâmetros de Su et al (2015) para a época da cheia das estações fluviométricas utilizadas neste trabalho.....	278
Figura 149 – Região deltaica do RPS.....	282
Figura 150 – Comportamento morfosedimentar do complexo deltaico do RPS.....	283
Figura 151 – MDE do complexo deltaico do RPS.....	284
Figura 152 – Falésia ativa da Formação Barreiras nas proximidades do Farol da Ponta do Retiro, no município de São Francisco de Itabapoana (RJ).....	285
Figura 153 – Sentido do transporte litorâneo na região deltaica.....	286
Figura 154 – Presença de bancos arenosos no entorno da desembocadura do RPS.....	287
Figura 155 – Estágios de dispersão de sedimentos fluviais no mar.....	290
Figura 156 – Comportamento espectral da água.....	293
Figura 157 – As bandas dos satélites Landsat 5 a 8.....	295
Figura 158 – Coleta de amostras de água de superfície na porção final do canal do RPS e em sua pluma sedimentar, realizada em 21 de julho de 2017.....	301
Figura 159 – Localização dos pontos de amostragem de água superficial para determinação da concentração de MPS sobre imagem Landsat 8/OLI/RGB-432 do dia da coleta (21/07/2017).....	302
Figura 160 – Máscara para cálculo da média dos valores de reflectância ( $\rho_w$ ).....	303
Figura 161 – Diagrama de dispersão e equação da reta gerada a partir dos 13 pontos de coleta.....	304
Figura 162 – Diagrama de dispersão e equação da reta gerada somente a partir dos pontos da pluma sedimentar do RPS.....	305
Figura 163 – Plotagem dos resíduos do modelo matemático adotado.....	306
Figura 164 – Gráfico de probabilidade normal do modelo matemático adotado.....	306
Figura 165 – Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 2017 (data das amostragens de água).....	308

Figura 166 – Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 1988.....	308
Figura 167 – Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em setembro de 2004.....	309
Figura 168 – Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em junho de 2015.....	309
Figura 169 – Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 2016.....	310
Figura 170 – Frequência da distribuição da concentração de MPS no canal do RPS, antes e após o início da operação da barragem de Anta.....	311
Figura 171 – Frequência da distribuição da concentração de MPS na pluma do RPS, antes e após o início da operação da barragem de Anta.....	312
Figura 172 – Concentração de MPS e vazão média mensal no canal do RPS, na vazante, de 1984 a 2018.....	314
Figura 173 – Diagrama de dispersão da concentração de MPS e da vazão média mensal no canal do RPS, no período da vazante, de 1984 a 2018.....	314
Figura 174 – Concentração de MPS da pluma costeira e vazão média mensal no canal do RPS, no período da vazante, de 1984 a 2018.....	315
Figura 175 – Diagrama de dispersão da concentração de MPS e da vazão média mensal no canal do RPS, no período da vazante, de 1984 a 2018.....	315
Figura 176 – Diagrama Hovmöller do transecto sul do RPS (pontos 6 a 13 da Figura 159), de 1982 a 2018.....	318

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	População (total e por Unidade da Federação) da BRPS, estimada para o ano de 2015.....	39
Quadro 2 –	Características das oito barragens instaladas no canal fluvial do RPS, da nascente à foz.....	78
Quadro 3 –	Período de amostragem dos dados hidrossedimentológicos das estações fluviométricas do RPS selecionadas para este trabalho.....	91
Quadro 4 –	Frequência anual de amostragens de sedimentos nas estações fluviométricas selecionadas ao longo do curso fluvial do RPS.....	92
Quadro 5 –	Fotos aéreas de 1950/60 utilizadas para vetorização do curso fluvial do RPS e seus respectivos erros residuais (RMSE) médio, máximo e checkpoints obtidos no georreferenciamento.....	104
Quadro 6 –	Vazão média de longo termo e por períodos (de acordo com o início da operação das barragens de Santa Branca e Paraibuna) da estação Estrada do Cunha.....	122
Quadro 7 –	Concentração de MPS (mg/L) obtidos a partir de filtração das amostras de superfície da água coletadas nos pontos 1 (pré-barragem) e 2 (pós-barragem) do RPS (localização na Figura 24).....	204
Quadro 8 –	Concentração de MPS obtida a partir das amostras de água coletadas no ponto 2 (pós-barragem) e obtidos da estação fluviométrica de Anta (ANA) e informações pluviométricas dos períodos das amostragens.....	206
Quadro 9 –	Localização, $\rho_w$ e concentração de MPS dos pontos de amostragem.....	304

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Resultado do teste de Mann-Kendall aplicado sobre as séries temporais de chuvas totais mensais das estações São Luís do Paraitinga e Santa Branca.....	119
Tabela 2 –	Resultado do teste Sazonal de Mann-Kendall aplicado sobre as séries temporais de vazão média mensal das estações Estrada do Cunha e Santa Branca.....	125
Tabela 3 –	Parâmetros para avaliação de mudanças na morfologia transversal das duas estações fluviométricas do curso superior, uma não regularizada (Estrada do Cunha) e outra regularizada (Santa Branca).....	144
Tabela 4 –	Resultado do teste de Mann-Kendall aplicado sobre as séries temporais de chuvas totais mensais das estações São José dos Campos, Pindamonhangaba e Guaratinguetá.....	154
Tabela 5 –	Resultados do teste Sazonal de Mann-Kendall aplicado sobre as séries temporais de cotas médias mensais das estações Pindamonhangaba e Guaratinguetá.....	156
Tabela 6 –	Parâmetros para avaliação de mudanças na morfologia transversal das estações fluviométricas do curso médio superior.....	179
Tabela 7 –	Resultado do teste de Mann-Kendall aplicado sobre as séries de chuvas totais mensais das estações Queluz, Volta Redonda, Moura Brasil e Anta.....	187
Tabela 8 –	Resultados do teste Sazonal de Mann-Kendall aplicado sobre as séries temporais de vazões ou cotas médias mensais das estações Queluz, Itatiaia, Resende, Volta Redonda, Barra do Piraí, Paraíba do Sul e Anta.....	197
Tabela 9 –	Resultado do teste Sazonal de Mann-Kendall aplicado sobre a série temporal de concentração de MPS da estação Anta.....	202
Tabela 10 –	Parâmetros para avaliação de mudanças na morfologia transversal das estações Queluz, Itatiaia, Resende, Volta Redonda e Barra do Piraí.....	230
Tabela 11 –	Parâmetros para avaliação de mudanças na morfologia transversal das estações Paraíba do Sul e Anta .....	231

Tabela 12 –	Resultado do teste de Mann-Kendall aplicado sobre a série temporal de chuvas totais mensais da estação Dois Rios.....	235
Tabela 13 –	Resultado do teste Sazonal de Mann-Kendall aplicado sobre as séries temporais de vazão média mensal das estações São Fidélis e Campos/Ponte Municipal.....	238
Tabela 14 –	Resultado do teste Sazonal de Mann-Kendall aplicado sobre a série temporal de concentração de MPS da estação Campos/Ponte Municipal.....	240
Tabela 15 –	Parâmetros para avaliação de mudanças na morfologia transversal das estações fluviométricas do curso inferior.....	259
Tabela 16 –	Variabilidade de alguns parâmetros do RPS, calculada a partir dos polígonos de seus cursos fluviais.....	270
Tabela 17 –	Parâmetros morfométricos dos cursos fluviais do RPS (1950/60 e 2004-06).....	274
Tabela 18 –	Parâmetros calculados a partir dos perfis longitudinais de 1950/60 e 2000 dos cursos fluviais do RPS.....	279
Tabela 19 –	Parâmetros calculados a partir dos perfis auxiliares dos cursos superior (Figura 54) e médio inferior (Figura 118), anteriores e posteriores à construção das barragens Paraibuna e Funil.....	280



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGEVAP	Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do RPS
AHE	Aproveitamento Hidrelétrico
ANA	Agência Nacional de Águas
APA	Área de Proteção Ambiental
BRPS	Bacia do Rio Paraíba do Sul
CEEIVAP	Comitê Executivo de Estudos Integrados da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
CEIVAP	Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
AGEVAP	Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do RPS
CETESB	Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental de São Paulo
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo
DRM	Departamento de Recursos Minerais (RJ)
EIA	Estudos de Impactos Ambientais
GCP	<i>Ground Control Points</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTAOH	Grupo de Trabalho Permanente de Acompanhamento da Operação Hidráulica do Paraíba do Sul
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INEA	Instituto Estadual do Meio Ambiente (RJ)
MDE	Modelo Digital de Elevação
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i> (dos satélites Terra e Aqua)
MPS	Material Particulado em Suspensão
NC	Níveis de cinza
OCM	<i>Ocean Color Monitor</i> (sensor do satélite Oceansat-2)
OLCI	<i>Ocean and Land Color Instrument</i> (sensor dos satélites Sentinel 3A e 3B)
OLI	<i>Operational Land Imager</i> (sensor do satélite Landsat 8)
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos

QGIS	<i>Quantum GIS software</i>
RIMA	Relatórios de Impactos Ambientais
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> (Erro Médio Quadrático)
RPS	Rio Paraíba do Sul
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNGRH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SRTM	<i>Shuttle RADAR Topographic Mission</i>
SWIR	<i>Short-wave infrared</i> (Infravermelho de ondas curtas)
TM	<i>Thematic Mapper</i> (sensor dos satélites Landsat)
UEL	Usina Elevatória
UHE	Usina Hidrelétrica
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
ZMA	Zoneamento Ambiental da Atividade Minerária de Extração de Areia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{W}$	Largura média do canal fluvial
$\% \Delta \bar{W}$	Percentual de variação da largura média do canal fluvial
$\bar{W}_{1950/60}$	Largura média do canal fluvial obtida a partir da vetorização das fotografias aéreas antigas georreferenciadas
$\bar{W}_{2004-06}$	Largura média do canal fluvial obtida a partir da vetorização das fotografias recentes ortorretificadas
A	Área da seção transversal do canal fluvial
LA	Largura ocupada pela água no canal na data da cota mínima anual
LA/PM	Razão entre a largura da água (LA) e a profundidade média (PM)
RDE	Relação Declividade x Extensão do canal fluvial
$RDE_{\text{trecho}}$	Relação Declividade x Extensão de um trecho do canal fluvial
$RDE_{\text{total}}$	Relação Declividade x Extensão de todo o canal fluvial
$\Delta h$	Diferença altimétrica entre dois pontos extremos do curso fluvial
$L_{\text{trecho}}$	Comprimento de um trecho do canal fluvial
$L_{\text{acumulado}}$	Extensão acumulada do canal fluvial até o ponto o RDE será calculado
$\ln L$	Logaritmo natural de toda a extensão do canal fluvial
$\lambda$	Comprimento de onda
z	Profundidade
R	Reflectância
$R(\lambda, z)$	Reflectância no comprimento de onda $\lambda$ e profundidade z
E	Irradiância
$E_u(\lambda, z)$	Irradiância ascendente (fluxo por unidade de área superficial) no comprimento de onda $\lambda$ e profundidade z
$E_d(\lambda, z)$	Irradiância descendente (fluxo por unidade de área superficial) no comprimento de onda $\lambda$ e profundidade z
L	Radiância
$L(\lambda, z, \Theta, \phi)$	Radiância no comprimento de onda $\lambda$ , profundidade z, na direção definida pelo ângulo zenital e ângulo azimutal
$R_{RS}$	Reflectância de sensoriamento remoto

$R_{RS}(\Theta, \phi, \lambda, 0)$	Reflectância de sensoriamento remoto na direção definida pelo ângulo zenital e ângulo azimutal, no comprimento de onda $\lambda$ , na superfície da água
$\rho_{\lambda}'$	Reflectância no topo da atmosfera
$M_p$	Fator de escalonamento multiplicativo de uma banda específica
$A_p$	Fator de escalonamento aditivo de uma banda específica
$Q_{cal}$	Níveis de cinza calibrados
$\rho_{\lambda}$	Reflectância no topo da atmosfera (corrigida do ângulo solar)
$\Theta_{SZ}$	Ângulo zenital solar local
$\Theta_{SE}$	Ângulo de elevação solar local reflectância espectral da superfície da água
$\rho_w$	Reflectância espectral da superfície da água

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	31
1.	<b>OBJETIVOS</b> .....	36
2.	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	38
2.1	<b>O RPS e sua bacia hidrográfica</b> .....	38
2.2	<b>Domínios geomorfológicos e características climáticas da BRPS</b> .....	46
2.3	<b>Domínios de vegetação e uso do solo na BRPS</b> .....	53
2.4	<b>Vulnerabilidade ambiental da BRPS</b> .....	54
2.5	<b>Os múltiplos usos da água do RPS</b> .....	58
2.5.1	<u>Uso industrial</u> .....	59
2.5.2	<u>Uso agrícola</u> .....	59
2.5.3	<u>Abastecimento de água e esgotamento sanitário</u> .....	60
2.5.4	<u>Pesca</u> .....	61
2.5.5	<u>Navegação</u> .....	62
2.5.6	<u>Lazer</u> .....	62
2.5.7	<u>Geração de energia elétrica</u> .....	63
2.6	<b>O desenvolvimento econômico e hidrelétrico do Vale do RPS</b> .....	63
2.6.1	<u>Os empreendimentos hidrelétricos no Vale do RPS</u> .....	65
2.6.2	<u>A regularização do RPS</u> .....	67
2.6.2.1	As regras operativas do Sistema Light e a segurança hídrica do Rio de Janeiro e de sua Região Metropolitana.....	72
2.6.2.2	A regularização em períodos de crise hídrica na BRPS.....	74
2.6.3	<u>A gestão da BRPS</u> .....	75
2.7	<b>As barragens do canal principal do RPS</b> .....	76
3	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	80
3.1	<b>Metodologia de análise de sistemas fluviais</b> .....	80
3.1.1	<u>Paisagem da bacia hidrográfica</u> .....	84
3.1.2	<u>Parâmetros hidrológicos e sedimentológicos</u> .....	86
3.1.2.1	Análise estatística das séries históricas.....	89
3.1.3	<u>Morfologia de vista em planta do canal</u> .....	96
3.1.3.1	As fotografias aéreas utilizadas.....	97

3.1.3.2	A correção geométrica das fotografias aéreas.....	99
3.1.3.3	A vetorização e a análise morfométrica do curso fluvial.....	106
3.1.4	<u>Morfologia transversal do canal</u> .....	110
3.1.5	<u>Morfologia longitudinal do canal</u> .....	111
4	<b>ANÁLISES E RESULTADOS</b> .....	117
4.1	<b>Curso superior do RPS</b> .....	117
4.1.1	<u>Paisagem</u> .....	117
4.1.2	<u>Parâmetros hidrológicos</u> .....	118
4.1.3	<u>Parâmetros sedimentológicos</u> .....	125
4.1.4	<u>Morfologia de vista em planta</u> .....	128
4.1.5	<u>Morfologia transversal</u> .....	141
4.1.6	<u>Morfologia longitudinal</u> .....	145
4.2	<b>Curso médio superior do RPS</b> .....	147
4.2.1	<u>Paisagem</u> .....	147
4.2.2	<u>Parâmetros hidrológicos</u> .....	151
4.2.3	<u>Parâmetros sedimentológicos</u> .....	158
4.2.4	<u>Morfologia de vista em planta</u> .....	161
4.2.5	<u>Morfologia transversal</u> .....	176
4.2.6	<u>Morfologia longitudinal</u> .....	180
4.3	<b>Curso médio inferior do RPS</b> .....	182
4.3.1	<u>Paisagem</u> .....	182
4.3.2	<u>Parâmetros hidrológicos</u> .....	184
4.3.3	<u>Parâmetros sedimentológicos</u> .....	198
4.3.4	<u>Morfologia de vista em planta</u> .....	207
4.3.5	<u>Morfologia transversal</u> .....	220
4.3.6	<u>Morfologia longitudinal</u> .....	231
4.4	<b>Curso inferior do RPS</b> .....	233
4.4.1	<u>Paisagem</u> .....	233
4.4.2	<u>Parâmetros hidrológicos</u> .....	234
4.4.3	<u>Parâmetros sedimentológicos</u> .....	239
4.4.4	<u>Morfologia do de vista em planta</u> .....	242
4.4.5	<u>Morfologia transversal</u> .....	254
4.4.6	<u>Morfologia longitudinal</u> .....	260

4.5	<b>Resultados e discussões</b> .....	262
4.5.1	<u>Análise hidrológica e sedimentológica</u> .....	262
4.5.2	<u>Análise da morfologia de vista em planta</u> .....	269
4.5.3	<u>Análise da morfologia transversal</u> .....	276
4.5.4	<u>Análise da morfologia longitudinal</u> .....	279
5	<b>ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO DA PORÇÃO DO CANAL E DA PLUMA COSTEIRA DO RPS NO PERÍODO DA ESTIAGEM</b> .....	281
5.1	<b>Objetivos</b> .....	281
5.2	<b>Área de estudo</b> .....	282
5.3	<b>Fundamentação teórica</b> .....	287
5.3.1	<u>A pluma sedimentar costeira e seus processos dinâmicos</u> .....	288
5.3.2	<u>Sensoriamento remoto da cor da água</u> .....	290
5.3.3	<u>O comportamento espectral das águas costeiras</u> .....	292
5.4	<b>Material e métodos</b> .....	293
5.4.1	<u>As imagens ópticas utilizadas</u> .....	294
5.4.1.1	Os tratamentos aplicados às imagens.....	297
5.4.2	<u>Amostragens de água na pluma sedimentar do RPS</u> .....	299
5.4.3	<u>O modelo matemático</u> .....	303
5.5	<b>Resultados e discussões</b> .....	307
5.6	<b>Conclusões do estudo de caso</b> .....	316
	<b>CONCLUSÕES</b> .....	319
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	324
	<b>APÊNDICE A – Áreas 5 e 6 do curso superior</b> .....	335
	<b>APÊNDICE B – Áreas 9 e 10 do curso superior</b> .....	336
	<b>APÊNDICE C – Áreas 11 e 12 do curso superior</b> .....	337
	<b>APÊNDICE D – Principais alterações morfológicas no curso superior do RPS</b> ..	338
	<b>APÊNDICE E – Áreas 5 e 6 do curso médio superior</b> .....	340
	<b>APÊNDICE F – Áreas 7 e 8 do curso médio superior</b> .....	341
	<b>APÊNDICE G – Área 9 do curso médio superior</b> .....	342
	<b>APÊNDICE H – Principais alterações morfológicas no curso médio superior do RPS</b> .....	343

<b>APÊNDICE I</b> – Área 7 do curso médio inferior.....	344
<b>APÊNDICE J</b> – Áreas 8 e 9 do curso médio inferior.....	345
<b>APÊNDICE L</b> – Áreas 11 e 12 do curso médio inferior.....	346
<b>APÊNDICE M</b> – Áreas 13 e 14 do curso médio inferior.....	347
<b>APÊNDICE N</b> – Principais alterações morfológicas no curso médio inferior do RPS.....	348
<b>APÊNDICE O</b> – Áreas 3 e 4 do curso inferior.....	350
<b>APÊNDICE P</b> – Principais alterações morfológicas no curso inferior do RPS...	351
<b>APÊNDICE Q</b> – Concentração de MPS do entorno da foz do RPS após aplicação do modelo matemático.....	352



## INTRODUÇÃO

Os rios exercem um papel fundamental nos ciclos biogeoquímicos do planeta, afetando significativamente tanto os ecossistemas terrestres como a sociedade (FEKETE et al., 2010). Entre os anos de 1950 e 1982, aproximadamente 30.000 represas foram construídas pelo mundo, sendo mais de 18.000 dessas obras realizadas na China. Entre os anos 1990 e 2000, o percentual de rios cujos fluxos foram desviados ou interrompidos por barragens chegou a 13% e a estimativa para meados do século XXI é de mais de 20% (MILLIMAN, 1997). Mesmo os mais elaborados projetos de barragens, construídos segundo recomendações técnicas que visam minimizar impactos ambientais, podem criar problemas inesperados, muitas vezes em locais distantes do ponto de acumulação ou desvio de água (SINHA et al., 1996; SYVITSKI et al., 2005).

A compreensão das mudanças na paisagem resultantes das alterações que os rios vêm sofrendo com a instalação de barragens ao longo de décadas, em particular sobre o fluxo sedimentar, é um dos problemas mais antigos e fundamentais das pesquisas geomorfológicas, mas oportunidades de estudar tais mudanças *in situ* e no momento em que ocorrem são raras (WARRICK *et al.*, 2015).

Segundo Milliman (1997), dentre os impactos que as barragens e seus reservatórios podem ocasionar estão:

- a) considerável redução do volume de água e sedimentos que são despejados na foz;
- b) diminuição do aporte sedimentar, que pode interferir nos processos naturais de compensação da subsidência natural de algumas áreas costeiras, acelerando, assim, a erosão das mesmas;
- c) intensificação de processos erosivos no canal fluvial e nas planícies de inundação a jusante dos pontos de represamento de água;
- d) aumento considerável de nutrientes eutrofizantes (nitrogênio e fósforo) nos reservatórios que, em períodos de liberação de vazão, poderão chegar até a costa potencializando a ocorrência de *blooms* de algas;
- e) acúmulo de poluentes nos reservatórios – oriundos de áreas urbanas no seu entorno – que podem acabar sendo carregados até o oceano;

- f) mudanças nos padrões de mistura e circulação de águas nas regiões costeiras onde o curso fluvial despeja suas águas;
- g) alteração na composição fitoplanctônica das zonas costeiras dependentes do aporte de sílica e outros nutrientes carregados pelos rios até o oceano;
- h) alteração da produtividade primária dos ecossistemas fluviais e costeiros;
- i) modificação das cadeias alimentares, o que pode acarretar diminuição ou desaparecimento de algumas espécies de peixes e outros organismos consumidores;
- j) aparecimento de novas espécies no ecossistema fluvial e costeiro como resultado das alterações químicas e biológicas, dentre outros.

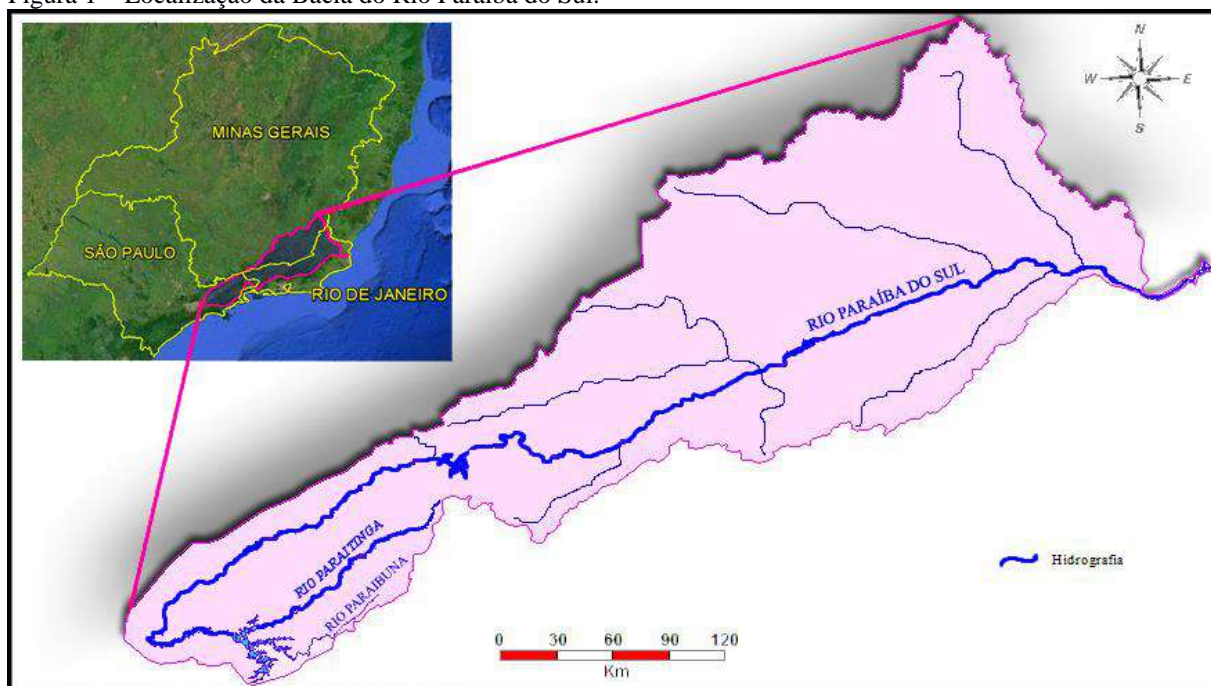
Não menos importantes que os impactos ambientais, os problemas sociais normalmente provocados pela construção de barragens e reservatórios não devem ser negligenciados. No mundo estima-se que a área inundada após a construção de barragens seja de pelo menos 400.000 km<sup>2</sup> (McCULLY, 1996); no Brasil, as estimativas apontam 34.000 km<sup>2</sup> de terras alagadas com mais de um milhão de pessoas diretamente afetadas (ARAÚJO; NUNAN, 2005). A perda da principal fonte de subsistência – as terras para o cultivo ou o próprio rio onde realizam atividades pesqueiras – leva muitas famílias ao empobrecimento. De cada dez famílias atingidas pelo enchimento de reservatórios de barragens, apenas três recebem indenizações, que normalmente não compensam as perdas econômicas, sociais e culturais a que as pessoas são submetidas (ARAÚJO; NUNAN, 2005).

A construção de barragens nas bacias hidrográficas brasileiras não é uma atividade recente. Ela remonta ao final do século XIX e seu objetivo primordial consistia na implantação das primeiras unidades geradoras de eletricidade no país. Na época, caracterizavam-se por serem pequenas usinas para suprimento de cargas modestas e localizadas, com barragens de dimensões discretas. Já no início do século XX, alguns pequenos rios da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (RPS) foram contemplados com algumas obras, mas somente em 1924 entrou em operação a primeira barragem localizada em seu canal principal, construída para o reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) da Ilha dos Pombos, no município de Carmo, RJ (MELLO, 2011). Assim, dava-se início ao processo de implantação de várias barragens ao longo do curso do RPS, destinadas a diferentes finalidades: geração de energia elétrica; suprimento das demandas por água dos setores agropecuário e industrial de grande parte da Região Sudeste brasileira; e abastecimento da crescente população que se estabelecia ao longo do Vale do Paraíba e dos habitantes da Região

Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), esta última contemplada, em 1952, com um sistema de transposição que desviou cerca de 60% do fluxo do RPS para o rio Guandu (ANA, 2016).

A Bacia do RPS (BRPS) localiza-se na região economicamente mais importante do Brasil – o eixo Rio-São Paulo (Figura 1). O RPS e seus afluentes têm destacada importância no cenário nacional, banhando os maiores polos industriais e populacionais do país. Como suas águas banham mais de um estado, é classificado como um “rio federal” e a gestão das mesmas envolve as três esferas de governo. Visando suprir os interesses dos habitantes dos três estados contemplados com suas águas ele é hoje um rio regularizado, o que torna sua vazão, em vários trechos ao longo de seu curso, controlada por um sistema complexo de estruturas e operações hidráulicas (reservatórios e usinas hidrelétricas, além do sistema de transposição de águas para o rio Guandu).

Figura 1 – Localização da Bacia do Rio Paraíba do Sul.



Fonte: ANA, 2010; IBGE, 2014; GOOGLE INC, 2017.

Há carência de trabalhos científicos que contemplem toda a extensão do RPS como objeto de estudo. Dentre os existentes, destacam-se aqueles que descrevem os aspectos físicos de sua bacia (AB’SABER; BERNARDES, 1958), a história de sua ocupação, de seu desenvolvimento industrial e da evolução do aproveitamento hidrelétrico do Vale do Paraíba (PATRIANI; CUNHA, 2010; COELHO, 2012), além dos trabalhos desenvolvidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), pela Agência da BRPS (AGEVAP) e pelo Comitê da

bacia hidrográfica do RPS (CEIVAP) voltados para a gestão das águas da BRPS (ANA, 2001; CEIVAP, 2010; CEIVAP, 2014; AGEVAP, 2016).

Em face de sua extensão de quase 1150 km, trabalhos científicos de diferentes áreas do conhecimento sobre o RPS normalmente tratam apenas de uma parte de seu curso fluvial. Nesse contexto, dentre os muitos trabalhos existentes, citam-se: estudo dos impactos da agricultura irrigada do arroz sobre a qualidade da água do RPS na várzea paulista (ANDRADE, 2010); dos impactos das barragens sobre a ictiofauna no trecho fluminense (ARAÚJO; NUNAN, 2005); monitoramento da extração da areia em cavas nas planícies aluviais paulistas (SILVA; SIMI; RUDORFF, 2011) e de sua influência no balanço hídrico no curso médio superior (REIS, 2006). Há também aqueles elaborados para atender as exigências para obtenção de licença de instalação de barragens, como os Estudos de Impactos Ambientais (EIA) e Relatórios de Impactos Ambientais (RIMA) em trechos específicos do curso fluvial. Porém, o teor científico desses últimos muitas vezes é questionável. O EIA-RIMA do Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) de Simplício (ENGEVIX, 2001), por exemplo, foi elaborado pela mesma empresa responsável pela etapa de construção da obra, o que diminui a credibilidade do trabalho.

Existem ainda trabalhos importantes que caracterizaram morfodinamicamente a região deltaica do RPS e a evolução dos processos erosivos que ali ocorreram (DIAS, 1981; DIAS; SILVA, 1984; BASTOS; SILVA, 2000; MUEHE, 2005) e, finalmente, alguns trabalhos sobre a caracterização da pluma sedimentar do RPS por meio de imagens de satélite (SOUZA et al., 2010; VALÉRIO; KAMPEL, 2013).

Apesar da existência de dados hidrológicos, sedimentológicos e de sensoriamento remoto que podem ser utilizados para avaliação das mudanças nos parâmetros hidrosedimentológicos e morfológicos de todo o RPS ao longo de décadas de interferências antrópicas, ainda não existem estudos que forneçam uma visão sinóptica da evolução desses parâmetros em todo o sistema fluvial, nem mesmo estudos que investiguem especificamente os impactos que as barragens possam ter exercido sobre esses parâmetros.

Relatos de pescadores e moradores do Vale do Paraíba, reportagens e outras fontes não científicas apontam uma considerável redução nas cotas e na vazão do RPS ao longo dos anos. A simples comparação entre fotografias aéreas de décadas passadas e recentes evidencia mudanças geomorfológicas no seu curso fluvial, como a diminuição da largura do canal. Embora essas mudanças possam ser consequência de uma combinação de fatores decorrentes do aproveitamento das águas do RPS para múltiplas finalidades ao longo dos anos – seja para agricultura, uso industrial, extração de areia ou abastecimento das populações de seu entorno

– e até provavelmente o resultado de mudanças climáticas, a investigação da hipótese de que as barragens possuem um papel significativo sobre as mudanças morfológicas e hidrológicas do RPS é a principal proposta deste trabalho.

Os efeitos das barragens sobre as plumas sedimentares costeiras onde o suprimento sedimentar é necessário para a manutenção de manguezais e outras paisagens litorâneas também podem ser pronunciados (WARRICK et al., 2015). Outra hipótese que será analisada é se as barragens, ao reduzirem o volume de águas que chega até o Atlântico, podem também ser responsáveis pela diminuição do volume de sedimentos que chega à foz, acelerando, assim, os processos erosivos que, segundo Argento e Costa (2005), vêm assolando a praia de Atafona (em São João da Barra, RJ) desde a década de 1950.

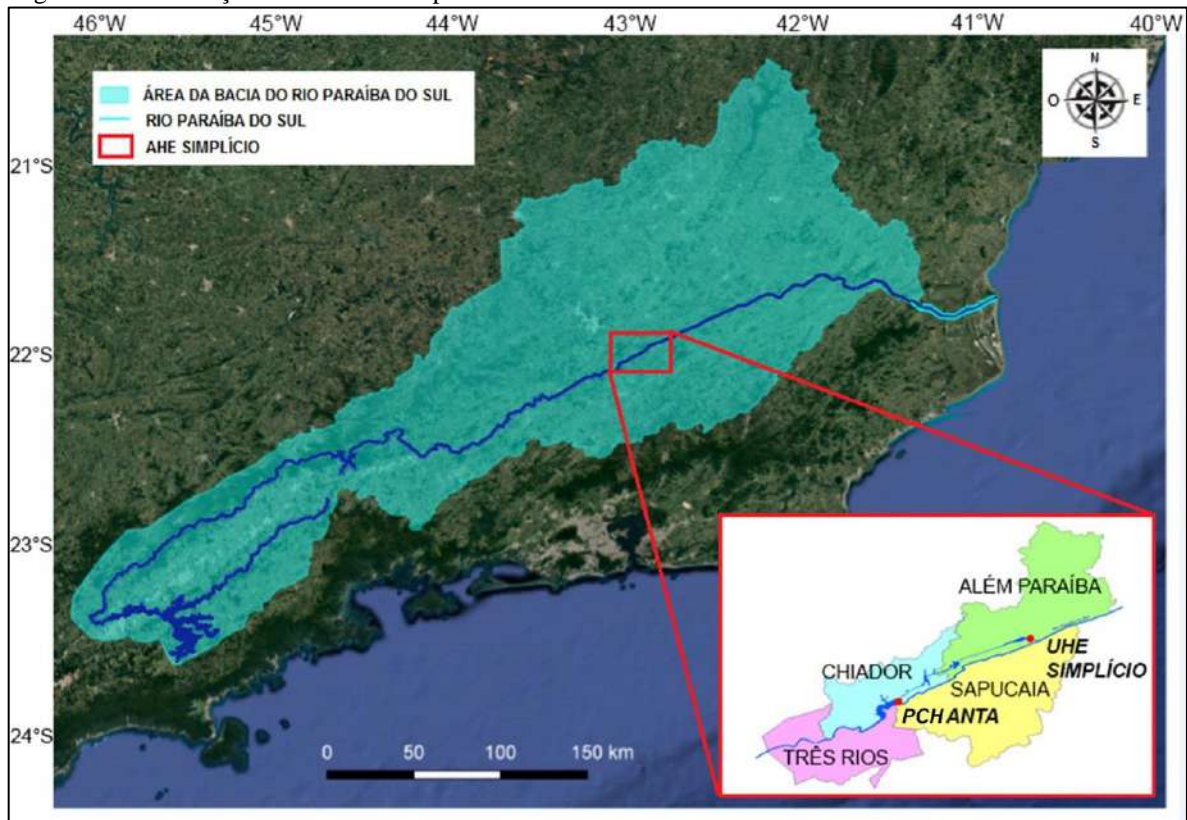
## 1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar as mudanças geomorfológicas e hidrosedimentológicas que o RPS vem sofrendo ao longo dos anos, de sua nascente à foz, como resultado da instalação de uma série de barragens em seu curso fluvial.

São objetivos específicos deste trabalho:

- a) estudar os parâmetros hidrosedimentológicos de todo o RPS, em anos anteriores e posteriores à construção de suas barragens, de modo a identificar possíveis alterações ocorridas a partir da instalação dessas construções nos valores de cotas, vazões e concentração de material particulado em suspensão (MPS) das estações fluviométricas localizadas ao longo do seu curso fluvial;
- b) analisar as principais alterações geomorfológicas de todo o canal principal do RPS, comparando-se a morfologia anterior à construção das barragens com a atual, após a instalação das mesmas;
- c) realizar um estudo de caso para investigar os valores de concentração de MPS na porção final do canal do RPS e em sua pluma sedimentar costeira em anos anteriores e posteriores à instalação da barragem de Anta, do AHE de Simplício (Figura 2) – a mais recente barragem do RPS e mais próxima à foz – com o objetivo de identificar se essa obra ocasionou impactos à descarga sedimentar que chega até a foz.

Figura 2 – Localização do AHE de Simplício.



Legenda: AHE – Aproveitamento Hidrelétrico; PCH – Pequena Central Hidrelétrica; UHE – Usina Hidrelétrica.

Fonte: Adaptado de ANA, 2010, FURNAS, 2016 e GOOGLE INC., 2017.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 O RPS e sua bacia hidrográfica

A BRPS – localizada na Região Sudeste do Brasil entre as latitudes 20° 25' S e 23° 31,5' S e as longitudes 41° 00' O e 46° 13' O – ocupa uma área aproximada de 62.000 km<sup>2</sup> (Figura 3), o que corresponde a 5% da área do estado de São Paulo, 63% da área do estado do Rio de Janeiro e 6% da área do estado de Minas Gerais (ANA, 2016). A área da bacia abrange 184 municípios, sendo 39 no estado de São Paulo, 57 no estado do Rio de Janeiro e 88 em Minas Gerais (Figura 4), com territórios total ou parcialmente inseridos nos limites da bacia, incluindo a área das planícies inundáveis junto à foz do RPS (ANA, 2016).

Essa bacia drena a região responsável por mais de 50% do PIB nacional (IBGE, 2018), estendendo-se desde o Vale do Paraíba paulista, passando por parte da Zona da Mata mineira e pelo Vale do Paraíba fluminense até, finalmente, entregar suas águas ao oceano Atlântico.

Figura 3 – Limites da BRPS.



Fonte: Mapa elaborado a partir de dados de ANA, 2010; IBGE, 2014; GOOGLE INC, 2017.



A estimativa da população total da BRPS para o ano de 2015 era, segundo o IBGE, de quase 9 milhões de habitantes (Quadro 1), dos quais 87% estariam em áreas urbanas (IBGE, 2015).

Quadro 1 – População (total e por Unidade da Federação) da BRPS, estimada para o ano de 2015.

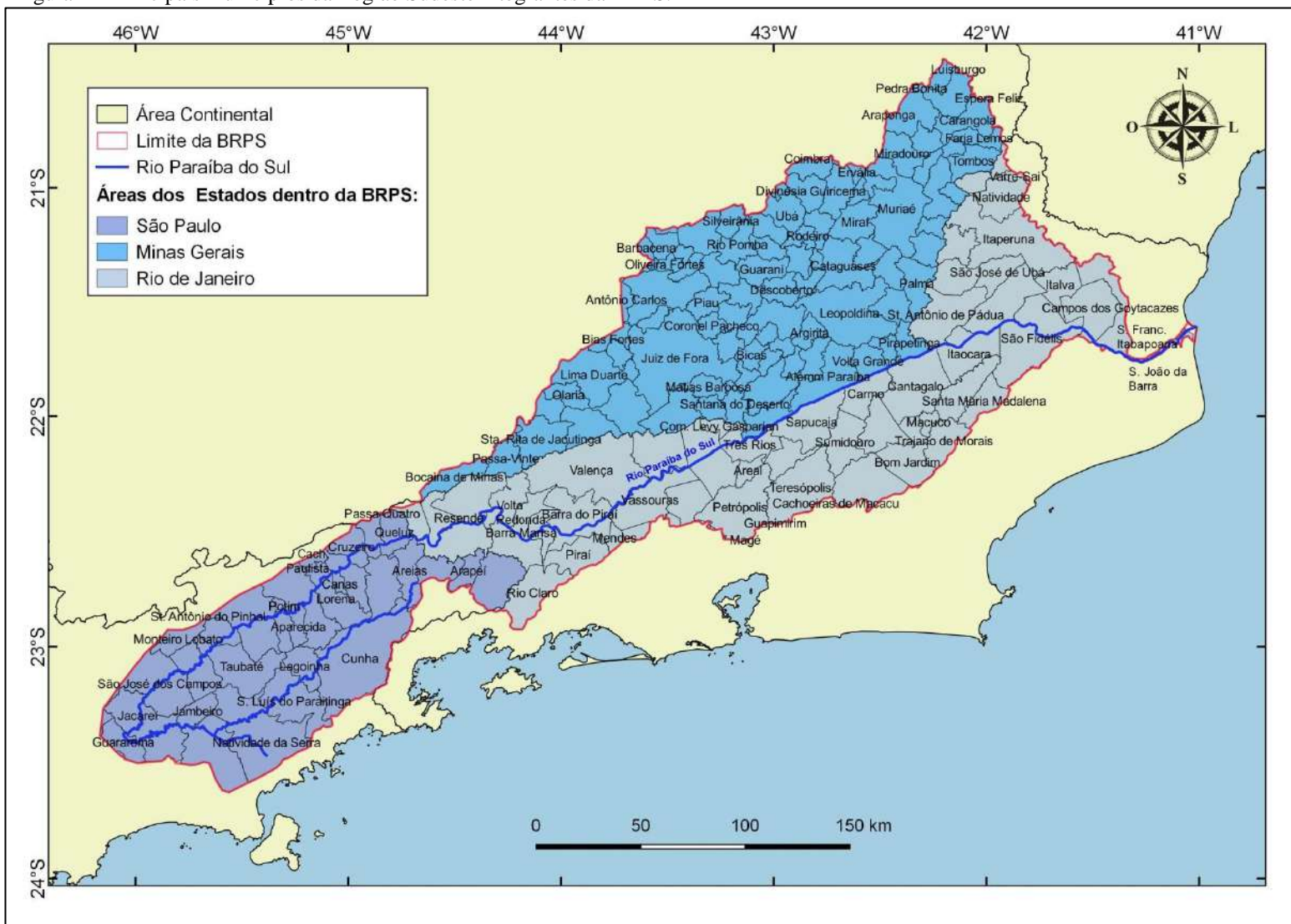
UF	POPULAÇÃO ESTIMADA (2015)
São Paulo	4.356.090
Rio de Janeiro	2.915.041
Minas Gerais	1.727.246
<b>TOTAL</b>	<b>8.998.377</b>

Fonte: IBGE, 2015.

O vale do RPS, encaixado entre as Serras do Mar e da Mantiqueira, distribui-se na direção leste-oeste em uma região de relevo bastante acidentado que chega a atingir, nos seus pontos mais elevados, valores superiores a 2.000 metros de altitude. O pico das Agulhas Negras, com 2.790,94 metros de altitude é o ponto mais alto dessa paisagem (IBGE/INDE, 2015). Das poucas áreas planas existentes na BRPS citam-se o delta do Paraíba, com uma extensa planície fluvio-marinha que abrange parte dos municípios fluminenses de Campos dos Goytacazes, São João da Barra e São Francisco do Itabapoana e as planícies fluviais ao longo do RPS e de seus maiores afluentes, como as bacias sedimentares de Taubaté (SP) e Resende (RJ).

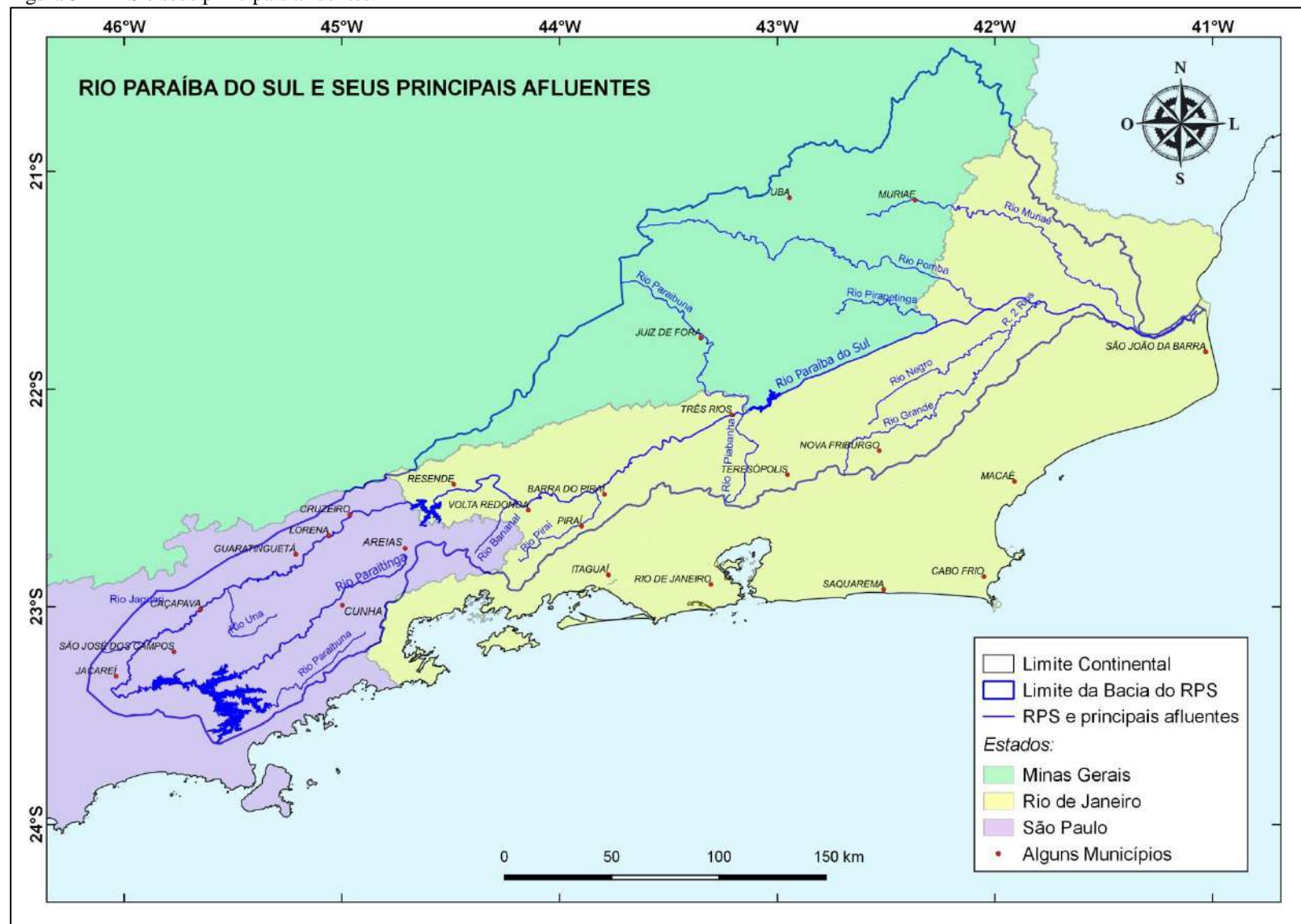
O RPS nasce timidamente com o nome de Paraitinga (que significa “águas claras” em tupi-guarani) no município de Areias (SP), no alto da Serra da Bocaina, a 1833 metros de altitude (PATRIANI; CUNHA, 2010). Ele surge do solo encharcado da Várzea da Lagoa, um campo de altitude na região leste do estado de São Paulo. Após receber as águas das chuvas, as águas transparentes do Paraitinga ganham volume e força e descem até o encontro com um importante coadjuvante: o rio Paraibuna (Figura 5). O rio Paraibuna (“águas escuras” em tupi-guarani) nasce no município de Cunha (SP), na Serra do Mar, e após percorrer aproximadamente 105 km mistura suas águas escuras às claras do rio Paraitinga no município de Paraibuna, a partir de onde o rio assume o nome oficial de Paraíba do Sul. Embora aparentemente o RPS possua duas nascentes, graças à maior distância do Paraitinga à foz, na praia de Atafona, em São João da Barra (RJ), o mesmo é reconhecido como a nascente oficial do Paraíba do Sul (AB’SABER; BERNARDES, 1958). O RPS tem como principais afluentes na margem esquerda, os rios Jaguari, Paraibuna, Pirapetinga, Pomba e Muriaé. Na margem direita destacam-se os rios Una, Bananal, Piraí, Piabanha e Dois Rios (Figura 5).

Figura 4 – Principais municípios da Região Sudeste integrantes da BRPS.



Fonte: Mapa elaborado a partir do limite da BRPS definido por ANA, 2010 e das divisões territoriais do IBGE, 2014.

Figura 5 – RPS e seus principais afluentes.



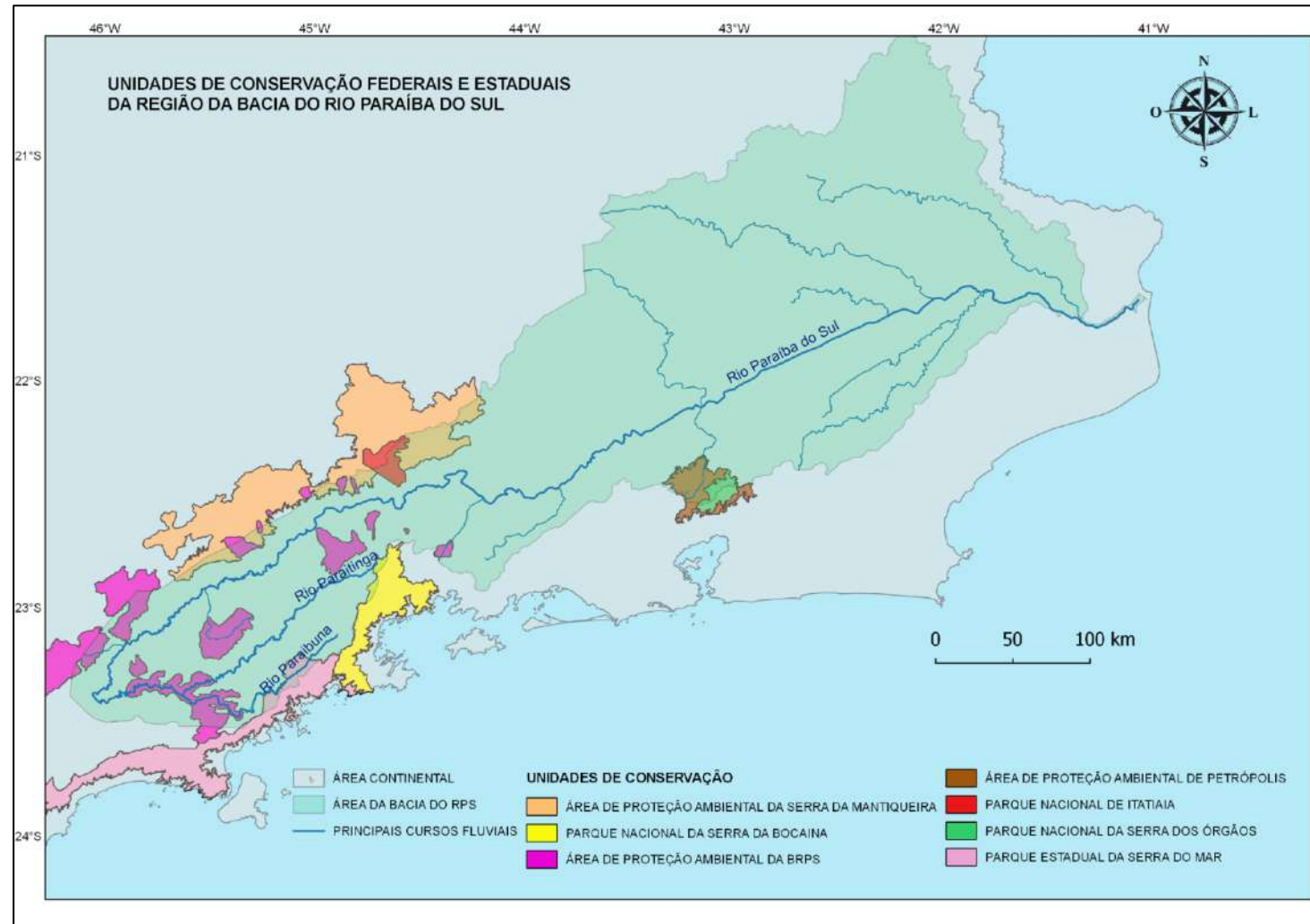
Fonte: Mapa elaborado a partir das divisões territoriais do IBGE, 2014 e da hidrografia da ANA, 2010.

Os mananciais dos rios Paraitinga e Paraibuna, cujos leitos seguem quase paralelos por quilômetros antes de se encontrarem e darem identidade ao RPS são fontes de água desprotegidas, localizadas em propriedades particulares. Há projetos para transformar essas nascentes em áreas de proteção ambiental. Atualmente, existem duas importantes Unidades de Conservação em suas proximidades, mas localizadas fora da área da bacia do RPS (Figura 6): o Parque Nacional da Serra da Bocaina (com 104.000 ha de florestas), o Parque Estadual da Serra do Mar (com 315.000 ha de florestas) e algumas porções da Área de Proteção Ambiental (APA) da BRPS (ICMBIO, 2016; FFSP, 2016). As águas que alimentam o RPS, nas duas cabeceiras, são ainda consideravelmente limpas. O município paulista de São Luís do Paraitinga, por exemplo, a menos de 100 km da nascente, tem 100% de seu esgoto coletado e tratado. O grande problema que aflige os rios da cabeceira, principalmente o Paraibuna, são os assoreamentos provocados após o desmatamento de suas matas ciliares e a construção de estradas de terra às suas margens sem os devidos critérios técnicos, carregando uma grande quantidade de sedimentos para seus leitos (PATRIANI; CUNHA, 2010).

Por apresentar características físicas distintas ao longo de seu curso fluvial, o RPS foi dividido em quatro trechos (Figuras 7 e 8), conforme a classificação adotada pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2001):

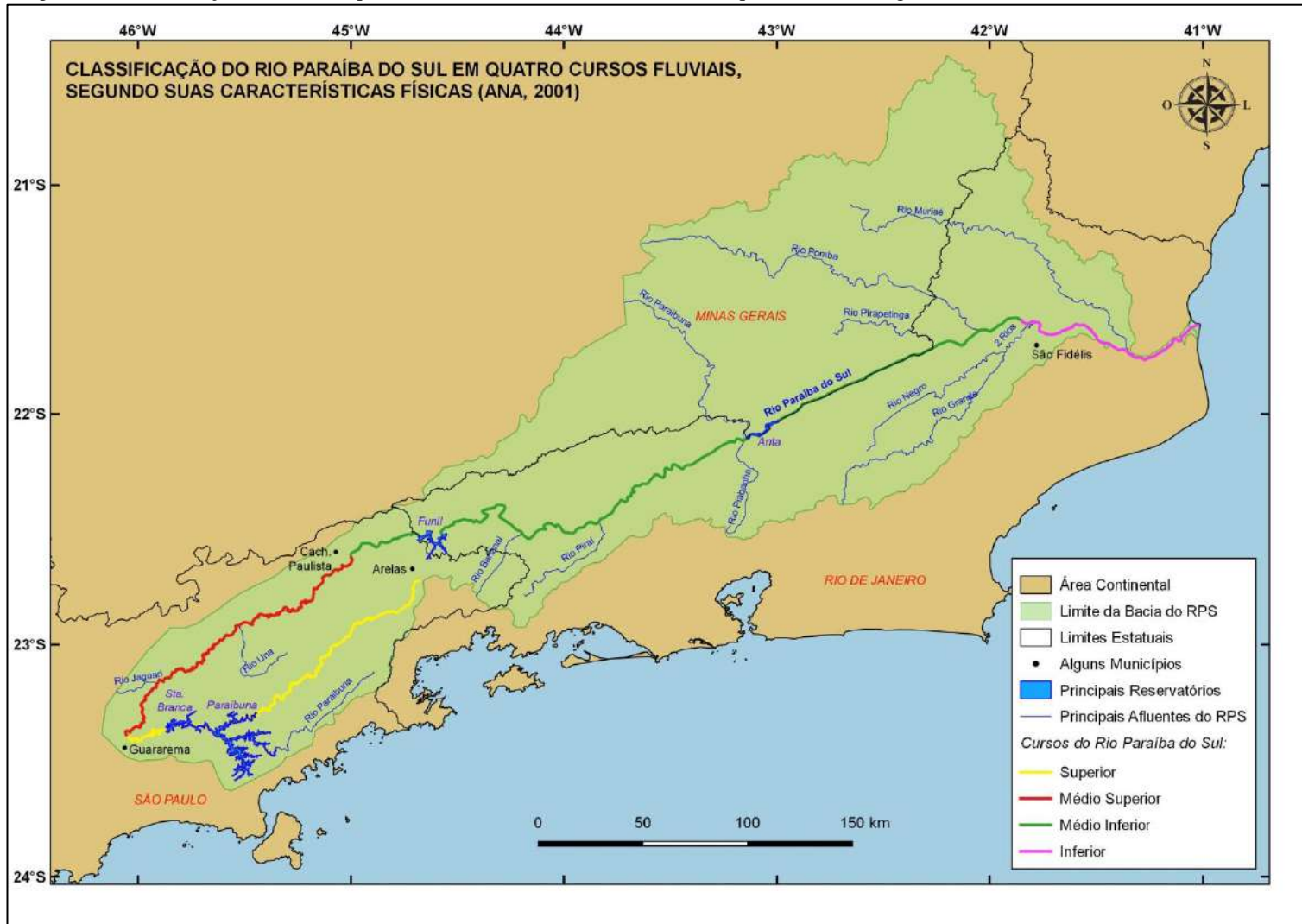
- a) *Curso Superior* – da nascente do rio Paraitinga, em Areias (SP) até o município de Guararema (SP), a 572 m de altitude. Nesse trecho, de quase 300 km de extensão e declividade média acentuada (4,9 m/km), predomina o regime torrencial;
- b) *Curso Médio Superior* – vai do município de Guararema até o município de Cachoeira Paulista (SP), cuja altitude é de 515 m; nesse trecho, de 208 km de extensão e declividade média de 0,19 m/km, o RPS apresenta-se bastante sinuoso e meandrante e percorre terrenos sedimentares e grandes várzeas;
- c) *Curso Médio Inferior* – de Cachoeira Paulista a São Fidélis (RJ), a menos de 50 m de altitude; esse trecho, mais longo, de quase 500 km de extensão e declividade média de 1,0 m/km, o RPS apresenta-se “encaixado” e com trechos encachoeirados;
- d) *Curso Inferior* – trecho final de 95 km de extensão, que vai de São Fidélis à foz, em São João da Barra (RJ). Sua declividade média é de 0,22 m/km e atravessa a Baixada Campista, extensa planície litorânea.

Figra 6 – Unidades de Conservação da região da BRPS.



Fonte: Mapa elaborado a partir de divisões territoriais do IBGE, 2014 e de limites das Unidades de Conservação do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBIO, 2016.

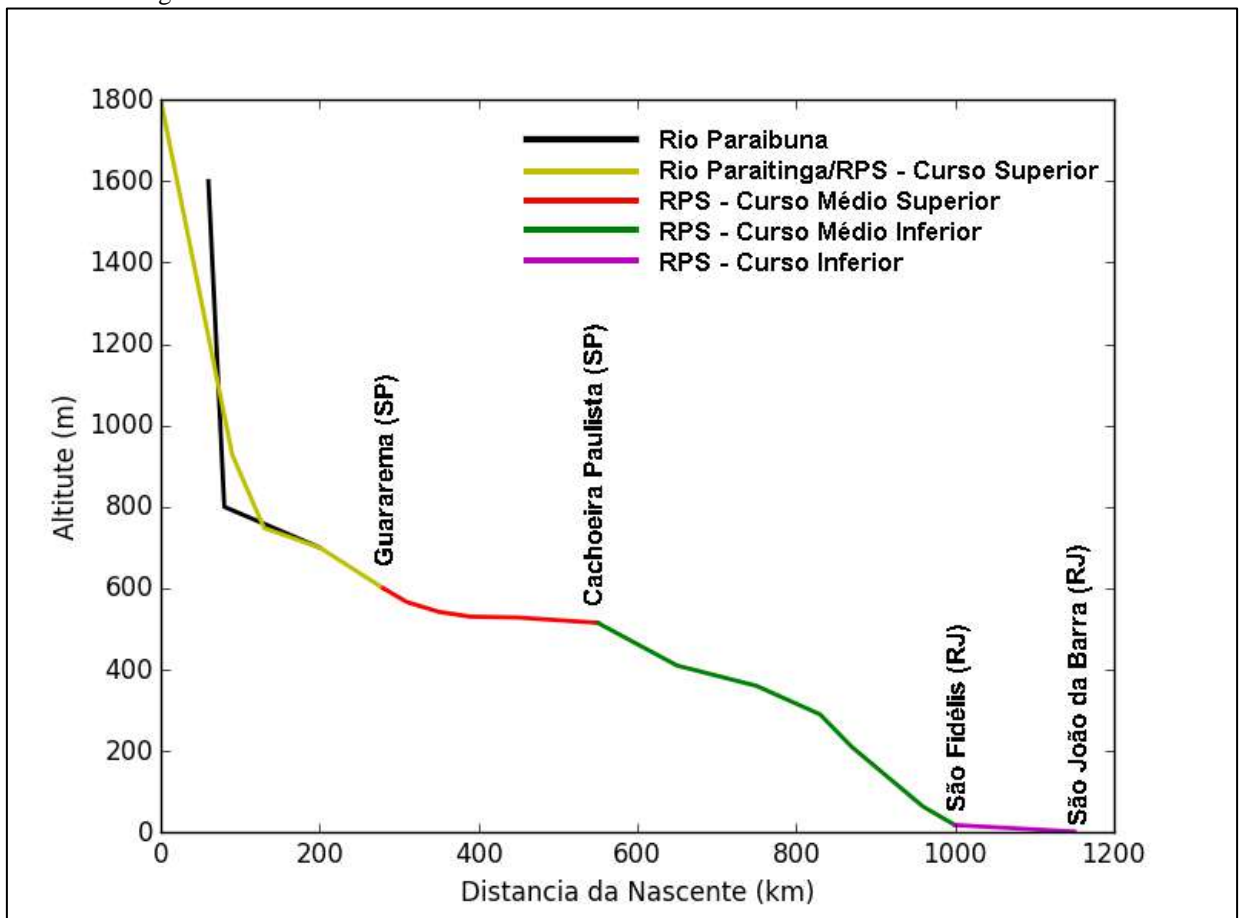
Figura 7 – Classificação do RPS na qual seu curso fluvial foi subdividido em quatro trechos, segundo suas características físicas.



Fonte: Mapa elaborado a partir de definições da ANA, 2001.

A divisão de cursos fluviais em segmentos com características relativamente homogêneas é uma prática comum em estudos da geomorfologia fluvial (SCORPIO et al., 2015). A classificação do RPS adotada pela ANA reúne em um mesmo segmento fluvial porções do canal do RPS com características geológicas e geomorfológicas semelhantes. Embora os quatro cursos fluviais apresentem características internas semelhantes, eles são bem distintos entre si. A adoção dessa classificação do RPS em quatro cursos fluviais facilitou não somente a análise temporal das mudanças geomorfológicas, como também o estudo dos parâmetros hidrosedimentológicos.

Figura 8 – Perfil longitudinal aproximado do RPS onde seu curso fluvial foi subdividido em quatro trechos, segundo suas características físicas.



Fonte: Elaborado a partir da metodologia adotada pela ANA, 2010.

## 2.2 Domínios geomorfológicos e características climáticas da BRPS

A BRPS tem forma alongada e é limitada ao norte pela Serra da Mantiqueira e ao sul pela Serra dos Órgãos e pelos trechos paulista e fluminense da Serra do Mar (Figura 9).

Sua formação remonta à transição dos períodos Cretáceo e Terciário Superior (70-65 Ma), quando a cadeia de montanhas dos Andes se formava e, na porção leste da América do Sul estava ocorrendo um grande processo tectônico com movimentos epirogenéticos e intenso magmatismo em consequência de sua separação do continente africano. No Terciário Médio a Superior ocorreu o soergimento regional responsável pela elevação das serras da Mantiqueira e do Mar e, na porção axial desse soergimento, houve um abatimento de blocos devido à reativação de antigas falhas geológicas orientadas na direção NE-SW, dando origem ao *graben* do Paraíba do Sul (SANTOS, 2008). A esta associação das serras do Mar/Mantiqueira com os vales tectônicos intervenientes e suas extensões na plataforma continental das bacias de Santos/Campos (até as suas charneiras, a oeste das quais não ocorrem sedimentos cretáceos) serão denominadas doravante de Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil (ZALAN; OLIVEIRA, 2005). Ainda no Terciário, essas regiões que sofreram subsidência foram preenchidas por sedimentos provenientes dos relevos mais elevados, originando um conjunto de bacias sedimentares. Do início do Quaternário até os dias atuais a modelagem do relevo segue ativa, com a erosão dos morros e das serras que delimitam o *graben* e a sedimentação ao longo do vale do RPS (SANTOS, 2008).

A BRPS, influenciada pela proximidade do litoral, apresenta características climáticas especiais (IBGE, 2016). De maneira geral, seu clima é classificado como tropical com temperatura média anual entre 18°C e 24°C. Dentro dessa classificação geral, o clima tropical da bacia é subdividido em três tipos principais, com as seguintes características:

- a) *mesotérmico brando* – temperaturas médias entre 10° C e 15° C; na bacia, são encontradas três variações desse tipo climático, conforme a umidade: super-úmido, úmido e semi-úmido, variando o número de meses secos.
- b) *subquente* – temperaturas médias entre 15° C e 18° C em pelo menos um mês do ano; possui três variações na bacia, também de acordo com a umidade: super-úmido, úmido e semi-úmido, variando o número de meses secos.
- c) *quente* – temperaturas médias acima de 18° C o ano todo; possui duas variações, de acordo com a umidade: úmido e semi-úmido, variando



também o número de meses secos.

No curso superior, nas proximidades da cabeceira do rio Paraitinga, na porção da Serra do Mar denominada Serra da Bocaina (Figura 9), predomina o *clima tropical mesotérmico brando úmido* com 3 meses secos (Figura 10) e, à medida que esse rio se aproxima da confluência com o Paraibuna, o *clima tropical subquente úmido* passa a dominar, desde o curso superior até o curso médio superior, variando apenas o número de meses secos (de 1 a 2 meses secos, rio acima, para 3 meses secos rio abaixo, quando o curso fluvial passa a ser denominado Paraíba do Sul).

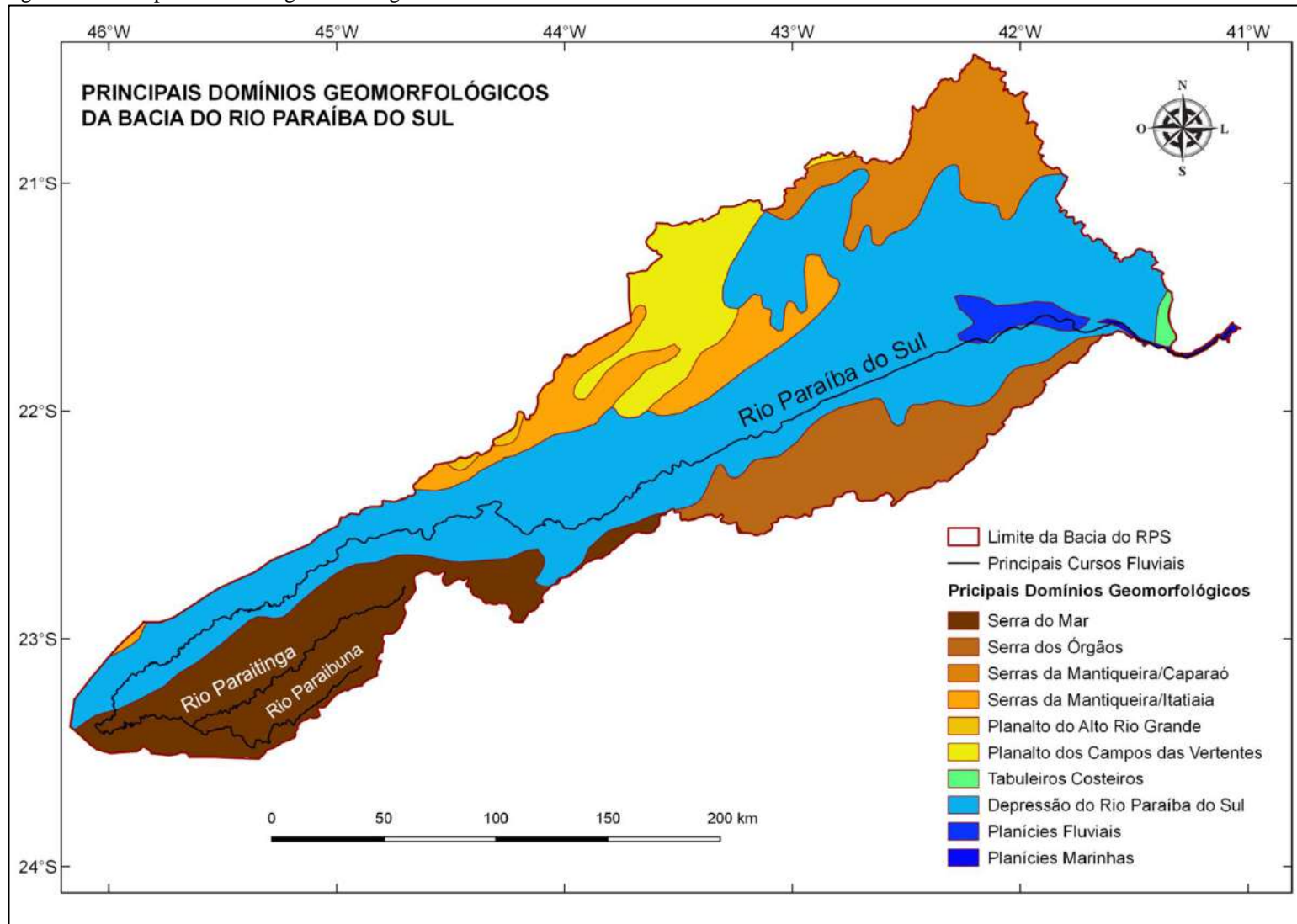
Ao longo da Depressão do RPS (Figura 9), o *clima tropical subquente úmido* com 3 meses secos segue dominando até quase metade do curso médio inferior (Figura 10), a partir de onde há ocorrência do *clima tropical subquente semi-úmido* com 4 a 5 meses secos num pequeno trecho; logo em seguida observa-se a presença marcante do *clima tropical quente semi-úmido* com 4 a 5 meses secos até o final do curso médio inferior e a primeira metade do curso inferior (Figura 10), onde predominam as planícies fluviais (Figura 9). A última metade do curso inferior, caracterizada pelas planícies marinhas (Figura 9), é dominada pelo *clima tropical quente úmido* com apenas 3 meses secos, graças à proximidade do litoral (Figura 10).

Em função dos diferentes tipos climáticos predominantes ao longo do RPS (tropical mesotérmico úmido próximo à nascente, tropical subquente na porção central e tropical quente próximo à foz), ocorre um aumento gradual das temperaturas médias e uma diminuição das chuvas da nascente em direção à foz (exceto bem próximo à foz, em que há aumento da pluviosidade devido à influência do mar). Essa variação climática permite dividir a bacia em dois setores principais:

- a) uma porção a oeste, mais chuvosa e fria;
- b) outra porção a leste, mais seca e quente.

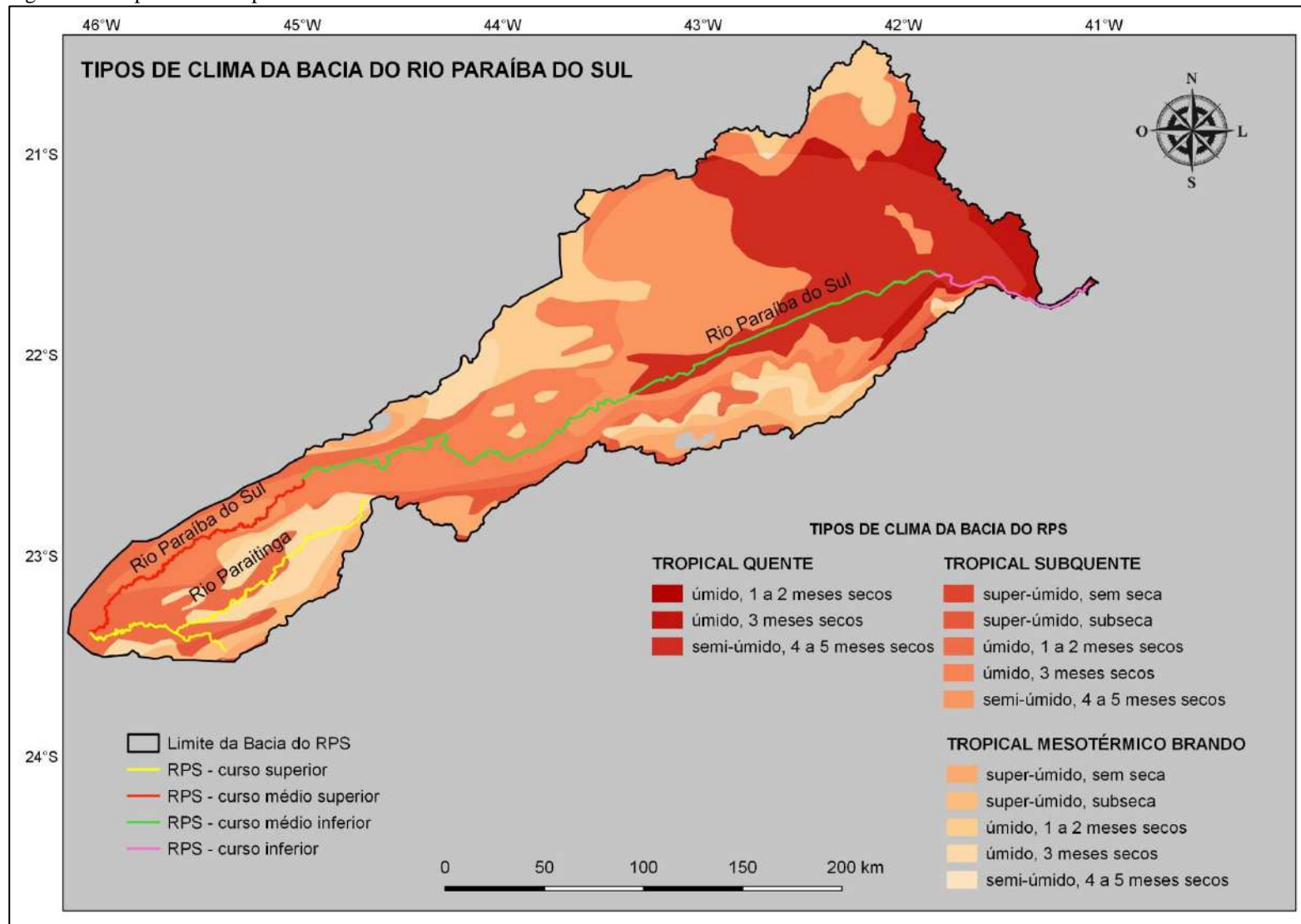
Toda a BRPS está sob a influência das chuvas de verão, que se concentram principalmente nos meses de novembro a março, com precipitações acumuladas de 200 a 250 mm/mês. Os meses mais secos ocorrem no inverno austral, de junho a setembro, quando as precipitações médias mensais ficam em torno de 50 mm (Figuras 11 e 12). Em função do padrão sazonal das chuvas, o regime hidrológico da BRPS possui também uma dinâmica sazonal, com vazões menores durante o inverno (de junho a setembro), atingindo valor mínimo de 180 m<sup>3</sup>/s na foz, enquanto as maiores vazões ocorrem no verão (de novembro a março), chegando a 4400 m<sup>3</sup>/s na foz (SOUZA et al., 2010; VALÉRIO; KAMPEL, 2013).

Figura 9 – Principais domínios geomorfológicos da BRPS.



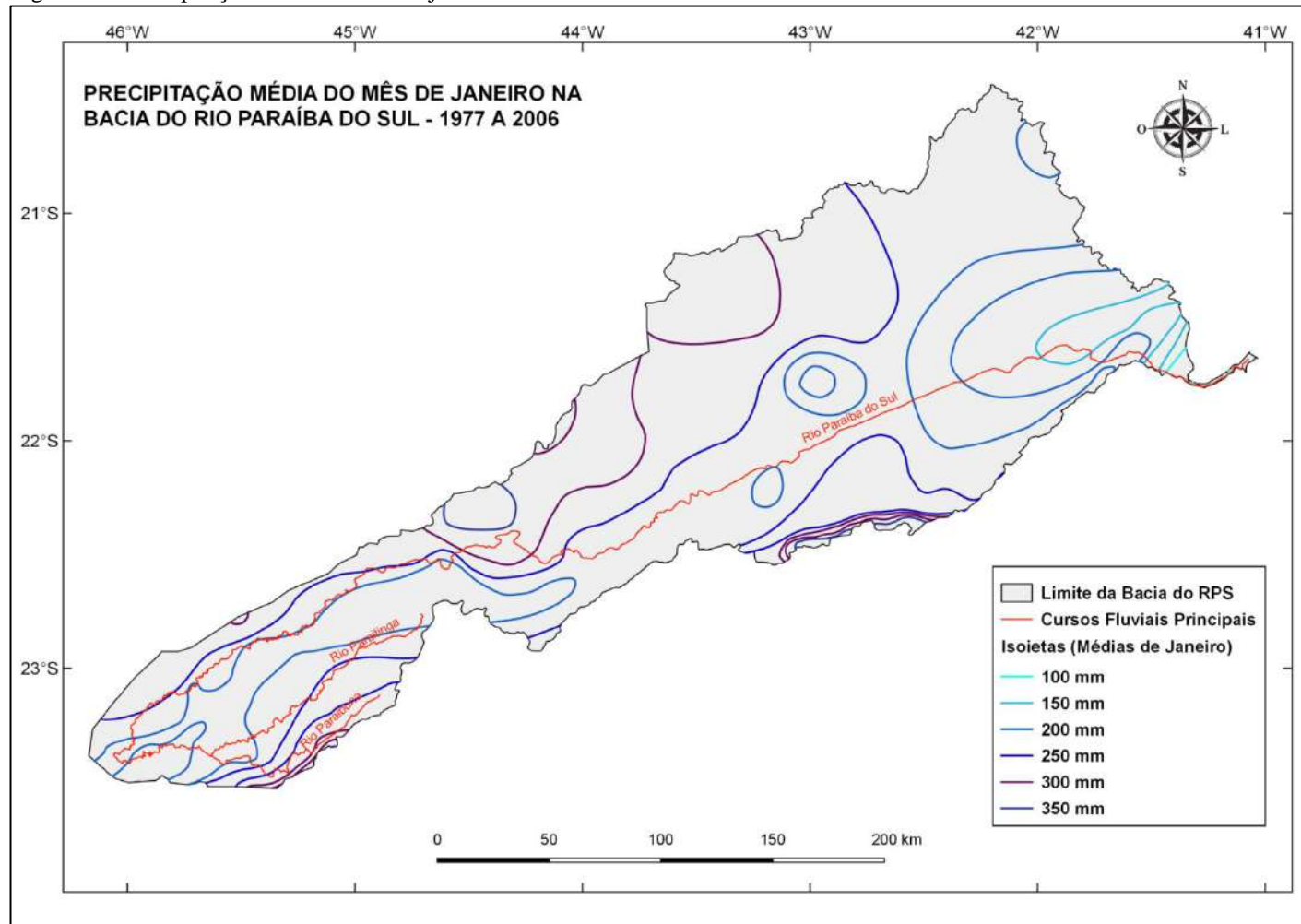
Fonte: Elaborado a partir de dados da base temática vetorial do IBGE, 2016.

Figura 10 – Tipos de clima presentes na Bacia do RPS.



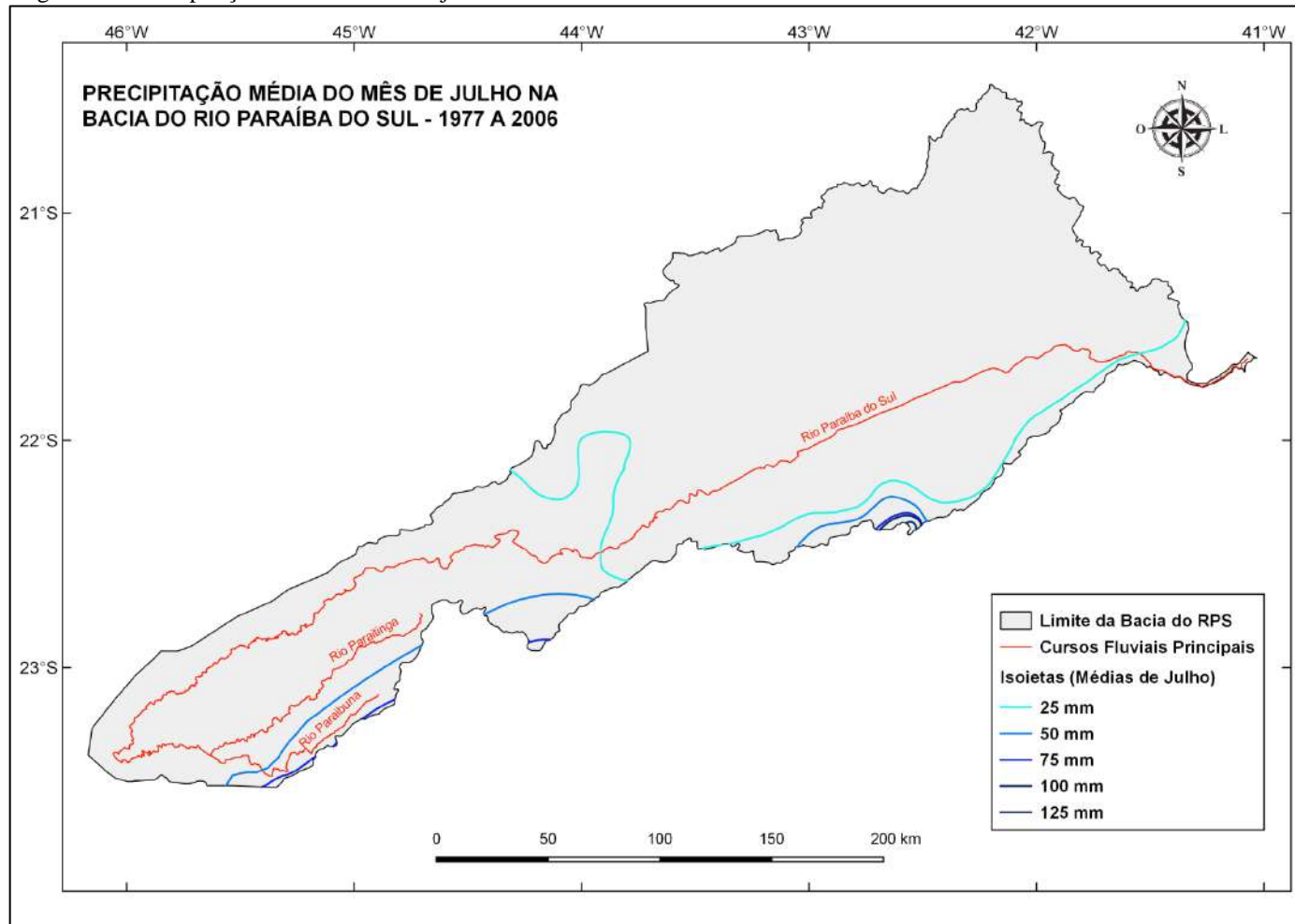
Fonte: Elaborado a partir de dados vetoriais do IBGE, 2016.

Figura 11 – Precipitação média do mês de janeiro na BRPS.



Fonte: Elaborado a partir de dados de isoietas médias do mês de janeiro referentes ao período de 1977 a 2006, da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, 2016.

Figura 12 – Precipitação média do mês de julho na BRPS.

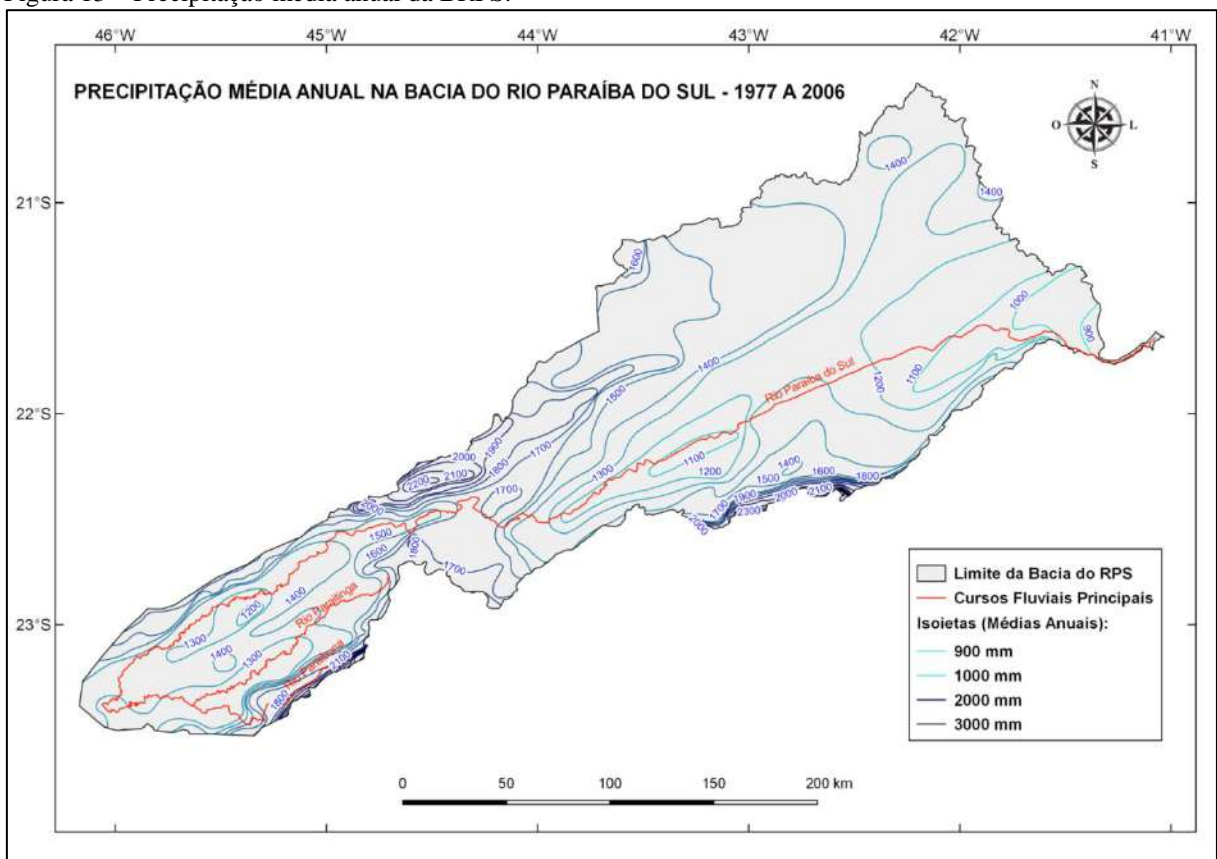


Fonte: Elaborado a partir de dados de isoietas médias do mês de julho referentes ao período de 1977 a 2006, da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM, 2016.

As máximas precipitações ocorrem nas extremidades da bacia, nos pontos de maior altitude, como o trecho paulista da Serra do Mar, o maciço do Itatiaia (RJ) e a Serra dos Órgãos, trecho da Serra do Mar que acompanha a região serrana do estado do Rio de Janeiro (Figura 9). Nesses locais, as precipitações médias anuais podem ultrapassar 2000 mm anuais (Figura 13) e as temperaturas atingem valores inferiores a 10°C (IBGE, 2016). Já os menores índices pluviométricos ocorrem no trecho do vale do Paraíba localizado entre os municípios fluminenses de Vassouras e Cantagalo, correspondente à porção do curso médio inferior, onde a precipitação média anual apresenta valores entre 1000 mm e 1250 mm (Figura 13).

Quanto ao regime de ventos, no vale do RPS predominam períodos de calmaria. Os ventos, quando ocorrem, são predominantemente de NE, intercalados, eventualmente, com ventos de SE ou SO. Geadas esporádicas podem ocorrer em decorrência da diminuição das chuvas e abaixamento da temperatura nas porções mais elevadas da bacia (CEIVAP, 2014).

Figura 13 – Precipitação média anual da BRPS.



Fonte: Elaborado a partir de dados de isoietas médias anuais do período de 1977 a 2006, da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, 2016.

### 2.3 Domínios de vegetação e uso do solo na BRPS

Segundo o mapeamento da vegetação brasileira realizado na década de 1990 (IBGE, 2016), que adota um sistema de classificação adaptado a um modelo universal, na área da BRPS predomina vegetação do tipo secundária onde são praticadas atividades agrárias, e as florestas nativas remanescentes são predominantemente dos tipos estacional e ombrófila (Figura 14). Essas florestas – após décadas de devastação resultante das práticas advindas da monocultura do café – estão hoje resumidas a cerca de 10% de sua cobertura original e são encontradas principalmente nas partes mais altas do relevo das Serras do Mar e da Mantiqueira, nas extremidades da área da bacia (Figuras 9 e 14).

Tanto as florestas estacionais como as ombrófilas são partes do bioma Mata Atlântica, originalmente presente ao longo de toda a costa atlântica brasileira e hoje reduzido a menos de 7% de sua área original (IBGE, 2016). As florestas ombrófilas, típicas de clima mais úmido, ocupam a maior parcela dos remanescentes florestais, presentes ainda nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Já as florestas estacionais, presentes nas áreas onde o clima é mais seco nos meses de julho a setembro, ocupam principalmente uma pequena área na porção norte do estado fluminense (Figura 14).

Mesmo estando tão reduzidas, as florestas da bacia continuam sendo destruídas, principalmente para a extração de madeira e lenha ou, ainda, por incêndios naturais ou criminosos. Minas Gerais é o maior estado explorador de florestas para carvão vegetal, sendo o responsável por mais da metade do que foi extraído em todos os estados brasileiros no período de 1990 a 1997. Nesse período, no trecho mineiro da bacia foram extraídos 85.000 toneladas de carvão vegetal das florestas nativas, valor superior ao da extração de 13 estados brasileiros juntos, incluindo os da Região Norte, exceto o Pará, que é o segundo maior produtor de carvão vegetal do Brasil (ANA, 2001).

A atividade econômica que ocupa a maior área da bacia é a pecuária. Atualmente, a atividade pecuária apresenta baixa produtividade graças às técnicas de manejo adotadas, nas quais queimadas são realizadas para renovação das pastagens. As pastagens dominam a cobertura do solo (Figura 15), embora boa parte do que se classifica como pastagem corresponda também a áreas degradadas, com pouca ou nenhuma atividade pecuária.

As atividades exclusivamente agrícolas (lavouras) ocupam menos de 10% da bacia (Figura 15) e, embora ocupem uma pequena área, são caracterizadas por monoculturas recorrentes e uso de fertilizantes e agrotóxicos que degradam os recursos naturais (CEIVAP,

2014). Tanto as atividades agrícolas como pecuárias vêm, nas últimas duas décadas, sofrendo significativa retração, consequência do manejo inadequado dos cultivos e técnicas agropecuárias que afetaram a qualidade e a produtividade dos solos da bacia. Simultaneamente ao declínio dessas atividades verifica-se uma diminuição contínua da população rural. De 1985 a 1995, houve queda de 30% da população rural; hoje, 85% da população da BRPS encontra-se em áreas urbanas (IBGE, 2015).

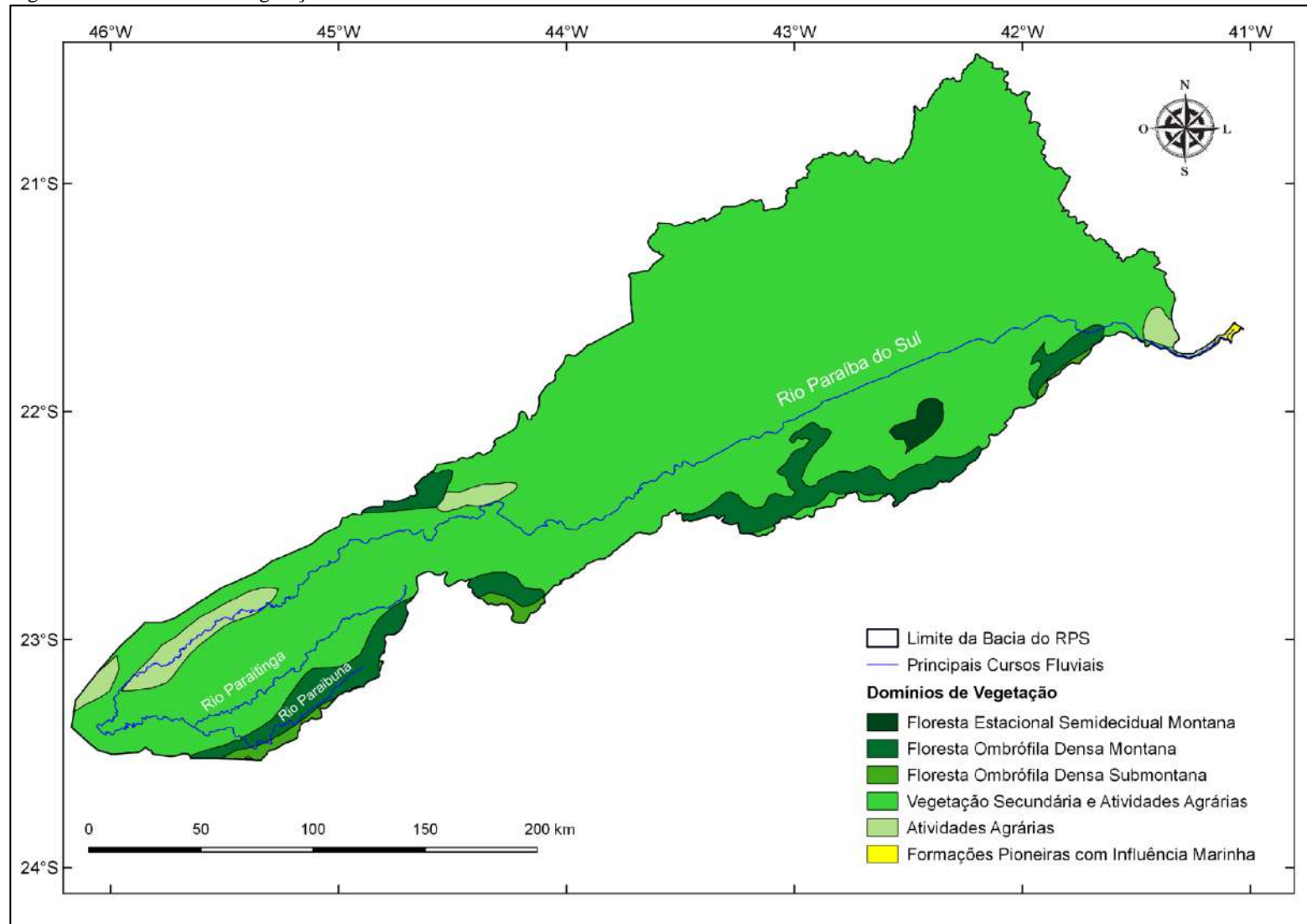
#### **2.4 Vulnerabilidade ambiental da BRPS**

No trecho superior do Vale do Paraíba há um controle satisfatório de enchentes graças aos reservatórios da cabeceira: Paraitinga/Paraibuna (SP), Jaguari (SP) e Funil (RJ). Nesse trecho, as inundações – quando ocorrem – são consequência dos problemas relacionados à drenagem urbana promovida pelos afluentes do RPS e remetem à ocupação das áreas ribeirinhas (que restringem a seção de escoamento), além do despejo de lixo e entulhos (que aceleram os processos de assoreamento dos canais fluviais e contribuem também para aumentar a frequência das inundações). Enchentes provocadas pelas águas do próprio RPS nos municípios localizados na sua porção superior e média são excepcionais, uma vez que o mesmo encontra-se há décadas com sua vazão regularizada.

Porém, em se tratando de inundações urbanas de âmbito local, municípios dos três estados da bacia são afetados. As cheias dos verões de 1997 e 2000 deixaram à mostra os graves problemas existentes na drenagem das bacias urbanas de vários municípios, e revelaram o papel dessas bacias na geração de cheias do próprio RPS. Na cheia de janeiro de 2000, por exemplo, mesmo com todo controle de vazão da barragem de Funil retendo as águas provenientes do trecho paulista da bacia, algumas cidades fluminenses localizadas após a barragem, como Barra Mansa, Volta Redonda e Barra do Piraí, foram severamente afetadas pelas águas do Paraíba (ANA, 2001). Já no trecho inferior da bacia, as inundações são mais recorrentes, principalmente graças à contribuição das águas de afluentes importantes do RPS (como o rio Muriaé). Ali as enchentes afetam principalmente os municípios fluminenses próximos à foz, como Campos dos Goytacazes, Cardoso Moreira, Italva, Itaperuna, Natividade e Laje do Muriaé. A cheia de 1997, por exemplo, cobriu aproximadamente 95% da área urbana de Cardoso Moreira, desabrigando quase 9 mil pessoas (ANA, 2001).

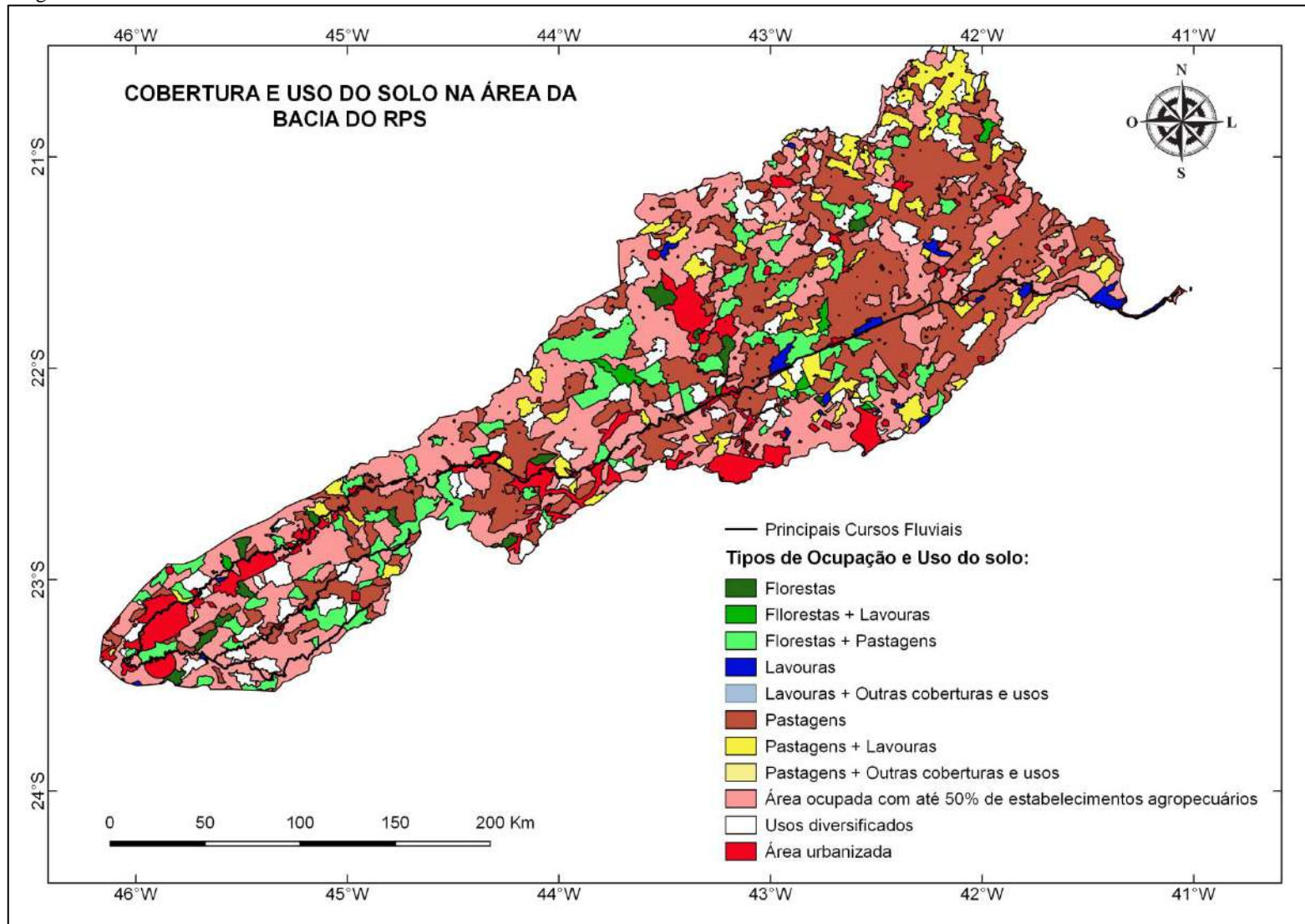


Figura 14 – Domínios de vegetação da BRPS.



Fonte: Elaborado a partir de dados temáticos vetoriais do IBGE, 2016.

Figura 15 - Cobertura e uso do solo da Bacia do RPS.



Fonte: Elaborado a partir de dados temáticos vetoriais do IBGE, 2016.

Além do problema das enchentes, toda a bacia está suscetível à erosão, que ocorre de modo generalizado em praticamente todos os municípios drenados pelo RPS. As causas e consequências dos processos erosivos são muitas. O relevo, dependendo do tipo de solo e das formas de uso a que esteja associado, pode intensificar a erosão, dando origem a ravinas e voçorocas que acabam gerando ou agravando problemas ambientais à drenagem a jusante. Uma área de alta susceptibilidade à erosão poderá ser uma fonte de sedimentos que reduzirão a capacidade de escoamento das águas dos canais fluviais e aumentarão o assoreamento nos reservatórios das barragens. Esses sedimentos poderão, inclusive, agravar os problemas de saneamento, em função da quantidade de lixo e poluentes carregados com os mesmos para os corpos d'água.

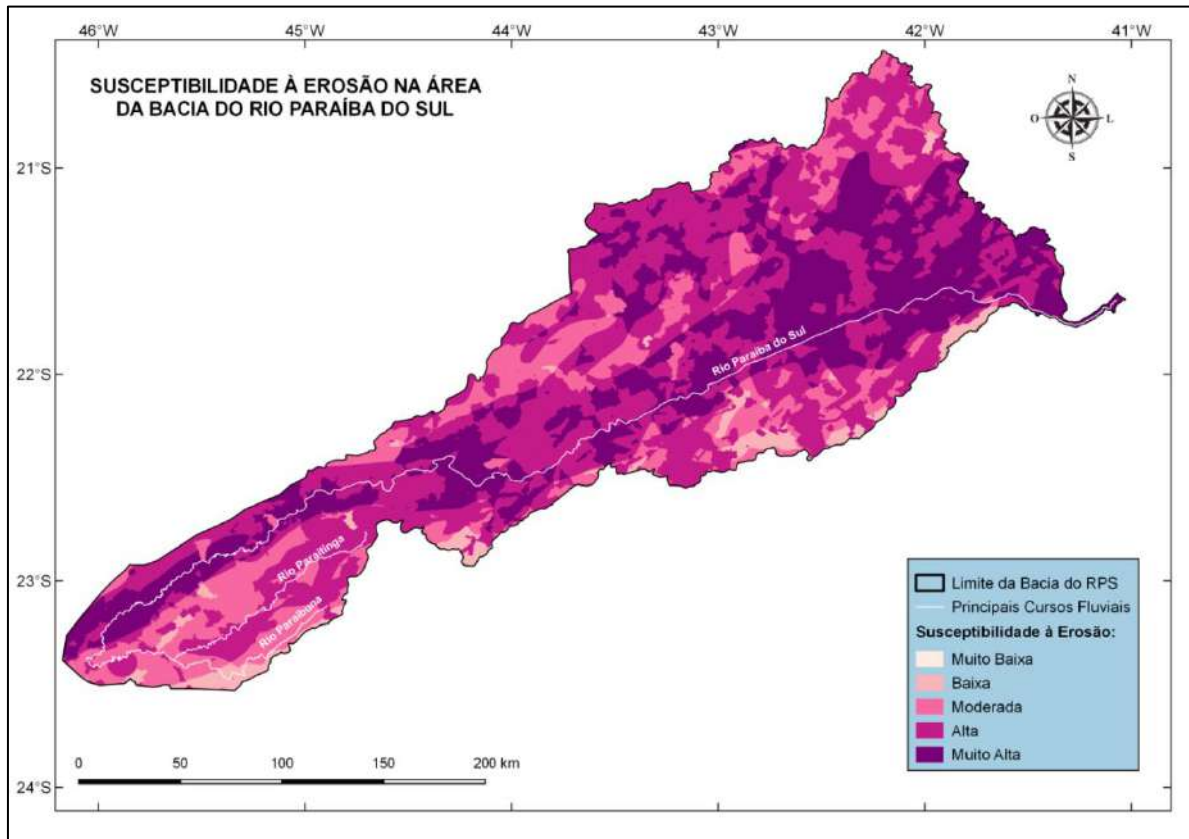
Cruzando informações ambientais espaciais da BRPS foi possível gerar um mapa da susceptibilidade à erosão da mesma. Para isso, foram utilizados mapas digitais (do IBGE) dos componentes do meio físico (tipos de relevo e de solo), de vegetação, e da cobertura e do uso do solo. Aos elementos desses mapas foram atribuídos pesos, de acordo com a susceptibilidade de cada um deles à erosão (definida após consulta a especialistas de cada área). Após o cruzamento dos mapas ponderados, o resultado da adição dos pesos dos elementos permitiu identificar as áreas de maior e menor susceptibilidade à erosão. No produto gerado (Figura 16) observa-se uma significativa parcela da bacia com susceptibilidade moderada a muito alta. A área correspondente à alta susceptibilidade à erosão é de cerca de 1,8 milhão de hectares, aproximando-se consideravelmente das estimativas feitas pela ANA (1,6 milhão de hectares), em seu Livro da Bacia do RPS (ANA, 2001).

Uma das regiões mais críticas quanto à susceptibilidade à erosão é o trecho do RPS localizado nas várzeas paulistas, no curso médio superior (Figuras 7 e 16). Ali, atividades de extração de areia são ostensivas, constituindo um dos maiores problemas ambientais da bacia (ANA, 2001). No curso médio inferior (Figura 7 e 16), a crescente ocupação desordenada das encostas dos morros também contribui para aumentar o fluxo sedimentar para os corpos d'água da bacia. Esse tipo de ocupação em áreas de elevada susceptibilidade à erosão, além de acarretar graves problemas sociais, eleva as chances de ocorrências de deslizamentos, que contribuem com o aumento da carga sedimentar no canal do RPS.

No trecho final do RPS (Figuras 7, 15 e 16), a agropecuária (importante economicamente para aquela região) é responsável pela construção de aterros e diques para conter as cheias e ganhar terras. Nas proximidades da foz, desde a década de 1950, o mar avança constante e paulatinamente sobre o continente. Quase duzentas casas foram destruídas na praia de Atafona (ARGENTO; COSTA, 2005). Segundo o Departamento de Recursos

Minerais (DRM) do Rio de Janeiro, a porção atingida pela erosão é superior a 4 km de extensão. Esse processo tem várias causas: algumas naturais, como as próprias características da costa, relativamente nova e baixa e sujeita à ação incessante das ondas e à forte dinâmica dos ventos, e outras, antrópicas (PATRIANI; CUNHA, 2010).

Figura 16 – Mapa de susceptibilidade à erosão da BRPS.



Fonte: Elaborado a partir do cruzamento de dados de relevo, tipos de solo, vegetação e uso e ocupação do solo da Coordenação de Recursos Naturais do IBGE, 2016.

## 2.5 Os múltiplos usos da água do RPS

As águas do RPS atendem a diferentes finalidades. Dentre seus diversos usos, há aqueles fundamentais para a movimentação de atividades econômicas da bacia e para o abastecimento da população de seu entorno, enquanto outros são voltados para a realização de atividades esportivas e de lazer.

### 2.5.1 Uso industrial

A utilização das águas do RPS e de seus afluentes para uso diretamente nas indústrias e para diluição de efluentes provenientes de processos industriais é intensa, sendo uma das causas da contaminação das mesmas e de sua biota aquática.

Somente na porção mineira da bacia, localizam-se cerca de 2000 indústrias, entre metalúrgicas, químicas, têxteis, alimentícias, de papel e outras. No trecho paulista, há mais de 2500 indústrias, embora menos de vinte sejam as principais responsáveis por 85% da carga química despejada nas águas da bacia. E no trecho fluminense, apesar de existir um parque fabril bem amplo, com mais de 4000 indústrias de transformação, são as siderúrgicas e as metalúrgicas situadas entre Itatiaia e Barra do Piraí as que mais fazem uso das águas do RPS, captando volumes expressivos e lançando a maior carga poluente entre o trecho que vai de Barra Mansa a Volta Redonda. Cerca de 40% das indústrias fluminenses são as responsáveis por praticamente toda poluição industrial lançada nas águas da bacia no estado do Rio de Janeiro. Próximo à foz do RPS há ainda o impacto provocado pelas indústrias sucroalcooleiras (ANA, 2001).

### 2.5.2 Uso agrícola

As águas do RPS e de seus afluentes são utilizadas para irrigação, mas devido à escassez de dados sobre a quantidade de água captada que é declarada pelos agricultores da bacia, não é possível determinar o volume de água utilizado por esse tipo de atividade. Atualmente, com o uso de imagens de satélite, é possível identificar as áreas destinadas à agricultura irrigada, mas o volume de água utilizada que é oficialmente declarado pelos agricultores está muito aquém da que pode ser estimada com ajuda dos satélites.

No estado de Minas Gerais, 80% das lavouras perenes que se beneficiam com a irrigação são representadas pelo café. É prática corriqueira o uso de agrotóxicos nas lavouras sem qualquer tipo de controle, ocasionando, muitas vezes, casos de intoxicação de agricultores e das águas da bacia (ANA, 2001).

No trecho paulista, destacam-se as culturas do arroz, do milho e dos hortifrutigranjeiros. Somente para o cultivo do arroz irrigado no Vale do Paraíba a demanda

média de vazão é superior a 10 m<sup>3</sup>/s para uma área irrigada de 25.000 hectares (ANA, 2001); essa agricultura de várzea representa um risco de contaminação direta dos corpos hídricos por fertilizantes e agrotóxicos, além do aumento de sedimentos para os cursos d'água em função do preparo do solo para o plantio.

No estado do Rio de Janeiro, as principais áreas irrigadas localizam-se no curso inferior do RPS, nas várzeas marginais e na Baixada Campista. Porém, a maior ocorrência de poluição no meio agrícola é registrada nas lavouras olerícolas da Região Serrana fluminense, onde o uso de fertilizantes e agrotóxicos contamina não somente as águas da bacia, mas os alimentos e os próprios trabalhadores do campo (ANA, 2001).

### 2.5.3 Abastecimento de água e saneamento básico

Cerca de 14 milhões de pessoas – 4,85 milhões vivendo nas áreas urbanas da própria bacia e o restante na RMRJ – são abastecidas pelas águas do RPS. Os sistemas de abastecimento de água atendem 96% da população urbana da bacia no estado de São Paulo, 85% no Rio de Janeiro e 90% em Minas Gerais; esse serviço é prestado pelas empresas de saneamento: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE) e Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

Em alguns municípios os serviços são operados pelas prefeituras e carecem de cadastros adequados, de macromedição e de universalização da micromedição de modo geral. Além disso, as tarifas cobradas pelo uso da água nos municípios não atendidos pelas empresas estaduais divergem muito entre si e são normalmente muito baixas ou até mesmo nulas, inviabilizando a possibilidade de autossustentabilidade dos serviços (ANA, 2001).

De modo geral, observam-se elevadas perdas de água na operação de distribuição (em torno de 32%), somados aos problemas de poluição que afetam diretamente a qualidade da água bruta e oneram os custos de tratamento. As redes de coleta e afastamento atendem a 88% da população do estado de São Paulo, 64% do Rio de Janeiro e 75% de Minas Gerais, mas apenas 56%, 35% e 34% das populações dos respectivos estados recebem tratamento de esgoto. Na maioria dos convênios de prestação de serviços de saneamento, as empresas se limitam ao abastecimento de água, negligenciando o tratamento dos efluentes (TRATABRASIL, 2016).

#### 2.5.4 Pesca

A degradação da qualidade das águas da BRPS diminuiu drasticamente seus estoques pesqueiros. A presença de barragens contribuiu ainda mais para essa redução, pois a maioria não possui escadas para a subida de peixes no período da desova. Mesmo nas duas barragens que possuem escadas (Ilha dos Pombos e Anta) esse problema não foi solucionado.

A barragem de Ilha dos Pombos, em operação desde 1924 e construída numa época em que não era exigido o licenciamento ambiental, foi implantada onde antes havia uma cachoeira natural no leito do RPS, utilizada pelas espécies de peixes nativos migratórios (surubim, piabanha, piau, piapara, curimatá, lambari e outros) para subirem durante a piracema. Com a construção do barramento, interrompeu-se a migração das espécies. Para pôr fim à mortandade de peixes que se acumulavam junto à barragem por não conseguirem vencê-la durante a piracema, em 1994 foi instalada um sistema de escadas no local. Essa escada funciona de modo seletivo, permitindo que somente algumas espécies consigam ultrapassá-la para realizar a desova (ARAÚJO; NUNAN, 2005). O mesmo acontece na “escada de peixes” instalada ao lado da barragem de Anta, do AHE de Simplício (Figura 17). Esta também não vem cumprindo seu papel de garantir a piracema realizada por algumas espécies. Segundo relatos de pescadores locais – e confirmados por funcionários de Furnas durante visita técnica às instalações do AHE em 2016 – o número de peixes que consegue subir as escadas vem diminuindo a cada ano. Os que conseguem transpassar as escadas muitas vezes não conseguem retornar após a desova, ficando presos no corredor da mesma.

Ainda assim, a atividade pesqueira na BRPS está presente nos lagos, restingas e manguezais das planícies de seu baixo curso e dos rios Muriaé e Dois Rios (RJ). A pesca esportiva é praticada em toda bacia e até em alguns reservatórios das barragens existentes.

Figura 17 – Escada de peixes da barragem de Anta, AHE de Simplício.



Fonte: A autora, 2016 (fotos tiradas durante visita técnica às instalações de Furnas).

### 2.5.5 Navegação

A bacia não apresenta boas condições de navegabilidade. Embora na segunda metade do século XIX tenha existido uma linha de barcos a vapor no trecho paulista do RPS entre Caçapava e Cachoeira Paulista, a construção de ferrovias e rodovias (como a atual rodovia BR-116) paralelamente ao canal do rio levou ao desaparecimento desse tipo de transporte; hoje, pequenas embarcações pesqueiras estão restritas às proximidades da foz do RPS.

### 2.5.6 Lazer

O uso da BRPS para recreação ocorre em pontos específicos, como nas regiões serranas, nas nascentes de alguns rios, em trechos encachoeirados e nas corredeiras onde é possível a prática de canoagem e *rafting*. Alguns reservatórios de usinas hidrelétricas também são utilizados para atividades de lazer e pesca esportiva.



### 2.5.7 Geração de energia elétrica

Com aproximadamente 1500 MW de potência instalada (ONS, 2013), as usinas hidrelétricas instaladas ao longo da bacia fazem parte do Sistema Interligado Nacional (SIN), gerando energia elétrica, regularizando a vazão do RPS e seus afluentes em diferentes trechos e alterando seu fluxo natural há quase um século.

A capacidade de geração de energia hidrelétrica instalada na BRPS já foi bastante representativa no âmbito nacional, mas hoje corresponde a menos de 2% da potência instalada no SIN (ONS, 2013).

## 2.6 O desenvolvimento econômico e hidrelétrico do Vale do RPS

No período pré-colonial, a maior parte da BRPS era coberta por florestas e ocupada por índios, em sua maioria das tribos tupi e guarani. No início do século XVI, o processo de penetração dos colonizadores portugueses na bacia foi desordenado e não tinha a função de ocupar a terra, mas conquistá-la. Alguns historiadores denominam esse período de “ciclo da caça ao índio”. Os primeiros vilarejos não resistiram aos ataques dos índios e, somente após a intervenção do padre jesuíta José de Anchieta foi possível a “pacificação” entre os colonizadores e os indígenas, já debilitados após vários embates com os portugueses (COELHO, 2012).

A principal atividade econômica nos primeiros anos de colonização do Vale do Paraíba foi a extração do pau-brasil por meio do escambo com os nativos. Já no início do século XVII, o Vale representava um importante corredor comercial, ligando o interior de Minas Gerais, importante centro minerador, ao litoral. Nesse cenário, surgiram as primeiras estradas e pequenos lugarejos que serviam como suporte aos comerciantes ao longo de seu trajeto.

A declividade e a extensão da Serra do Mar constituíram por muito tempo um empecilho à expansão da economia colonial às terras da BRPS, economia esta que até meados do século XVIII caracterizava-se pela monocultura da cana-de-açúcar e pecuária na faixa litorânea do território brasileiro. Nessa época, destacava-se economicamente no Vale do Paraíba a região Norte Fluminense, principalmente as terras da Baixada Campista,

subdivididas em numerosas propriedades agrícolas arrendadas pela Coroa portuguesa a centenas de senhores de engenho.

Porém, no final do século XVIII, o cultivo do café ganhou importância e expandiu-se nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais a partir dos núcleos de apoio das rotas de mineração do interior. As lavouras de café – também baseadas no “tripé colonial” caracterizado pela grande propriedade monocultora, escravista e voltada para atender o mercado externo – rapidamente se expandiram pelas terras do Vale do Paraíba, destruindo boa parte de suas florestas nativas.

Entre 1850 e 1870, o Vale do Paraíba fluminense chegou a ser a maior região produtora de café do mundo. Por volta de 1880, a produção de café no estado começou a entrar em declínio graças ao esgotamento das terras e, no fim do século XIX, o estado de São Paulo já produzia mais café que o estado do Rio de Janeiro (COELHO, 2012).

O método inadequado do cultivo do café (em linhas ao longo das encostas dos morros), as queimadas constantes e o plantio ininterrupto sem um período de recuperação das terras levaram a cafeicultura no Vale do Paraíba à decadência. Simultaneamente a esse processo ocorreu o desenvolvimento da pecuária, que substituiu a agricultura do café e manteve-se como a principal atividade econômica do Vale até meados do século XX.

O ciclo do café foi economicamente mais representativo que o ciclo do ouro, levando a região do Vale do Paraíba a um grande desenvolvimento econômico. A construção de ferrovias e a instalação de iluminação pública atraíram para a região mais investimentos em infraestrutura. Ainda hoje é possível perceber a importância econômica de outrora na imponência dos palacetes rurais dos barões do café presentes no Vale, alguns bastante preservados e transformados em atrações turísticas.

O Vale do Paraíba – assim como outras partes do país – entrou na era industrial em meados do século XX, o que transformou mais uma vez a região. Dessa vez, em menos de 30 anos, a economia e a população deixaram de ser essencialmente rurais para uma condição predominantemente urbana (ANA, 2001).

O início da era industrial no Vale do RPS está intimamente ligado à cidade do Rio de Janeiro, principal centro urbano na época. As primeiras indústrias têxteis foram instaladas próximo ao município, na região serrana fluminense e nos entroncamentos ferroviários como Barra Mansa (RJ) e Barra do Piraí (RJ). Em 1905, foram construídas no Vale do Paraíba as primeiras unidades geradoras de eletricidade, impulsionando ainda mais o desenvolvimento industrial, cujo marco foi a criação, em 1941, da Companhia Siderúrgica Nacional em Volta

Redonda (RJ), atraindo, com a produção do aço, ainda mais indústrias para a região (COELHO, 2012).

### 2.6.1 Os empreendimentos hidrelétricos no Vale do Paraíba

No início do século XX já existiam no Brasil dezenas de pequenas usinas geradoras de energia elétrica a partir de motores a lenha e carvão, além de pequenas hidrelétricas que forneciam energia para os serviços de iluminação pública, atividades de mineração, fábricas de tecidos etc. Essas usinas pertenciam a empresários, comerciantes e, eventualmente, a prefeituras. As grandes usinas geradoras de energia foram construídas no Rio de Janeiro e São Paulo por empresas estrangeiras, como a então canadense, Light (COELHO, 2012).

A Light começou a operar em São Paulo em 1899 e inaugurou, em 1902, a Usina Hidrelétrica (UHE) de Parnahyba, no rio Tietê, com 2 MW de potência. Em 1905, quando o Brasil ainda não era um país industrializado, a Light iniciava a construção da UHE de Fontes, então a maior e mais moderna do país, no município de Piraí (RJ), impulsionando a geração de energia no estado do Rio de Janeiro. O principal objetivo dessa usina era gerar energia elétrica para abastecer o município do Rio de Janeiro (na época, capital da República, com 800 mil habitantes). Para sua construção, todos os equipamentos foram levados de trem do Rio de Janeiro até Piraí, e de lá seguiam de carro de boi até Ribeirão das Lajes, onde a Light construiu a casa de força provisória que abasteceria o canteiro de obras e também forneceria energia para alimentar os bondes do município do Rio de Janeiro enquanto a usina não operasse em plena atividade (COELHO, 2012).

A Usina de Fontes (hoje desativada e conhecida como Fontes Velha) entrou em operação em 1908 e foi a primeira hidrelétrica construída pela Light na BRPS. Junto com outras hidrelétricas construídas posteriormente, a Usina de Fontes integraria o Sistema Light. A potência instalada desta usina era de 24 MW, na época, superior à demanda das necessidades do município do Rio de Janeiro; hoje, essa potência seria suficiente apenas para abastecer um bairro do tamanho do Leme, no mesmo município (COELHO, 2012).

O objetivo inicial do Sistema Light (Figura 18) era o fornecimento de energia elétrica para o município do Rio de Janeiro e sua região metropolitana, e graças ao acelerado crescimento desse município e seus arredores, houve necessidade de construção de cinco

novas usinas hidrelétricas e duas elevatórias na BRPS, ampliando o Sistema (COELHO, 2012):

- a) UHE Ilha dos Pombos (1924), a primeira instalada no canal do RPS, no município de Carmo (RJ), para geração de energia elétrica, com 73 MW de potência instalada, expandidos para 117 MW em 1937;
- b) UHE Fontes Nova (1940), no Ribeirão das Lajes, no município de Piraí (RJ), com capacidade instalada de 132 MW, e cujo reservatório passou a abastecer o município do Rio de Janeiro ainda em 1939;
- c) Usina Elevatória (UEL) de Santa Cecília (1952), no canal do RPS, em Barra do Piraí (RJ), com 17 MW de potência para a transposição de águas do RPS para o reservatório de Santana, no rio Piraí, parte integrante do sistema de transposição para o rio Guandu (em pleno funcionamento a partir da década de 1960, quando o reservatório de Santa Branca passou a integrar o circuito de regularização);
- d) UEL de Vigário (1952), no rio Piraí, no município fluminense de Piraí, com 45 MW, para transposição de águas do rio Piraí para o reservatório de Vigário, também parte do sistema de transposição para o rio Guandu;
- e) UHE Subterrânea Nilo Peçanha (1953), em Piraí (RJ) para geração de energia elétrica; hoje possui 380 MW de potência;
- f) UHE de Santa Branca (1961), que represou as águas do RPS, no estado de São Paulo, formando o reservatório de Santa Branca no município de mesmo nome; essa usina foi construída com o objetivo de regularização da vazão do RPS, garantindo a transposição para o rio Guandu e outros usos de suas águas, como geração de energia;
- g) UHE Ponte Coberta (1962), em Piraí (RJ), posteriormente chamada de UHE Pereira Passos, com cerca de 100 MW de potência instalada. Esta usina, junto com as usinas Fontes Nova e Nilo Peçanha, integra o sistema de transposição de águas para o rio Guandu e é parte do Complexo Hidrelétrico de Ribeirão das Lajes.

Em 2016, a antiga Usina de Fontes (Velha) deu lugar a um novo empreendimento da Light: a Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Lajes, que acrescentou 17 MW à capacidade instalada do Complexo Hidrelétrico de Ribeirão das Lajes, além de aumentar a flexibilidade operacional, auxiliar no controle de cheias no rio Piraí, na melhoria da qualidade da água do Reservatório de Lajes e na modernização de uma adutora da Companhia Estadual de Águas e

Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE) utilizada no abastecimento público da cidade do Rio de Janeiro e sua região metropolitana. Essas obras de modernização foram necessárias, visto que 96% de toda a água consumida atualmente no município do Rio de Janeiro e na Baixada Fluminense passam pelas turbinas do Complexo Hidrelétrico de Ribeirão das Lajes e, desse volume total, 11% (com vazão de 5,5 m<sup>3</sup>/s) são consideradas águas de classe especial, necessitando somente de cloração para se tornarem próprias para o consumo (LIGHT, 2016).

Assim, o Sistema Light, que inicialmente regularizava a vazão do RPS para garantir a geração de energia, tornou-se também fundamental para o abastecimento de água da crescente população da RMRJ, garantindo sua segurança hídrica. Atualmente esse Sistema, que ocupa parte do canal do RPS e também outros rios da bacia, é composto por sete empreendimentos hidrelétricos, duas elevatórias e sete reservatórios (Figura 18).

Além dos empreendimentos hidrelétricos do Sistema Light (UHE Santa Branca, UEL Santa Cecília e UHE Ilha dos Pombos), outros cinco empreendimentos foram construídos diretamente no canal do RPS: UHE Paraibuna, PCH Lavrinhas e Queluz, UHE Funil e AHE Simplício/Anta (Figura 19).

### 2.6.2 A regularização do RPS

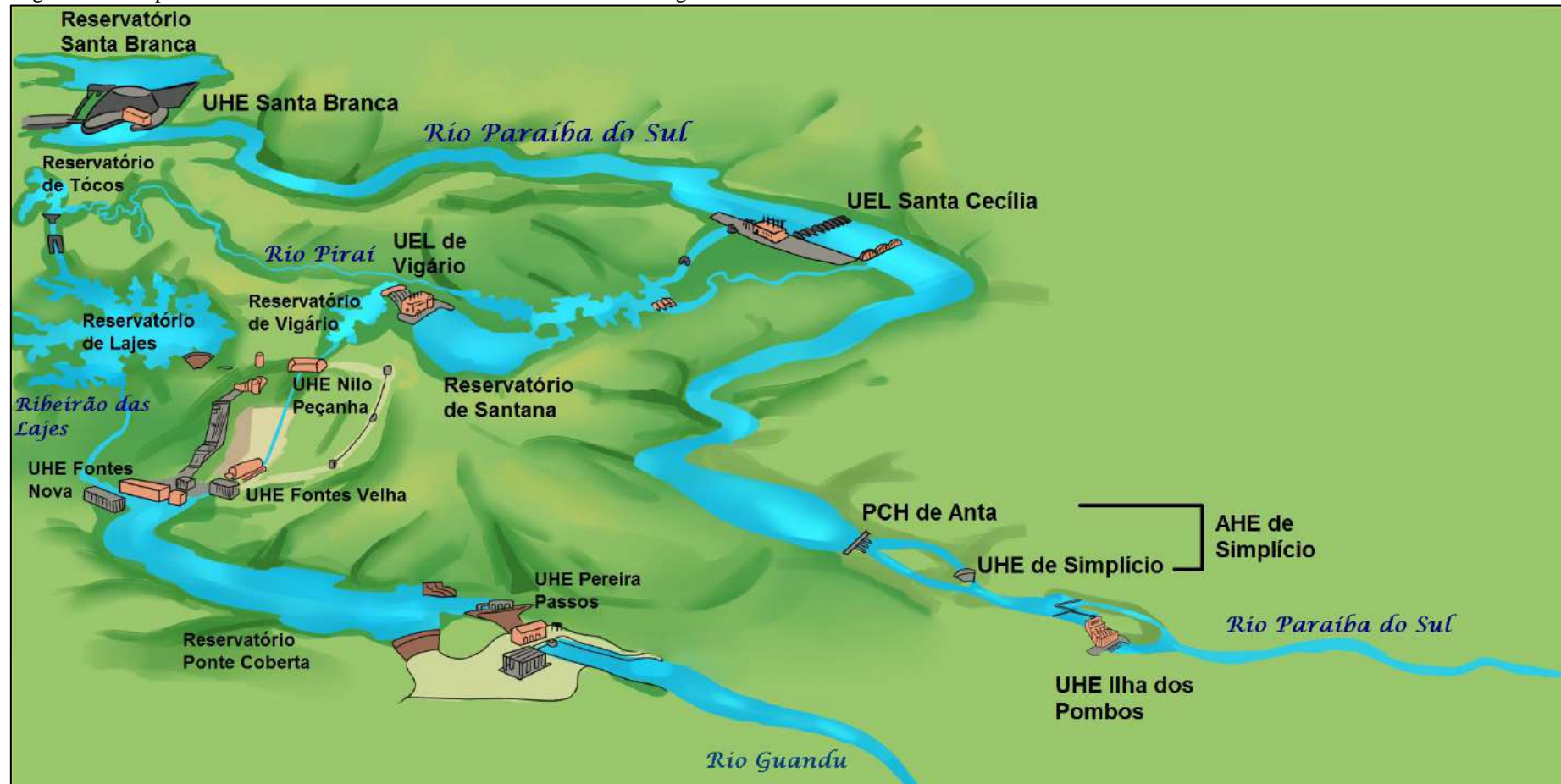
Entre 1905 e 1908, a construção da primeira unidade do Complexo Hidrelétrico de Ribeirão das Lajes gerou destruição das florestas e da vida silvestre da região para acomodar as estruturas hidráulicas e reservatórios, trazendo como consequência para a região um aumento do número de casos de malária. Em 1909, nas cercanias do reservatório de Ribeirão das Lajes, no extinto município fluminense de São João Marcos, ocorreu uma epidemia de impaludismo, levando a Light a contratar o maior sanitarista brasileiro da época, Oswaldo Cruz, para sanar o problema. Ele concluiu que a doença já existia anteriormente à inundação do açude, mas não em caráter epidêmico como estava acontecendo. Esse fato acelerou ainda mais a migração, esvaziando São João Marcos, que desapareceu simultaneamente ao desenvolvimento da infraestrutura para geração de energia elétrica na região (COELHO, 2012). Posteriormente, o crescimento urbano que ocorreu no Rio de Janeiro após as obras realizadas durante a gestão do prefeito Pereira Passos, aumentou a demanda por abastecimento de água na cidade. Como solução, de 1940 a 1943, o reservatório de Lajes aumentou sua capacidade de acumulação para abastecer os habitantes do Rio de Janeiro.

Em função de novo aumento da demanda por abastecimento na RMRJ, a segunda etapa do Complexo Hidrelétrico de Ribeirão das Lajes, realizada de 1952 a 1962, construiu estruturas hidráulicas de transposição das águas do RPS para a vertente atlântica da Serra do Mar. Assim, nesse período, entrou em operação a UEL de Santa Cecília, em Barra do Piraí, com capacidade de bombear água do RPS, que, após vencer uma altura de 15,5 metros, passa através de um túnel de 3,3 km e chega ao reservatório de Santana, segundo barramento do rio Piraí (sendo o primeiro, a montante, no reservatório de Tócos). As águas do reservatório de Santana alimentam (com vazão de 189 m<sup>3</sup>/s) a UEL de Vigário a 35 m de altura, cujo reservatório é preenchido pelas águas de um pequeno afluente do rio Piraí (o ribeirão Vigário), pelas águas do próprio rio Piraí e pelas águas oriundas da transposição (Figura 18).

De Vigário, as águas circulam por um canal até as tubulações que transpõem a Serra do Mar e, por gravidade, alimentam as UHEs de Nilo Peçanha, Fontes (Nova), Lajes e Pereira Passos, no Ribeirão das Lajes (Figura 18). Essas usinas e elevatórias permitiram que a transposição de águas do RPS para a bacia do Ribeirão das Lajes e para o rio Guandu fosse possível.

Já na década de 1950 iniciou-se a captação de águas dos reservatórios do Sistema Light para o rio Guandu, caracterizando-o como um aproveitamento hidrelétrico não convencional. Parte dele é desenvolvida em esquema de transposição de bacias hidrográficas, envolvendo, como citado anteriormente, duas usinas elevatórias (UEL de Santa Cecília e UEL de Vigário, Figura 18) que entraram em operação a partir de 1952 conferindo ao sistema condições de funcionamento e manutenção *sui generis*. No início da década de 1960 entrou em operação o reservatório da UHE Santa Branca (1961), completando o Sistema Light (Figura 18). Esse complexo hidrelétrico foi inicialmente concebido com a finalidade de geração de energia elétrica, mas se tornou um sistema de fundamental importância para a segurança hídrica do estado do Rio de Janeiro, principalmente da capital e sua região metropolitana.

Figura 18 – Empreendimentos hidrelétricos e reservatórios do Sistema Light.

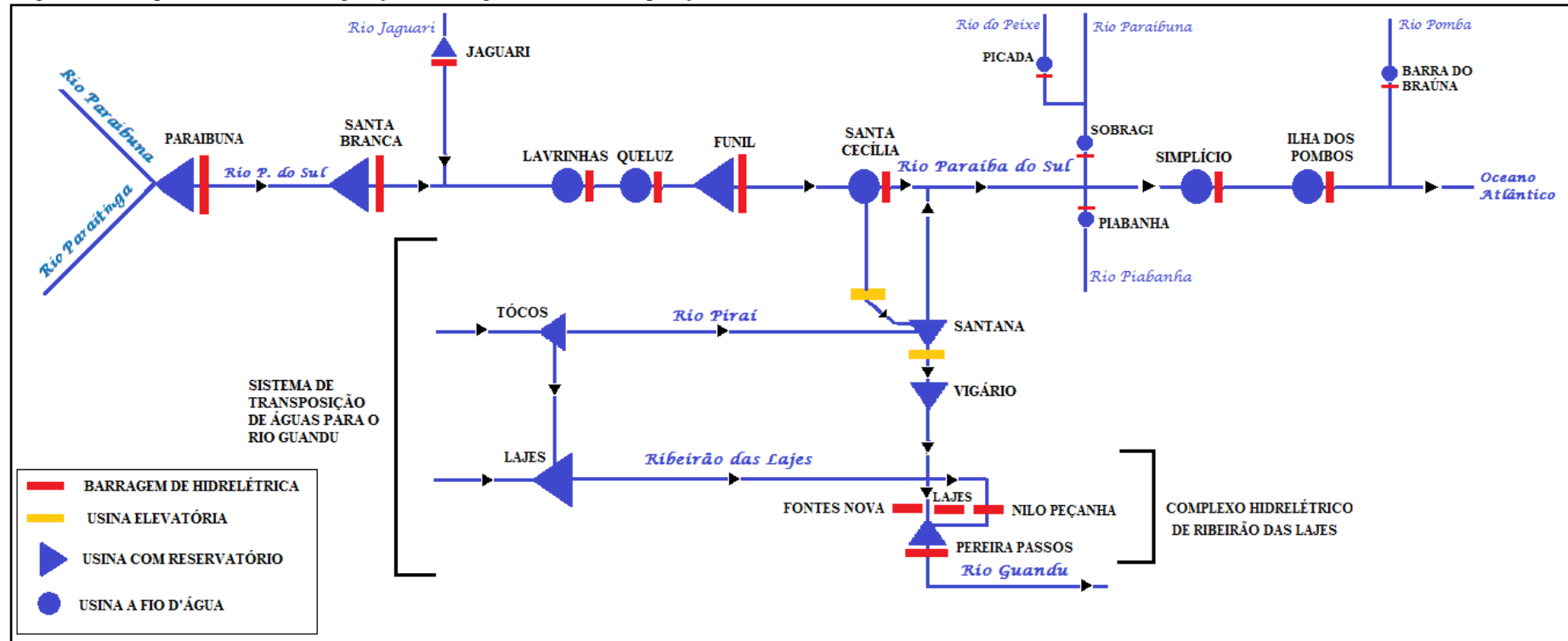


Legenda: UHE – Usina Hidrelétrica; PCH – Pequena Central Hidrelétrica; UEL – Usina Elevatória; AHE – Aproveitamento Hidrelétrico.

OBS.: A PCH de Anta e a UHE de Simplício, embora não façam parte do Sistema Light, foram representadas na figura por estarem localizadas entre os empreendimentos desse Sistema; ambas são integrantes do AHE de Simplício.

Fonte: Adaptado e atualizado de ANA, 2016.

Figura 19 – Esquema hidráulico de geração de energia elétrica e transposição do RPS.



OBS.: Nesse esquema é possível identificar a UHE de Lajes, que substituiu a antiga UHE de Fontes (Velha), no Complexo Hidrelétrico de Ribeirão das Lajes.  
 Fonte: Adaptado e atualizado de ANA, 2016.



Posteriormente, em 1969, entrou em cena o reservatório da UHE de Funil, e na década de 1970, os reservatórios da UHE de Jaguari (1973), no rio de mesmo nome, e o reservatório da UHE de Paraibuna (1977) que, mesmo não integrando oficialmente o Sistema Light, conferem – graças às operações de regularização do RPS – ainda mais segurança à operação de transposição na UEL Santa Cecília, em Barra do Pirai (Figura 19).

Um fato curioso sobre o reservatório de Paraibuna (Figura 7) é que o projeto de engenharia original contemplava a construção de dois reservatórios, um no rio Paraitinga e outro no rio Paraibuna, com o propósito de armazenar água para abastecer as cidades do Vale do Paraíba e o estado do Rio de Janeiro. Como o reservatório de Paraibuna ficaria mais alto que o de Paraitinga, os técnicos decidiram que seria mais prudente construir um pequeno canal ligando os mesmos. No dia da inauguração, com a presença do então presidente Ernesto Geisel, que acionou o mecanismo para detonar parte do morro e, assim, abrir o canal, graças a um erro de cálculo, todo o morro foi destruído. As águas dos dois lagos se uniram e formou-se um único e grande lago com cerca de 200 km<sup>2</sup> no local, cuja profundidade chega, em alguns pontos, a quase 100 metros; o reservatório inundou as melhores propriedades produtoras de leite da região e as terras mais férteis, além de cobrir os municípios paulistas de Natividade da Serra e Redenção da Serra, reconstruídos em outro local. Outra atividade econômica prejudicada após a formação do lago foi a pesca profissional (COELHO, 2012). A diminuição da piscosidade dos dois rios levou a Companhia Energética de São Paulo (CESP) – responsável pelo reservatório – a adotar uma solução paliativa: a reintrodução de espécies de peixes da região (como a piabanha, a piratinga, o curimatá e a piapara) nas áreas alagadas sobre as ruínas dos dois municípios.

Atualmente, além do abastecimento domiciliar da grande maioria da população urbana residente na bacia (cerca de 4,85 milhões de pessoas), as águas do RPS constituem o principal manancial de abastecimento de aproximadamente 8 milhões de pessoas da RMRJ, contribuindo com mais de 80% das águas do rio Guandu (ANA, 2001). A transposição de águas encoraja alguns a dizer – metaforicamente e desconsiderando-se o conceito científico de “foz” – que o RPS possui duas desembocaduras: uma em São João da Barra (RJ), e a outra na Baía de Sepetiba (RJ) onde suas águas são despejadas junto com as do Guandu.

Enquanto a segurança hídrica é garantida para os usuários do rio Guandu, o mesmo não se pode afirmar para os municípios a jusante da UEL de Santa Cecília, que passaram a contar, após o início do funcionamento do Sistema Light, com uma vazão bem mais modesta. Com as obras de transposição, dois terços da vazão do RPS em Barra do Pirai (o que equivale a 160 m<sup>3</sup>/s) passou a ser desviada para abastecer o rio Guandu, enquanto apenas um terço da

mesma (cerca de 90 m<sup>3</sup>/s) passou a fluir no RPS a jusante da UEL Santa Cecília. Essa vazão, em períodos de escassez hídrica torna-se ainda mais reduzida (no máximo 119 m<sup>3</sup>/s para o rio Guandu e 71 m<sup>3</sup>/s para jusante de Barra do Piraí, em direção à foz).

Com a regularização do RPS, o município do Rio de Janeiro adquiriu a segurança hídrica necessária ao seu abastecimento e desenvolvimento industrial, enquanto o ônus da vazão reduzida ficou com os municípios localizados a jusante de Barra do Piraí (RJ) até a foz. O trecho fluminense do Vale do Paraíba que segue de Barra do Piraí até Três Rios, por exemplo – promissor polo industrial na década de 1950 – sofreu com a decadência econômica ocasionada pela diminuição da oferta de água em seu curso principal, atrativo necessário à instalação de indústrias.

#### 2.6.2.1 As regras operativas do Sistema Light e a segurança hídrica do Rio de Janeiro e de sua Região Metropolitana

O Sistema Light, objetivando a regularização das vazões para permitir a transposição das águas do RPS para o rio Guandu, é operado sob regras definidas pelo Governo Federal, que por meio do Decreto nº 68.324, de 1971, aprovou o Plano de Regularização do RPS, considerando os reservatórios de Santa Branca, Jaguari e Funil e autorizando a construção do reservatório de Paraibuna. Esse decreto manteve a autorização concedida anteriormente à Light para desvio das águas do RPS na UEL Santa Cecília até o máximo de 160 m<sup>3</sup>/s e a descarga mínima a jusante da mesma em 90 m<sup>3</sup>/s (defluência). Outro decreto, de 1978, incluiu nas regras operativas a redução – em condições hidrológicas adversas – da descarga mínima a jusante da UEL Santa Cecília. Fundamentado nessas regras, o conjunto de reservatórios do RPS vem sendo operado, desde fevereiro de 1980, com o objetivo de regularizar a vazão afluente à UEL Santa Cecília em 250 m<sup>3</sup>/s em condições hidrológicas normais (160 m<sup>3</sup>/s para bombeamento para o rio Guandu e 90 m<sup>3</sup>/s para jusante em direção à foz), ou em 190 m<sup>3</sup>/s em condições desfavoráveis (119 m<sup>3</sup>/s para bombeamento e 71 m<sup>3</sup>/s para jusante).

Um Decreto Federal de maio de 1996 renovou a concessão de geração e distribuição de energia elétrica do Sistema Light para a empresa, com vistas à privatização da mesma. Esse contrato estabeleceu, dentre vários compromissos, que na operação dos aproveitamentos hidrelétricos que utilizam as águas dos rios Paraíba do Sul e Piraí, bem como do Ribeirão das Lajes, a concessionária deveria manter a vazão do RPS que é desviada para alimentar o rio

Guandu até um máximo de 160 m<sup>3</sup>/s. Além disso, a Light se comprometeu em manter a vazão a jusante da UHE Pereira Passos em valores compatíveis com as necessidades de captação de água do Sistema Guandu, para abastecimento público.

Atualmente, o Sistema Light contribui com menos de 2% da energia elétrica dentro do Sistema Interligado Nacional (ONS, 2013), mas é fundamental para o abastecimento de água para a população do município do Rio de Janeiro e sua região metropolitana. A obrigação de suprimento das "adutoras de Lajes", também conhecidas como "calhas da CEDAE", encontra-se consignada no Contrato de Concessão. Não somente a operação e manutenção das estruturas hidráulicas para suprimento da "calha" são suportadas pela Light, mas também a conservação do Reservatório de Lajes, onde a Light deve realizar um trabalho contínuo de recuperação e conservação da vegetação natural da área de preservação permanente das margens do reservatório. Assim, graças ao decreto assinado, mesmo quando não está operando para gerar energia, a Light realiza o bombeamento de água para abastecimento da capital fluminense e seu entorno.

Em relação ao controle de cheias, ficou estabelecido que a Light deve operar os seus reservatórios de modo a minimizar os efeitos adversos das cheias do rio Piraí, a jusante da barragem de Santana, e participar de empreendimentos associados ao controle de cheias daquele rio e aos usos múltiplos de suas águas e do sistema Ribeirão das Lajes. A complexidade da bacia hidrográfica do RPS e do desvio RPS-Piraí, com a ocupação das margens dos rios pelas comunidades, aumentou a necessidade de maior envolvimento da empresa em atividades de relacionamento com as populações afetadas, desenvolvimento de regras operativas e instruções de operação especiais, bem como a implantação e ampliação dos recursos de monitoramento hidrológico em tempo real.

Porém, pode-se afirmar que, atualmente, a principal contribuição do Sistema Light em relação aos usos múltiplos das águas da BRPS ocorre no atendimento aos requisitos de abastecimento público para a região metropolitana do Rio de Janeiro. E com o compromisso que a Light assumiu de manter a defluência das usinas do Complexo Hidrelétrico de Lajes em valores compatíveis com as necessidades de captação da Estação de Tratamento de Água (ETA) do rio Guandu, a disponibilidade hídrica adquirida por esse rio possibilitou que suas margens fossem transformadas em um importante polo industrial do estado do Rio de Janeiro.

### 2.6.2.2 A regularização em períodos de crise hídrica na BRPS

O sistema de reservatórios de regularização do RPS vem sofrendo, desde a estação chuvosa de 1995-1996, um contínuo processo de deplecionamento devido à ocorrência continuada de condições hidrológicas e meteorológicas adversas e ao atendimento dos múltiplos requisitos de vazão que devem ser garantidos. Com isso, desde 2001, vem sendo conduzida uma operação de economia de água que reduziu drasticamente a energia gerada nas usinas da Light, principalmente as operadas com águas do desvio RPS-Piraí.

De agosto a dezembro de 2001, devido a uma estiagem severa na Região Sudeste, o bombeamento na UEL Santa Cecília foi reduzido de 160 m<sup>3</sup>/s para 130 m<sup>3</sup>/s e a defluência mantida em 71 m<sup>3</sup>/s. No final de 2002, o bombeamento em Santa Cecília foi reduzido para 119 m<sup>3</sup>/s. Por todo este período a defluência foi mantida em 71 m<sup>3</sup>/s. Em abril de 2003, como o volume dos reservatórios pouco se recuperou ao final da estação chuvosa, novamente foi estabelecida a redução do bombeamento para 119 m<sup>3</sup>/s e da defluência mínima para 71 m<sup>3</sup>/s, limites que foram oficializados pela Resolução da Agência Nacional de Águas (ANA) nº 211, de maio de 2003 (ANA, 2003). A persistência do processo de deplecionamento dos reservatórios levou a nova redução das vazões afluentes, de 190 m<sup>3</sup>/s para 160 m<sup>3</sup>/s, aprovada pela Resolução ANA nº 282, de agosto de 2003. Com a recuperação das condições hidrológicas da bacia do RPS ocorrida em 2004, a vazão objetivo em Santa Cecília foi novamente fixada em 190 m<sup>3</sup>/s através da Resolução ANA nº 465/2004 (ANA, 2004).

Em 2014, como medida preventiva para o enfrentamento de nova crise de escassez hídrica que assolou a Região Sudeste naquele ano, a ANA emitiu uma série de resoluções que buscavam preservar os estoques disponíveis de água no reservatório equivalente da bacia do RPS, autorizando a flexibilização da vazão mínima a partir da barragem de Santa Cecília de 190 m<sup>3</sup>/s para 110 m<sup>3</sup>/s, o que durou até de outubro de 2015 (ANA, 2015a).

Após resolução conjunta entre a ANA, o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), de São Paulo, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e o Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA), do Rio de Janeiro, passou a ser considerada como operação normal para o sistema hidráulico do RPS aquela cujas vazões médias diárias são de 71 m<sup>3</sup>/s (com até 5% de variação acima deste valor) a jusante de Santa Cecília e de 120 m<sup>3</sup>/s (com até 2% de variação acima deste valor) a jusante de Pereira Passos, desviada para o rio Guandu (ANA, 2015b).

### 2.6.3 A gestão da BRPS

Sendo o RPS um rio federal, cuja bacia hidrográfica ocupa áreas de três diferentes estados, a gestão integrada de seus recursos hídricos não é tarefa trivial. A primeira iniciativa governamental de âmbito interestadual de gestão da BRPS foi a criação, no final da década de 1970, do Comitê Executivo de Estudos Integrados da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEEIVAP). Esse comitê tinha caráter eminentemente consultivo, com função de sugerir às autoridades federais e estaduais medidas para a recuperação e proteção dos seus recursos naturais simultaneamente ao desenvolvimento econômico da região, de modo a preservar o ambiente, em especial os recursos hídricos indispensáveis à população e suas atividades econômicas. Embora o CEEIVAP tenha tido importância na identificação e proposição de ações para a recuperação da bacia, não houve muito apoio político para a implementação das medidas propostas (ANA, 2001).

Em 1996 foi criado pelo Decreto nº 1.842, da Presidência da República (BRASIL, 1996) o novo Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do RPS (CEIVAP), um marco na implantação de um novo modelo de gestão na bacia e no país, fortalecido pela aprovação, no ano seguinte, da Lei 9.433 (conhecida como “Lei das Águas”). Essa lei instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH), incentivando a criação das leis estaduais de recursos hídricos no Rio de Janeiro e Minas Gerais (RIO DE JANEIRO, 1999; MINAS GERAIS, 1999); em São Paulo, pioneiro na gestão de recursos hídricos, a lei estadual já existia desde 1991 (SÃO PAULO, 1991).

A “Lei das Águas” baseia-se nos seguintes fundamentos (BRASIL, 1997):

- I - a água é um bem de domínio público;
- II - é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;
- V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da PNRH e atuação do SNGRH;
- VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

Após a criação da Agência Nacional de Águas (ANA), em 2000, foi implantada e aprovada pelo CEIVAP a cobrança pelo uso dos recursos hídricos na bacia e, em 2002, foi criada a Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do RPS (AGEVAP). A partir da Medida Provisória 165/04, convertida em lei (10.881/04), a AGEVAP, que é pessoa jurídica de direito privado sem fins lucrativos, por meio do estabelecimento de Contrato de Gestão com a ANA, assumiu, em 2004, as funções de Agência da Bacia do RPS, que deveria exercer até junho de 2016. A Resolução Federal nº 167, de 2015, do Ministério do Meio Ambiente, prorrogou esse prazo até junho de 2026 (AGEVAP, 2016). Atualmente, as decisões da ANA acerca da operação de regularização dos reservatórios do RPS são discutidas no âmbito do Grupo de Trabalho Permanente de Acompanhamento da Operação Hidráulica do Paraíba do Sul (GTAOH) do CEIVAP, que conta com a participação de representantes dos órgãos gestores dos estados de São Paulo (DAEE), Rio de Janeiro (INEA) e Minas Gerais (IGAM).

## **2.7 As barragens do canal principal do RPS**

Dentre os empreendimentos hidrelétricos instalados na BRPS, oito afetam diretamente seu canal fluvial (Figuras 19 e 20 e Quadro 2), seja com barragens que operam a fio d'água, barragens para acumulação de água para geração de energia elétrica ou, ainda, para acumulação e bombeamento de água na operação de transposição do RPS para o rio Guandu (ONS, 2013).

Da nascente do RPS à foz, as barragens instaladas em seu canal fluvial, seguem a seguinte ordem:

- a) Barragem da UHE Paraibuna, SP, instalada em 1977, com reservatório de 224 km<sup>2</sup>, operada pela CESP;
- b) Barragem da UHE Santa Branca, SP, instalada em 1961, com reservatório de 27 km<sup>2</sup>, operada pela Light;
- c) Barragem da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Lavrinhas, SP, instalada em 2011, do tipo fio d'água; sua operação foi concedida à Usina Paulista Lavrinhas de Energia S.A., do grupo empresarial Alupar;
- d) Barragem da PCH Queluz, SP, instalada em 2011, do tipo fio d'água, cuja operação foi concedida à Usina Paulista Queluz de Energia S.A., também da

Alupar;

- e) Barragem da UHE Funil, RJ, instalada em 1969, com reservatório de 39 km<sup>2</sup>, operada por Furnas;
- f) Barragem da UEL de Santa Cecília, RJ, instalada em 1952, com reservatório de 2,7 km<sup>2</sup> para acumulação de água para bombeamento para o sistema de transposição do RPS para o Guandu, operada pela Light;
- g) Barragem de Anta, do AHE de Simplício, RJ/MG, instalada em 2011 e em operação desde 2013, considerada do tipo fio d'água (embora possua reservatório), operada por Furnas;
- h) Barragem da UHE Ilha dos Pombos, RJ, instalada em 1924, do tipo fio d'água, operada pela Light.

Embora os empreendimentos hidrelétricos que possuem reservatórios do tipo fio d'água não acumulem água, alguns empreendimentos deste tipo, o fazem. É o caso do AHE de Simplício, composto por duas usinas (PCH Anta e UHE Simplício), duas casas de força, um vertedouro, uma série de canais, túneis e diques distribuídos ao longo de 30 km e por uma barragem de concreto (Anta), com reservatório, que alagou uma área de 15,86 km<sup>2</sup>.

Quadro 2 – Características das oito barragens instaladas no canal fluvial do RPS, da nascente à foz.

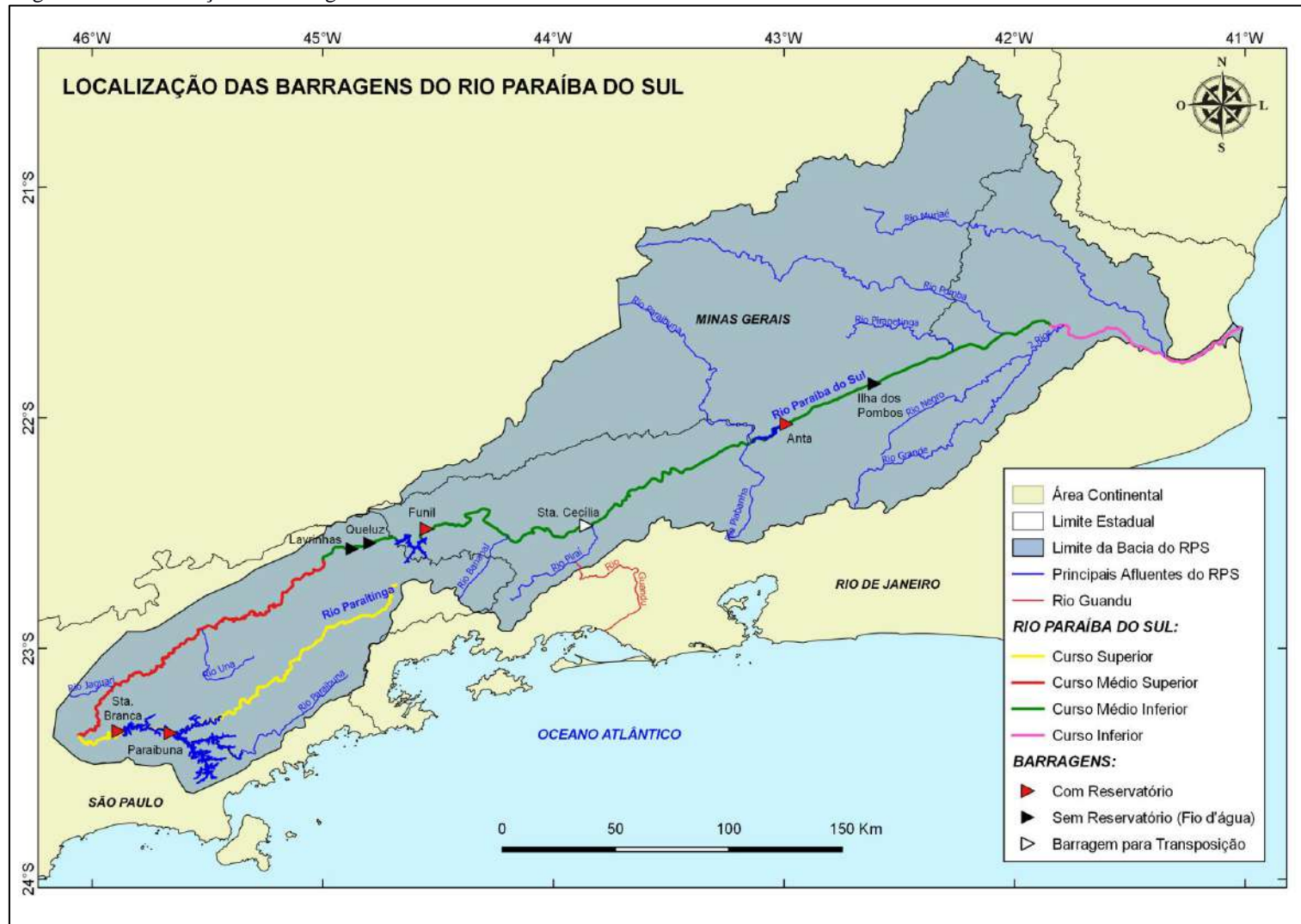
<b>Barragem</b>	<b>Curso</b>	<b>Área Alagada</b>	<b>Objetivo da Obra</b>	<b>Finalidade Atual</b>	<b>Início da operação</b>	<b>Vida útil estimada</b>
Paraibuna	Superior	224 km <sup>2</sup>	Regular a vazão	Regular a vazão e gerar energia	1977	100 anos
Santa Branca	Superior	27 km <sup>2</sup>	Regular a vazão	Regular a vazão e gerar energia	1961	50 anos
Lavrinhas	Médio inferior	Não possui	Gerar energia	Gerar energia	2011	Usina a fio d'água
Queluz	Médio inferior	Não possui	Gerar energia	Gerar energia	2011	Usina a fio d'água
Funil	Médio inferior	39 km <sup>2</sup>	Eletrificação de uma estrada de ferro	Regular a vazão, abastecimento e gerar energia	1969	80 anos
Santa Cecília	Médio inferior	2,7 km <sup>2</sup>	Gerar energia	Abastecimento da Região Metropolitana do Rio de Janeiro e gerar energia	1952	100 anos
Anta	Médio inferior	15,8 km <sup>2</sup>	Gerar energia	Gerar energia	2013	27 anos
Ilha dos Pombos	Médio inferior	Não possui	Gerar energia	Gerar energia	1924	Usina a fio d'água

OBS.: A vida útil se refere às barragens com reservatório.

Fonte: Adaptado de ONS, 2013 e LIMA; BATISTA, 2010.



Figura 20 – Localização das barragens instaladas no canal do RPS.



Fonte: Adaptado de IBGE, 2016.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Lord, Germanoski e Allmendinger (2009) sugerem que para avaliar como os grandes sistemas fluviais respondem aos impactos naturais e antropogênicos a que estão submetidos, seis sinais vitais devem ser analisados (três dos quais se referem à morfologia do canal). Este capítulo descreve essa metodologia – que foi adotada para investigar os impactos causados pelas barragens no RPS – e os materiais que foram utilizados para sua realização.

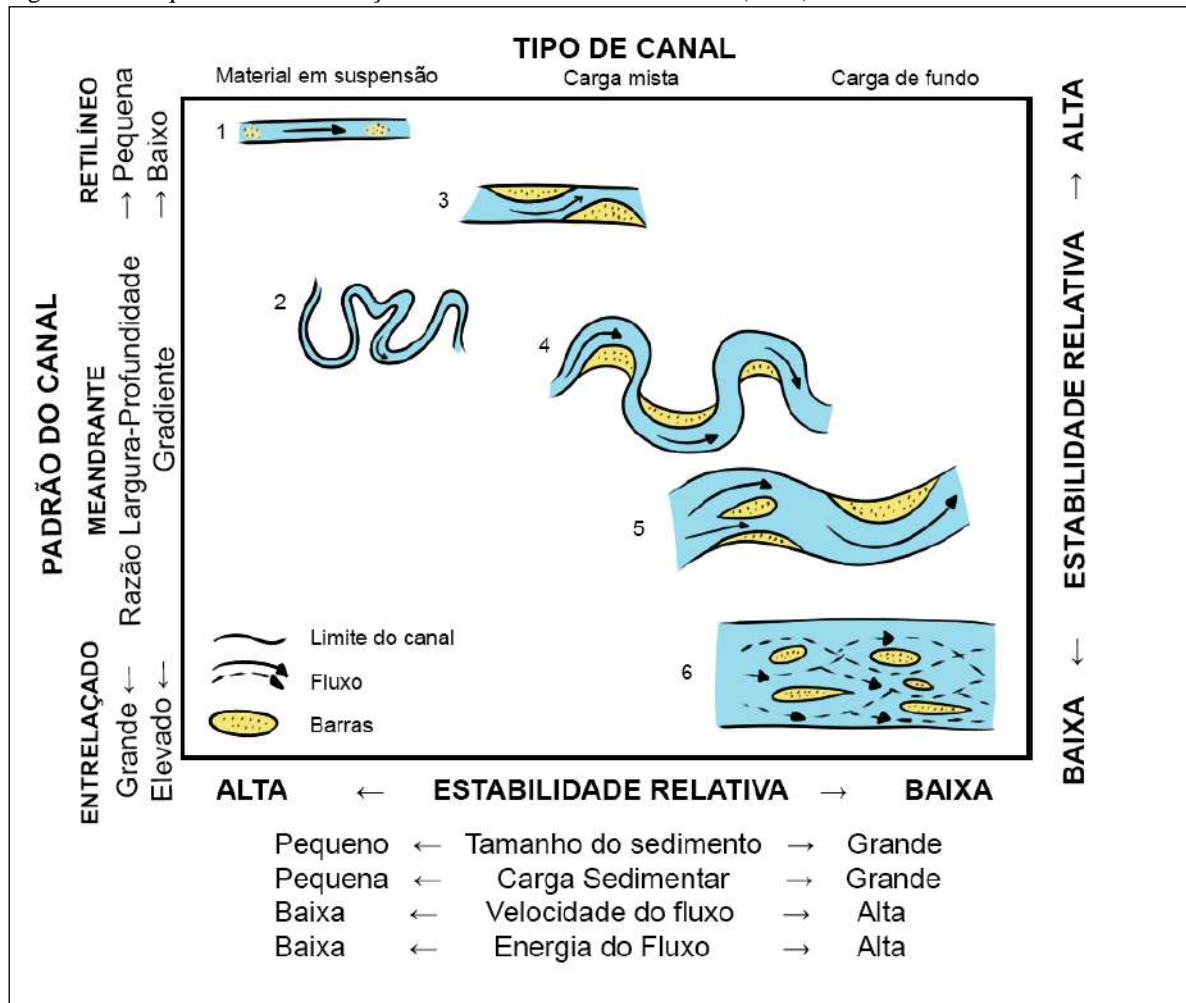
#### 3.1 Metodologia de análise de sistemas fluviais

O tamanho do canal fluvial é determinado pelos fatores hidrológicos da bacia hidrográfica e pela vazão do próprio canal; já o tipo de canal (que pode ser observado na morfologia de vista em planta) e sua morfologia transversal seriam influenciados pelo tamanho e quantidade de sedimentos transportados (CHURCH, 1992). A carga sedimentar transportada varia anualmente e é função do suprimento de material proveniente da bacia hidrográfica e da vazão do rio, podendo ser dividida em três tipos principais: material dissolvido, em suspensão e de fundo. O primeiro tipo representa o material que é transportado em solução; o material particulado em suspensão consiste geralmente de sedimentos finos como silte e argila; e o material de fundo é formado por sedimentos de maior calibre, como areia e cascalho.

Existem vários esquemas de classificação de rios que descrevem os diferentes padrões morfológicos encontrados nos canais fluviais. No modelo de Schumm (1981) os canais fluviais são classificados em três categorias, segundo o tipo de sedimento transportado: canais dominados por material em suspensão, de carga mista e de carga de fundo (Figura 21). Neste modelo os canais fluviais são diferenciados em três padrões conforme suas características morfológicas e o grau de estabilidade relativa: retilíneo, meandrante e entrelaçado. Segundo ele, os canais dominados por material em suspensão, por exemplo, podem apresentar padrões morfológicos totalmente distintos, variando desde um único canal retilíneo com fluxo de baixa energia e pequena razão largura/profundidade até um canal também único, porém

bastante sinuoso com fluxo de energia e razão largura/profundidade baixos, mas relativamente maiores que os do primeiro tipo (1 e 2, respectivamente, na Figura 21). Os canais dominados por material em suspensão são normalmente estáveis quanto à forma que possuem, mas podem migrar lateralmente gerando meandros abandonados.

Figura 21 – Esquema de classificação de canais fluviais de Schumm (1981).



Fonte: Ilustração de SCHUMM, 1981, adaptada por MARINI, 2017b.

Segundo o modelo de Schumm, os padrões dos canais dominados por carga mista variam de retilíneos com barras alternadas (de sedimentos grosseiros) até canais sinuosos com barras de pontal (também de sedimentos grosseiros) (3 e 4, respectivamente, na Figura 21). Eles normalmente possuem maior gradiente e fluxo com energia relativamente maior, maior razão largura/profundidade e transportam mais sedimentos que os canais dominados por

material em suspensão. A migração é mais frequente nos canais de carga mista do tipo sinuoso do que nos canais altamente sinuosos dominados por carga em suspensão.

Finalmente, segundo esse modelo, os canais dominados por carga de fundo possuem baixa sinuosidade, barras de pontal e algumas barras centrais (e até multicanais entrelaçados com muitas barras centrais) (5 e 6, respectivamente, na Figura 21). Esses canais possuem fluxos de maior energia, elevado gradiente e são extremamente dinâmicos, caracterizando-se pela alternância entre a formação e a destruição de barras centrais e intensa erosão de bancos.

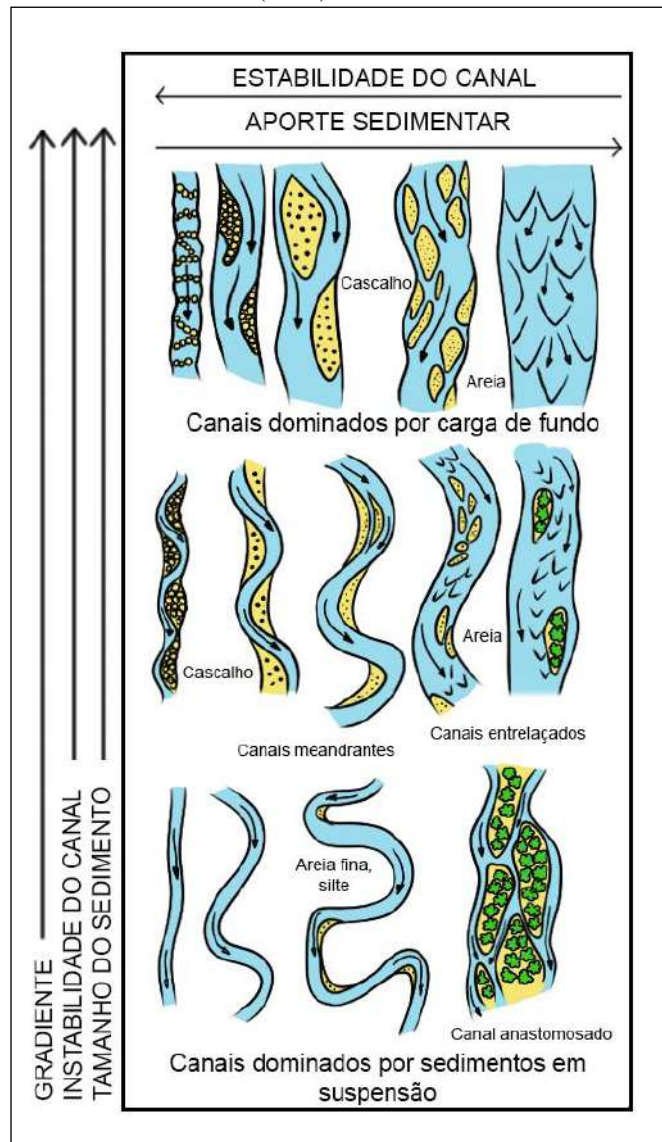
O tipo de canal anastomosado – caracterizado por uma rede de canais que se ramificam e se recompõem novamente ao longo da planície de inundação – não está contemplado no modelo de Schumm. Esse tipo de canal está associado a baixos gradientes e material transportado em suspensão e está representado no modelo de Church (1992), modificado do de Schumm (1981) (Figura 22).

Nos rios do tipo anastomosado, as planícies de inundação entre os multicanais existentes são relativamente permanentes quando comparadas às barras efêmeras dos canais entrelaçados. Os canais individuais dos rios anastomosados apresentam baixa razão largura/profundidade e são normalmente mais estáveis que os multicanais dos rios entrelaçados. Outra característica dos rios anastomosados é que eles apresentam a largura das áreas localizadas entre os multicanais maior que a largura dos próprios canais; essas planícies de inundação são geralmente cobertas por vegetação indicando estabilidade do canal (LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009). É importante ressaltar que cada tipo de canal pode representar uma morfologia de equilíbrio obtida pela interação entre as condições sedimentológicas e hidrológicas de sua bacia hidrográfica. Quanto à instabilidade, apenas analisar a morfologia do canal em um dado momento não é suficiente para afirmar se o mesmo é instável ou não. Cada um dos tipos morfológicos existentes pode representar uma morfologia temporária resultante de um evento de instabilidade (LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009).

Migração lateral ou avulsão do canal (quando o rio passa a fluir por outro caminho) são processos normais e inerentes à dinâmica fluvial e por si sós não são indicadores de instabilidade. Para comprovar a instabilidade de um canal é necessário analisar se o mesmo sofreu, ao longo de um determinado período, mudanças sistemáticas na morfologia transversal (afetando a razão largura/profundidade e/ou a área da secção transversal), no padrão do canal (observado pela morfologia de vista em planta) e/ou elevações significativas no seu fundo

(LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009). Nem todas essas alterações precisam ocorrer para caracterizar a instabilidade de um canal. Por exemplo, a instabilidade pode ser detectada em um canal quando ocorrem mudanças na área de sua seção transversal, mas a razão largura/profundidade e o tipo do canal se mantêm inalterados. Segundo Lord, Germanoski e Allmendinger (2009), um canal pode ser considerado instável mesmo se apenas uma das mudanças citadas acima acontecer, desde que a mesma ocorra sistematicamente.

Figura 22 – Esquema de classificação de canais fluviais de Church (1992).



Fonte: Ilustração de CHURCH, 1992, adaptada por MARINI, 2017a.

Neste trabalho, para análise dos impactos das barragens sobre os processos

hidrosedimentológicos e a morfologia do canal fluvial do RPS foi adotado o Guia de Monitoramento Fluvial de Lord, Germanoski e Allmendinger (2009), que utiliza como referência para classificação de canais fluviais o modelo de Schumm (1981) modificado por Church (1992) (Figura 22) e apresenta protocolos para análise da dinâmica fluvial e identificação de possíveis agentes causadores de instabilidade dos canais.

Lord, Germanoski e Allmendinger (2009) sugerem que para avaliar como os grandes sistemas fluviais respondem aos impactos naturais e antropogênicos a que estão submetidos, seis sinais vitais devem ser analisados (três dos quais se referem à morfologia do canal):

- a) paisagem da bacia hidrográfica;
- b) parâmetros hidrológicos;
- c) parâmetros sedimentológicos;
- d) morfologia de vista em planta (ou superior) do canal;
- e) morfologia transversal do canal;
- f) morfologia longitudinal do canal.

A seguir serão apresentados os detalhes acerca desses sinais, as principais ferramentas utilizadas para avaliá-los, segundo Lord, Germanoski e Allmendinger (2009), e os materiais que foram utilizados neste trabalho para tal finalidade. Os parâmetros hidrológicos e sedimentológicos, graças à interdependência entre os mesmos e com o intuito de facilitar o entendimento e a fluidez do texto, foram agrupados em um único item.

### 3.1.1 Paisagem da bacia hidrográfica

A delimitação espacial da bacia hidrográfica é a primeira etapa a ser realizada antes de analisar a ocorrência de mudanças na paisagem. Mapas temáticos, cartas topográficas e produtos de sensoriamento remoto podem ser úteis nessa fase.

Mudanças na cobertura vegetal, no uso do solo, nas características geológicas superficiais (solos, tipos de sedimentos) e nos gradientes que venham ocorrer na bacia hidrográfica podem afetar diretamente os parâmetros hidrológicos e, conseqüentemente, qualquer outra parte do sistema fluvial, como a morfologia do rio, o transporte sedimentar, a qualidade da água, a frequência das inundações e o habitat dos organismos.

As principais causas das alterações na paisagem de uma bacia hidrográfica são as mudanças climáticas, incêndios, vulcanismo, desflorestamento, uso do solo, construção de estradas e barragens etc. Uma compilação de dados contendo o histórico de interferências antrópicas (construções, atividades econômicas desenvolvidas, desmatamentos etc) e eventos climáticos ocorridos na bacia é importante na compreensão das mudanças na paisagem. E entre as ferramentas atualmente utilizadas para detectar essas mudanças estão as séries históricas de fotografias aéreas e imagens de satélite, que podem ser organizadas em uma estrutura de banco de dados e manipuladas em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), facilitando a identificação de alterações na morfologia dos canais de médios e grandes rios, a ocorrência de deslizamentos, incêndios, desflorestamentos, alterações no uso do solo, instalação de grandes obras, dentre outros (LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009).

Para o estudo da paisagem da BRPS foram utilizados mapas temáticos de vegetação, clima, uso do solo, domínios geomorfológicos, susceptibilidade à erosão e de unidades de conservação. Complementando o estudo da paisagem do entorno do RPS, foram reunidos materiais bibliográficos, fotografias aéreas e/ou imagens de satélite disponíveis da área.

Na delimitação da bacia hidrográfica do RPS foram adotados os limites definidos pela ANA, que utiliza a metodologia baseada em conceitos desenvolvidos por Otto Pfafstetter para construção de sua base hidrográfica. Ela é baseada no tratamento topológico da rede hidrográfica, na determinação das áreas de contribuição por equidistância, na codificação das bacias e trechos e na sistematização de nomes dos rios. Nessa metodologia, não apenas é elaborada a base de dados geográficos propriamente dita, mas também uma implementação computacional dos métodos necessários à construção da mesma, que é constituída de dois temas principais: a hidrografia unifilar e as respectivas áreas de contribuição. Os especialistas da ANA costumam se referir a essas áreas de drenagem individuais como ottobacias, porque são elas que recebem o código desenvolvido por Otto. A codificação de Otto Pfafstetter permite a hierarquização da rede hidrográfica e é um método de aplicação global e fácil implementação computacional que interage bem com os Sistemas de Informação Geográfica (ANA, 2007).

### 3.1.2 Parâmetros hidrológicos e sedimentológicos

A água controla todo o sistema fluvial, conectando todas as partes da bacia hidrográfica. Os parâmetros hidrológicos, ao contrário dos demais sinais vitais – que podem levar décadas para reagir às mudanças – respondem imediatamente a qualquer alteração que aconteça na bacia hidrográfica. Em função disso, a análise dos mesmos é fundamental para o monitoramento de um sistema fluvial; ela é realizada através do estudo da frequência, da magnitude e da duração dos fluxos hidrológicos, correlacionando-os, sempre que possível, a dados pluviométricos, de cobertura vegetal e até mesmo de águas subterrâneas, quando existirem. Alterações nos parâmetros hidrológicos são seguidas por alterações nos parâmetros sedimentológicos que, por sua vez, poderão afetar os padrões morfológicos do canal fluvial (LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009).

O estudo dos parâmetros hidrológicos utiliza séries históricas de cotas e vazões de estações fluviométricas localizadas nos principais cursos fluviais da bacia hidrográfica. Atualmente, várias estações pluvio/fluviométricas ao redor do mundo são monitoradas por órgãos governamentais, universidades e empresas, que normalmente disponibilizam suas séries de dados gratuitamente em meio digital, facilitando o acesso a esse tipo de informação. Quando não há estações fluviométricas na área de interesse ou quando as séries hidrológicas das estações existentes são incompletas, amostragens podem ser realizadas para determinação dos parâmetros hidrológicos de um sistema fluvial. Dependendo do nível de sofisticação da estação que se pretende construir, do tipo de equipamento utilizado, do tipo e frequência das amostragens, da necessidade de equipes de coleta e do monitoramento dos dados, esse processo pode se tornar bastante oneroso (LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009).

Quanto aos parâmetros sedimentológicos, poucos são os rios (Amazonas, Yucon e Zaire, por exemplo) cuja descarga sedimentar sofre pouca ou nenhuma interferência resultante de mudanças na vegetação e na estrutura dos solos advindas de práticas agrícolas e desflorestamento (MILLIMAN; MEADE, 1983). Já as barragens e outras obras que interferem nos fluxos fluviais naturais, independente da magnitude do rio, afetam os processos sedimentológicos (KONDOLF, 1997).

A taxa, a modalidade do transporte de sedimentos, as fontes, os tipos de material



transportado e sua concentração afetam tanto os parâmetros hidrológicos como as características físicas dos sistemas fluviais. Por isso, o levantamento sedimentológico deve estar conectado ao estudo dos outros sinais vitais do sistema fluvial, principalmente aos parâmetros hidrológicos e à morfologia do canal (LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009).

Além de observações de campo, que auxiliam na identificação de eventos relacionados aos parâmetros sedimentológicos, as amostragens diretas – sejam para coleta de material de fundo ou em suspensão – são fundamentais. Os amostradores diretos para determinação de concentração de MPS podem ser do tipo instantâneo, por integração ou por bombeamento. Esses equipamentos podem ser bastante simples (como garrafas e tubos) ou sofisticados (medidores eletrônicos, fotoelétricos, ultrassônicos, a *laser* e até nucleares) (CARVALHO, 2008). Esses dados devem sempre estar correlacionados aos dados hidrológicos e pluviométricos para que se possa ter a real compreensão das causas das alterações observadas.

Produtos de sensoriamento remoto vêm sendo bastante utilizados para estimar a concentração de MPS de canais fluviais, reservatórios e plumas sedimentares na foz de rios, seja por meio de interpretação visual de imagens ópticas, técnicas de classificação ou até mesmo por meio da geração de modelos matemáticos da cor da água (SILVA; NOVO; KRUG, 1996; REIS et al., 2003; TEODORO; VELOSO-GOMES, 2007; VALÉRIO; KAMPEL, 2013; ZOFFOLI; KAMPEL; FONSECA, 2013 e outros).

Para investigar os impactos das barragens sobre os parâmetros hidrológicos e sedimentológicos do RPS, foram utilizados dados de cotas, vazões e concentração de MPS de estações fluviométricas da ANA. A Rede Hidrometeorológica da ANA monitora cerca de 2.176 dos 12.963 mil rios brasileiros cadastrados no Sistema de Informações Hidrológicas, inclusive os fronteirios e transfronteirios. Esses dados, disponibilizados em séries históricas, são classificados, segundo sua qualidade, em brutos ou consistidos (ANA, 2010). Após o levantamento dos dados hidrológicos do RPS, foram selecionadas treze estações fluviométricas em seu canal principal que possuem dados (com qualidade adequada) de períodos anteriores e posteriores à construção das barragens (Figura 23 e Quadro 3). Dessas estações utilizaram-se as séries temporais completas, desde o ano de início das amostragens até 2018.

Simultaneamente à análise dos dados fluviométricos foram analisadas séries de precipitação total mensal de 10 estações pluviométricas localizadas próximo às estações

fluviométricas (Figura 23). Os dados de chuvas são também disponibilizados gratuitamente pela ANA e contribuíram com a análise de consistência dos dados hidrológicos, facilitando a identificação e eliminação de registros espúrios.

Segundo Carvalho (2008), um dos empecilhos à realização de estudos sedimentológicos (que não é exclusividade do Brasil, mas um problema relatado por vários pesquisadores ao redor do mundo) é a carência de amostragens de sedimentos. A vazão é um parâmetro que começou a ser determinado há muito tempo em vários rios pelo mundo, e informações sedimentométricas, mesmo quando realizadas concomitantemente à coleta de informações sobre vazão, sempre foram negligenciadas. Somente a partir do final do século XX e início do XXI que se têm registros de algumas medições sedimentométricas obtidas exclusivamente em levantamentos para tal finalidade. Porém, nas estações fluviométricas em que amostragens de sedimentos são realizadas, nem sempre elas apresentam frequência regular e adequada para uma análise sedimentológica consistente. Ao longo do RPS, por exemplo, das treze estações fluviométricas selecionadas para análise hidrológica, apenas seis apresentaram dados de concentração de MPS com qualidade razoável (Quadro 3). Esses dados foram obtidos por meio de amostragens de superfície da água (ANA, 2010), mas, ao contrário da maioria das séries de cotas e vazões, contêm muitas lacunas e um número irregular de amostragens de um ano para outro. Mesmo apresentando tais problemas, devido à escassez de dados, todas as séries de concentração de MPS existentes foram utilizadas. A inexistência de levantamentos sistemáticos para amostragens de sedimentos de fundo ao longo do canal e na foz do RPS impossibilitaram a investigação e análise estatística desse parâmetro.

Adicionalmente às séries de concentração de MPS da ANA, foram coletadas mensalmente, durante dois anos (de julho de 2015 a junho de 2017), amostras de água para determinação da concentração de MPS em suspensão em dois diferentes pontos do canal do RPS – antes e após a barragem de Anta (Figura 24). Essas amostragens foram realizadas para avaliar se essa barragem vem impactando a concentração de MPS que normalmente fluiria rio abaixo. Em cada amostra foram coletados aproximadamente 500 mL de água (na superfície) por meio de um recipiente lançado ao rio sempre a partir dos mesmos locais (Figura 24): de um pequeno píer de madeira às margens do RPS (ponto pré-barragem) e da ponte de uma antiga linha férrea desativada (ponto pós-barragem).

As amostras foram acondicionadas em caixas de isopor e congeladas logo após a coleta, mantendo-se nesse estado até a filtração. As concentrações de MPS foram obtidas

através do método gravimétrico (McCAVE, 1979). Em laboratório, as amostras foram descongeladas, homogeneizadas e filtradas através de filtros pré-pesados de acetato de celulose com poro de  $0,45\mu\text{m}$ , por meio de bomba a vácuo. Após a filtração, os filtros foram colocados para secagem em estufa a aproximadamente  $50^{\circ}\text{C}$  por cerca de 72h e, posteriormente, colocados em um dessecador por 1 hora antes da pesagem. Esse processo foi repetido de 24 em 24 h, até a obtenção de peso constante. Finalmente, sabendo-se o volume inicial da amostra filtrada e a diferença entre o peso final e inicial de cada filtro obteve-se a concentração de MPS por amostra, em mg/L.

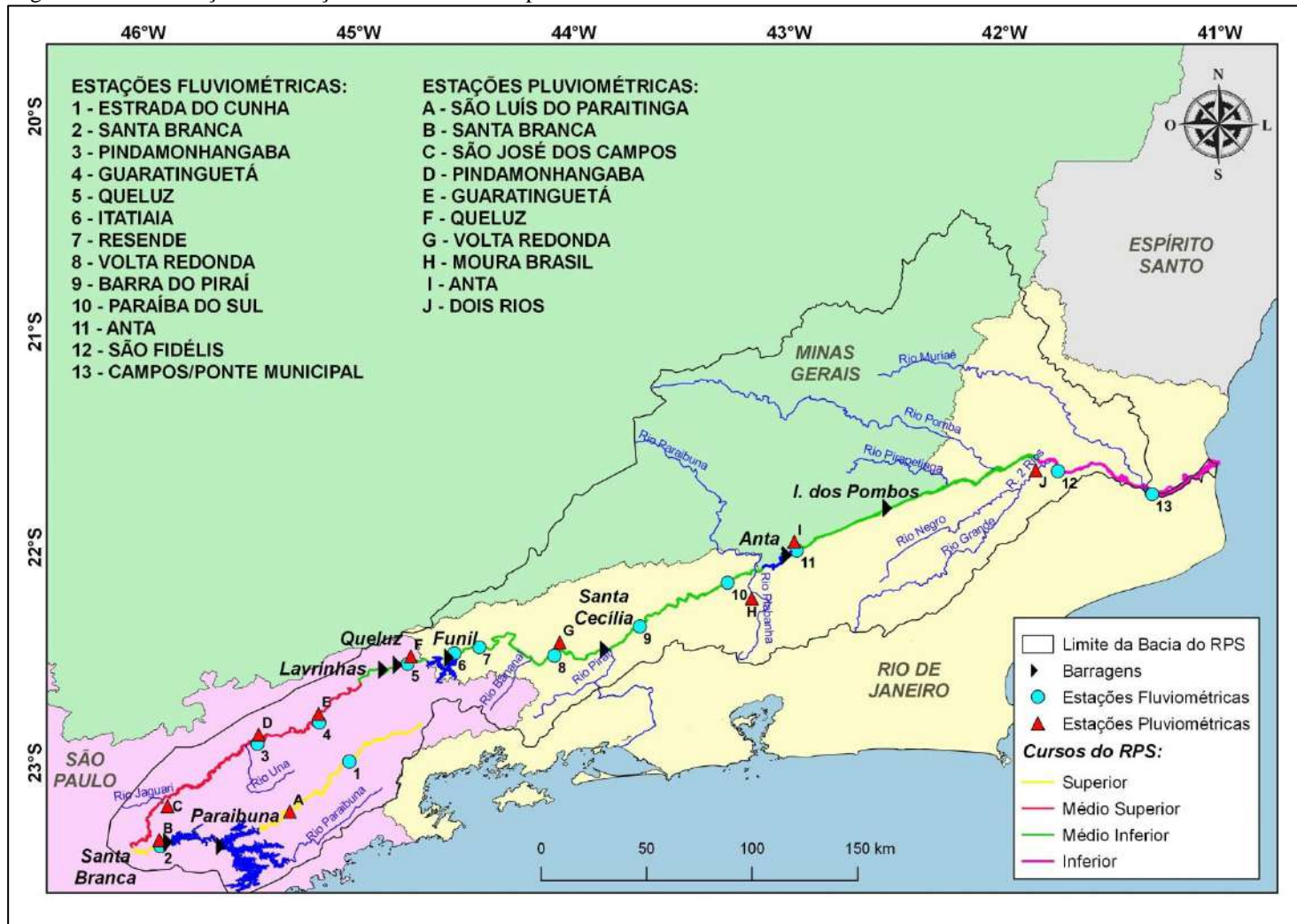
### 3.1.2.1 Análise estatística das séries históricas

Apesar da existência de várias estações fluviométricas na BRPS, vários postos apresentam registros com falhas de instrumentação, alguns foram desativados ao longo dos anos e outros começaram a operar apenas recentemente, o que compromete a identificação de tendências hidrometeorológicas em suas séries temporais (MARENGO; ALVES, 2005).

Foram verificadas a qualidade e a continuidade das séries de cotas e vazões das estações fluviométricas selecionadas para este trabalho e, a partir dos resultados dessa análise de consistência, foram escolhidas aquelas que se mostraram mais adequadas à análise hidrológica; assim, séries de cotas foram selecionadas em algumas estações e séries de vazões, em outras (Quadro 3).

A partir das séries temporais de cotas e/ou vazões (médias mensais) e de chuvas (totais mensais) das estações fluvio/pluviométricas (Figura 23) do canal do RPS, foram construídos gráficos do tipo *boxplot* nos quais foi possível identificar valores discrepantes (*outliers*). Esses dados – que frequentemente indicam erros de medição, descargas anômalas ou são resultantes de intervenções em algum ponto da bacia – foram identificados e, após a confirmação de se tratarem de dados espúrios provenientes de erros de medição, foram removidos das séries temporais. Após a análise de consistência, as séries de vazões/cotas foram representadas em gráficos de linha (hidrógrafas ou hidrogramas) e as de concentração de MPS em gráficos de barras, sobrepostos aos respectivos hidrogramas. Sobre cada gráfico foi plotada a linha de tendência obtida a partir de regressão linear.

Figura 23 – Localização das estações fluviométricas e pluviométricas utilizadas neste trabalho.



Fonte: Elaborado a partir de dados da ANA, 2010 e do IBGE, 2014.

Quadro 3 – Período de amostragem dos dados hidrosedimentológicos das estações fluviométricas do RPS selecionadas para este trabalho.

UF	ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	DADOS	DÉCADA											
			1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010 - 2017		
SP	1 - ESTRADA DO CUNHA	VAZÕES (m³/s)												
		PERFIL TRANSVERSAL												
	2 - SANTA BRANCA	VAZÕES (m³/s)												
		MPS (mg/L)												
	3 - PINDAMONHANGABA	PERFIL TRANSVERSAL												
		COTAS (cm)												
		MPS (mg/L)												
	4 - GUARATINGUETÁ	PERFIL TRANSVERSAL												
		COTAS (cm)												
		MPS (mg/L)												
5 - QUELUZ	VAZÕES (m³/s)													
	PERFIL TRANSVERSAL													
RJ	6 - ITATIAIA	COTAS (cm)												
		PERFIL TRANSVERSAL												
	7 - RESENDE	VAZÕES (m³/s)												
		MPS (mg/L)												
		PERFIL TRANSVERSAL												
	8 - VOLTA REDONDA	VAZÕES (m³/s)												
		PERFIL TRANSVERSAL												
	9 - BARRA DO PIRAI	VAZÕES (m³/s)												
		MPS (mg/L)												
		PERFIL TRANSVERSAL												
	10 - PARAÍBA DO SUL	VAZÕES (m³/s)												
		PERFIL TRANSVERSAL												
	11 - ANTA	VAZÕES (m³/s)												
MPS (mg/L)														
12 - SÃO FIDÉLIS	PERFIL TRANSVERSAL													
	VAZÕES (m³/s)													
13 - CAMPOS PONTE MUNICIPAL	PERFIL TRANSVERSAL													
	VAZÕES (m³/s)													
	MPS (mg/L)													

Fonte: Elaborado a partir de ANA, 2010.

Quadro 4 – Frequência anual de amostragens de sedimentos nas estações fluviométricas selecionadas ao longo do curso fluvial do RPS.

EF	ANO																																		
	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
2																			4	3	4	2	3	1	2	2	4	1	1		4	3	3	2	2
3													4	8	2				3	3	4	4	4	4	4	1	3	2			4	3	3	3	2
7																			3	3	4	4	4	4	3	1									
9								7	3	1	2	6	8	14	7	7	4	4	4	1			3	1	1	2	3		1		4	3	3	3	2
11	1					19	1	18	2	1	3	4	10	10	10	7	4	3								2	2	1		2	4	3	2	3	2
13								2	1		2	3	5	8	9	7	4	3	4	3	4	3	2	2	1	2	2	3	2		1	3	3	3	2

Legenda: EF – Estação fluviométrica

OBS.: A localização e os nomes das estações encontram-se na Figura 23.

Fonte: Elaborado a partir de ANA, 2010.

Figura 24 – Localização dos pontos de coleta de água para determinação da concentração de MPS no entorno da barragem de Anta.



Fonte: Fotografias da autora, 2019, e imagens de satélite de GOOGLE INC., 2017.

Porém, para análise de séries hidrológicas, a identificação da tendência a partir da regressão linear não é suficiente para comprovar o comportamento (crescente ou decrescente) sinalizado. Para verificação da existência de tendência em séries desse tipo são aplicados testes de hipóteses sobre as mesmas (MEDEIROS, 2015).

Os testes paramétricos, bastante utilizados na estatística clássica, exigem que os dados sejam normalmente distribuídos e independentes (que significa, na prática, que conhecer o valor do dado não garante nenhuma informação sobre o valor posterior), e isso geralmente não ocorre em séries hidrológicas. Já os testes não paramétricos são normalmente baseados em *rankings* e sua principal vantagem é que não exigem informações sobre a distribuição das observações; logo, não se baseiam na premissa da normalidade dos dados (MEDEIROS, 2015).

Como em séries hidrológicas as observações não são comumente independentes, utilizam-se sobre esses dados testes não paramétricos para a detecção de tendências (KUNDZEWICZ et al., 2000). Segundo Marengo e Alves (2005), um teste não paramétrico bastante utilizado para determinação da direção e da significância estatística das tendências em séries hidrológicas é o teste de Mann-Kendall, tendo sido, inclusive, adotado por esses autores em seus estudos das sistemáticas tendências negativas das séries históricas de vazões e cotas do RPS desde a década de 1920.

Mann propôs, para uma série temporal de observações  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , uma hipótese nula ( $H_0$ ), na qual o dado pertence a uma população onde as variáveis aleatórias são independentes e igualmente distribuídas. Na hipótese alternativa,  $H_1$ , os dados apresentam uma tendência monotônica no tempo. Assim, sob  $H_0$ , o teste estatístico de Mann-Kendall ( $S$ ) pode ser escrito como (HIRSCH; SLACK, 1984):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

onde

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

Kendall (1975) mostrou que  $S$  é normalmente distribuída e a média ( $\bar{S}$ ) e a variância de  $S$  ( $\text{Var}[S]$ ) para uma situação na qual pode haver valores iguais nos valores de  $x$ , são calculadas por:



$$\bar{S} = 0$$

$$\text{Var}[S] = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18} \quad (2)$$

onde  $p$  é o número de grupos contendo valores iguais na série de dados e  $t_j$  é o número de dados com valores iguais num certo grupo  $j$ .

Assim, um valor positivo de  $S$  indica tendência positiva na qual os dados crescem com o tempo, e um valor negativo de  $S$  indica que a série apresenta tendência negativa, com os dados decrescendo com o tempo. Sabendo-se que  $S$  é normalmente distribuído e tem média zero e variância dada pela equação acima, pode-se checar se a tendência positiva ou negativa é significativamente diferente de zero. Se for,  $H_0$  pode ser rejeitada, apontando para a existência de tendência, e  $H_1$  é aceita (GROPPO, 2005).

Mann e Kendall (1975) mostraram que o valor da estatística  $Z$  numa distribuição normal pode ser dado por:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{(\text{Var}[S])^{1/2}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{(\text{Var}[S])^{1/2}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Num teste bilateral para tendência,  $H_0$  deve ser aceita se  $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$ , onde  $F_N(Z_{\alpha/2}) = \alpha/2$ , sendo  $F_N$  o valor da distribuição normal cumulativa e  $\alpha$  o nível de significância do teste (GROPPO, 2005).

Porém, o teste de Mann-Kendall tradicional assume que a série temporal não apresenta autocorrelação. A autocorrelação (ou correlação serial) é uma medida da correlação de uma variável com ela mesma, com uma defasagem (*lag*) no tempo. Por exemplo, uma autocorrelação lag -1 para uma série mensal é a correlação entre a série e ela mesma com uma diferença (defasagem) de um mês. Quando há autocorrelação em uma série temporal e esse dado é ignorado, os testes para detecção de tendência podem apresentar níveis de significância imprecisos (MEDEIROS, 2015).

Em séries onde há autocorrelação e a sazonalidade está presente, o teste Sazonal de Mann-Kendall é mais adequado. A diferença deste para o teste de Mann-Kendall tradicional é que no teste Sazonal de Mann-Kendall os dados são agrupados dentro de blocos sazonais e em

seguida testados quanto à tendência dentro de cada bloco utilizando um procedimento de hierarquia; em outras palavras, este teste avalia sazonalmente o teste de Mann-Kendall separadamente em cada estação/período e depois combina os resultados (GROPPO, 2005). Na prática, para dados mensais, os valores de janeiro são comparados somente com dados de janeiro, dados de fevereiro somente com fevereiro, e assim sucessivamente.

Séries temporais de chuvas geralmente não apresentam autocorrelação, o que torna, nesses casos, a aplicação do teste de Mann-Kendall tradicional adequado; porém, o mesmo não se pode afirmar de séries hidrológicas, principalmente quando elas apresentam variabilidade de longo prazo resultante da regularização de rios (MARENGO; ALVES, 2005). Nesses casos, após a confirmação da existência de autocorrelação, a aplicação do teste Sazonal de Mann-Kendall seria o mais adequado.

Em função disso, para cada uma das séries de chuvas, de cotas/vazões e de concentração de MPS foi inicialmente gerado o correlograma para detectar a presença de autocorrelação. Na ausência desta, a série foi submetida ao teste de Mann-Kendall tradicional para confirmar o comportamento positivo ou negativo indicado anteriormente pela linha de tendência (gerada por regressão linear) do gráfico da série. Nas séries onde a correlação serial foi detectada, aplicou-se o teste Sazonal de Mann-Kendall.

Para aplicação dos testes não paramétricos para análise de tendências das séries temporais de chuvas, cotas/vazões e concentração de MPS foram utilizados os pacotes da linguagem e do ambiente estatístico integrado R (R PROJECT, 2018), que, assim como os demais programas utilizados neste trabalho, é livre.

### 3.1.3 Morfologia de vista em planta do canal

O estudo da morfologia de vista em planta (ou superior) do canal fluvial permite analisar o padrão, a sinuosidade, a largura, a posição e a morfologia do mesmo. Alterações nos parâmetros hidrológicos e no fluxo sedimentar (como mudanças na vazão, no gradiente e na carga sedimentar) podem modificar a morfologia do canal e até sua estrutura, afetando a qualidade dos habitats fluviais (LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009).

O monitoramento da morfologia de vista em planta dos canais pode ser realizado

diretamente por meio de mapas históricos em escala adequada e/ou de séries de fotografias aéreas ou imagens de satélite de boa resolução espacial. Dependendo do insumo, é possível identificar os trechos do canal onde ocorreram eventos erosionais e/ou deposicionais ou até mesmo identificar os locais onde ocorreram os processos de transporte sedimentar dominantes ao longo do tempo; também é possível determinar algumas alterações nas características morfológicas dos canais, como mudanças na sinuosidade, migração lateral, avulsão, evolução de barras arenosas e ilhas (LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009). Embora o custo de levantamentos aéreos seja elevado, a possibilidade de aquisição de fotografias aéreas de décadas passadas dos acervos de órgãos governamentais, permite o levantamento morfológico pretérito dos canais fluviais; a morfologia recente pode ser analisada também por meio de fotografias aéreas e/ou por imagens orbitais (algumas gratuitas) disponibilizadas digitalmente.

Para analisar a morfologia de vista em planta do canal do RPS foram utilizadas fotografias aéreas das décadas de 1950 e 1960 e da década de 2000 para delimitação da morfologia do canal em épocas anteriores e posteriores à construção de suas barragens.

### 3.1.3.1 As fotografias aéreas utilizadas

A utilização de fotografias aéreas de décadas passadas (anteriores ao advento das imagens de satélite) permitiu a delimitação da morfologia do canal fluvial do RPS e de suas feições como elas eram em momentos anteriores ao represamento e à regularização de fluxo realizada por algumas de suas barragens. Essas fotografias datam das décadas de 1950 e 1960 (Figura 25) e pertencem ao acervo do projeto de Mapeamento Sistemático do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Elas serviram de insumo, após a década de 1960, para a elaboração de cartas topográficas na escala 1:50.000. Porém, a altitude do voo na qual as fotos foram obtidas era, na maioria das vezes, compatível com o mapeamento em escala 1:30.000, 1:33.000 ou 1:35.000, o que caracterizou esse material como uma excelente fonte de dados para a análise em detalhe de toda a extensão do curso fluvial do RPS. Algumas fotografias são compatíveis com o mapeamento na escala 1:60.000, pois foram tomadas em altitudes maiores com a finalidade de recobrimento das regiões não urbanizadas da bacia do RPS, principalmente próximo à nascente. Os voos para tomada das fotos ocorreram entre

maio e agosto, época do ano mais seca na Região Sudeste brasileira e, por isso, ideal para levantamentos aéreos devido à menor nebulosidade.

As fotos aéreas foram cedidas pelo IBGE em papel fotográfico no tamanho aproximado de 23 cm x 23 cm. Para compor o mosaico de fotografias de todo o curso fluvial do RPS, de sua nascente, em Areias (SP), até a foz, foram necessárias 141 fotografias, selecionadas entre milhares de fotografias aéreas existentes no acervo da Mapoteca do IBGE. As fotos não estavam catalogadas adequadamente, o que demandou um tempo considerável para a identificação daquelas pertencentes à região de interesse. Após essa garimpagem, foram selecionadas as fotos de melhor qualidade e, posteriormente, elas foram digitalizadas na resolução de 600 *dpi*. Cada fotografia deu origem a um arquivo (em formato *tif*) diferente, que recebeu uma identificação referente à sua localização no canal do RPS de modo a otimizar a manipulação das mesmas na fase seguinte: a correção geométrica.

Os pontos de controle (*Ground Control Points* ou GCPs) utilizados na correção geométrica foram extraídos de fotografias aéreas mais recentes e ortorretificadas, oriundas dos projetos SP-25 e RJ-25 do IBGE. Nesses projetos foram utilizadas essas fotografias aéreas coloridas ortorretificadas, articuladas por folhas segundo o recorte do Mapeamento Sistemático Brasileiro, com a finalidade de fornecer uma base cartográfica de referência topográfica na escala 1:25.000 que pudesse servir como insumo para mapeamentos diversos. O sistema de referência cartográfico adotado para esses projetos foi o SIRGAS2000, com elipsoide GRS\_1980 e sistema de projeção UTM. Antes de serem utilizadas, foi realizada uma transformação nas fotografias para o sistema de referência WGS-84 (adotado em todas as bases cartográficas deste trabalho), o que facilitou sua articulação com dados obtidos de outras instituições que também utilizam este sistema.

Os voos para tomada das fotografias aéreas dos projetos SP-25 e RJ-25 foram realizados em diferentes anos. Sobre a área correspondente ao curso fluvial do RPS eles ocorreram de 2004 a 2006 (Figura 26), sempre de maio a agosto devido à menor nebulosidade, assim como no levantamento das fotografias aéreas das décadas de 1950/60. Essa coincidência no período do ano em que foram realizados os levantamentos contribuiu para a comparação entre as fotografias aéreas de épocas tão distintas com o intuito de avaliar as mudanças morfológicas do canal fluvial. Cabe ressaltar que as fotografias ortorretificadas foram utilizadas não apenas como fontes de GCPs, mas também como base para o

mapeamento do canal fluvial do RPS e assim, para o conhecimento de sua morfologia mais recente, após o advento da maioria de suas barragens.

Para a ortorretificação das fotografias aéreas de 2004-06, o IBGE realizou campanhas para levantamento de pontos de apoio suplementar compatíveis com a escala 1:25.000. Assim, foram levantados em campo 1.300 pontos GPS (*Global Positioning System*) pelo método de posicionamento relativo estático, de alta precisão. Todos os pontos levantados foram rastreados a partir de pontos da rede fundamental do IBGE, onde o erro médio do ajustamento foi menor que 30 cm, dentro das especificações relativas à escala final de trabalho (1:25.000). As fotos foram ortorretificadas através de processos fotogramétricos analíticos digitais de aerotriangulação em bloco, criação de MDE e retificação, processos realizados no aplicativo SocetSet, da empresa BaySystem. Posteriormente, foram mosaicadas segundo o recorte de folhas do Mapeamento Sistemático Brasileiro, alcançando a resolução final de 1 m (IBGE, 2016).

### 3.1.3.2 A correção geométrica das fotografias aéreas

Devido à resolução espacial final (de 1 m) das fotografias aéreas ortorretificadas pelo IBGE, garantiu-se uma fonte de GCPs confiável para a correção geométrica das fotografias aéreas das décadas de 1950/60. Para corrigi-las, utilizou-se o *software* QGIS (QGIS, 2016); inicialmente foi realizado, nessas fotografias, uma transformação do tipo *Helmert* selecionando-se somente 2 GCPs, com o objetivo de transportá-las para as proximidades da área geográfica correspondente na fotografia ortorretificada. A transformação *Helmert*, que efetua translação, rotação e mudança de escala, aproximou o arquivo *raster* da fotografia de 1950/60 para a posição desejada, facilitando a identificação de GCPs entre estas e as fotografias ortorretificadas e, assim, a etapa seguinte: o georreferenciamento definitivo, tarefa não muito trivial entre fontes de dados cujo intervalo temporal corresponde a quase seis décadas.

No georreferenciamento definitivo foi realizada uma transformação polinomial em cada fotografia aérea de 1950/60 já transformada anteriormente pelo método *Helmert*. Na transformação polinomial, se  $x$  e  $y$  são as coordenadas geográficas de um dado ponto e  $X$  e  $Y$

as coordenadas desse ponto na imagem, para converter  $x$  e  $y$  em  $X$  e  $Y$  estabelece-se uma relação matemática que pode ser traduzida por uma expressão polinomial de 1ª ou 2ª ordem:

$$X = a_0 + a_1x + a_2y \quad (4) \quad \text{Transformação Linear ou}$$

$$Y = b_0 + a_1y + a_2y \quad (5) \quad \text{Polinomial de 1ª Ordem ( } N=1 \text{ ),}$$

ou,

$$X = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (6) \quad \text{Transformação Quadrática ou}$$

$$Y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \quad (7) \quad \text{Polinomial de 2ª Ordem ( } N=2 \text{ ),}$$

onde:

$a_n$  e  $b_n$  são constantes e  $N$  é o grau do polinômio. O número de GCPs que devem ser utilizados é determinado pela expressão:

$$N_{\text{GCP}} = (N + 1)(N + 2) / 2 \quad (8)$$

onde  $N_{\text{GCP}}$  é o número de GCPs e  $N$  é o grau do polinômio.

A qualidade da correção geométrica dependerá do número de pontos de controle utilizados, da distribuição espacial dos mesmos e da resolução da fotografia ou imagem. Para o georreferenciamento das fotografias aéreas, adotou-se a transformação polinomial de 1ª ordem, que modela matematicamente as distorções de escala, o deslocamento e a rotação da imagem para ajustá-la às coordenadas de referência (SOARES et al., 1998). A transformação polinomial de 2ª ordem foi preterida pois nos testes nos quais a mesma foi adotada observou-se, após o processo de correção, maior distorção do canal fluvial em relação àqueles em que a transformação polinomial de 1ª ordem foi utilizada. Tanto na primeira transformação (*Helmert*) como na polinomial foi adotado o sistema de referência WGS84, e o de projeção UTM, zona 23S.

Para a transformação polinomial de 1ª ordem, o número mínimo de GCPs necessários é 3 (nessa transformação,  $N=1$ ; logo, o  $N_{\text{GCP}} = (1 + 1)(1 + 2) / 2 = 3$ ). No entanto, após a realização de vários testes utilizando-se diferentes números de GCPs ao longo do canal principal do RPS, verificou-se que, na correção das fotografias tomadas para mapeamento nas escalas 1:30.000, 1:33.000 e 1:35.000, a utilização de 6 GCPs mostrou-se mais adequada; já nas fotografias originalmente obtidas para mapeamento na escala 1:60.000, o uso de 12 GCPs apresentou melhor resultado. Pontes, cruzamentos de ruas/estradas, entroncamentos viários e outros pontos bem definidos no entorno do canal do RPS foram selecionados como GCPs. A seleção de GCPs nas proximidades do canal fluvial teve como objetivo garantir uma correção

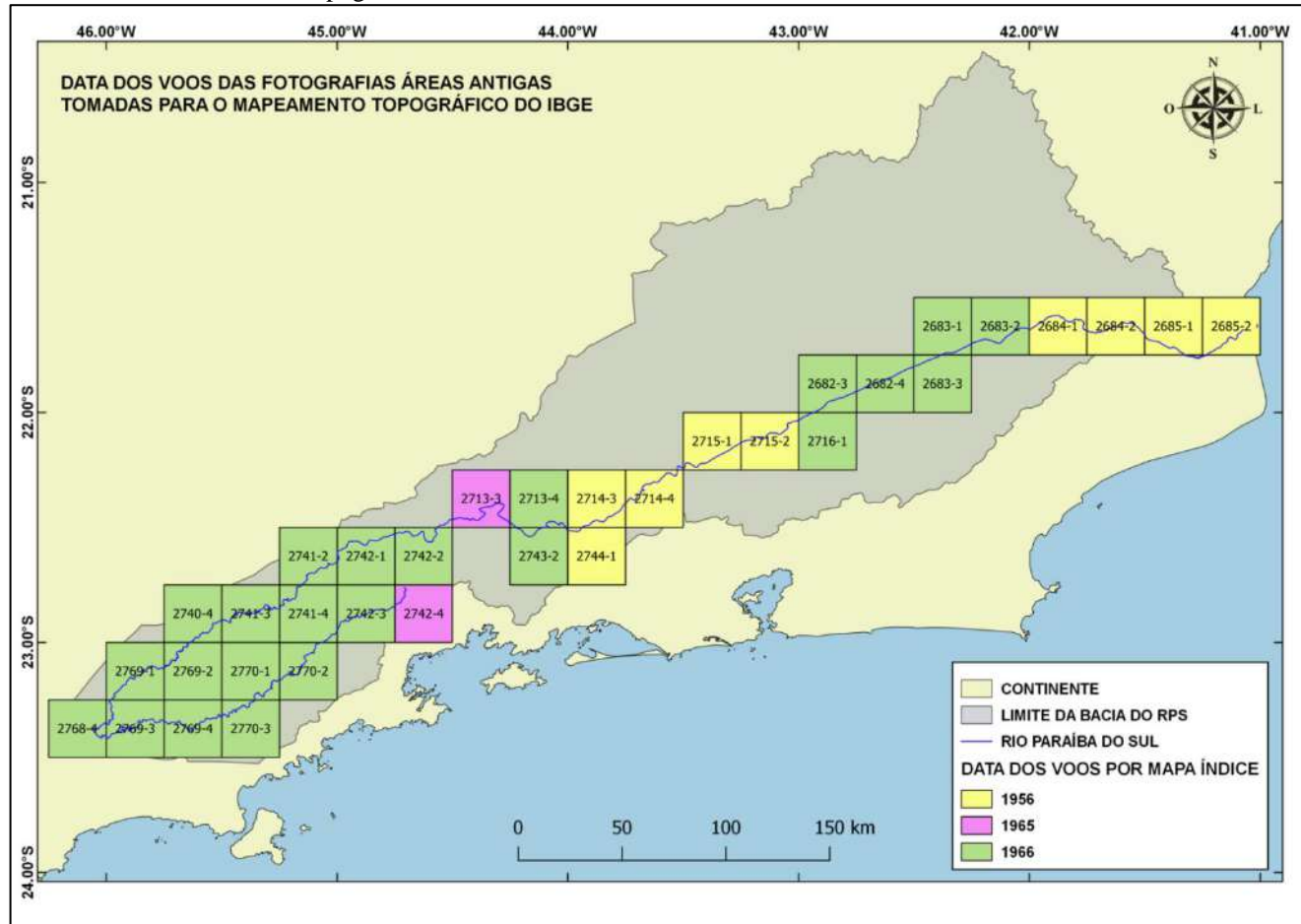
geométrica das fotografias onde os menores erros de deslocamento ficassem concentrados próximo ao canal, assegurando, assim, a qualidade da análise morfométrica do curso fluvial. Essa técnica é semelhante à adotada por Scorpio et al. (2015) em estudos geomorfológicos de rios italianos.

Após o cálculo da nova posição do *pixel*, o valor do nível de cinza (NC) do novo *pixel* foi determinado através do processo de *reamostragem* (ou *interpolação*) vizinho mais próximo; nesse método, o novo valor do NC do *pixel* A será igual ao NC do *pixel* situado à menor distância desse *pixel*; segundo Novo (1995), esse procedimento não altera os NC originais dos *pixels* e apresenta um processamento rápido.

No processo de transformação polinomial, adotou-se como Erro Residual ou Erro Médio Quadrático (RMSE) máximo admissível para o georreferenciamento das fotografias o valor de 10 metros. A maioria das fotografias apresentou deslocamentos médios e máximos abaixo de 7 metros (Quadro 5), garantindo uma qualidade geométrica adequada para realizar a etapa seguinte: a vetorização do canal fluvial do RPS de 1950/60 a partir das fotografias aéreas georreferenciadas.

O valor máximo tolerado para o deslocamento dos *checkpoints* (pontos de verificação de deslocamento diferentes dos GCPs utilizados) foi de 20 metros; quando o RMSE e os *checkpoints* ficaram acima dos limites estipulados, todo o processo de georreferenciamento foi refeito, com escolha de novos GCPs. Em média, o tempo gasto no georreferenciamento de cada foto aérea antiga foi superior a 2 h em função da dificuldade de identificação de feições em comum entre as fotografias antigas e as recentes. Ao final de todo o processo de georreferenciamento, as fotografias necessárias ao mapeamento do canal pretérito do RPS (Figura 27) apresentaram uma conectividade adequada, o que contribuiu com o processo de vetorização do mesmo.

Figura 25 – Data dos voos para tomada das fotografias aéreas das décadas de 1950/60, organizadas por blocos segundo o recorte da folha topográfica escala 1:50.000 do IBGE.

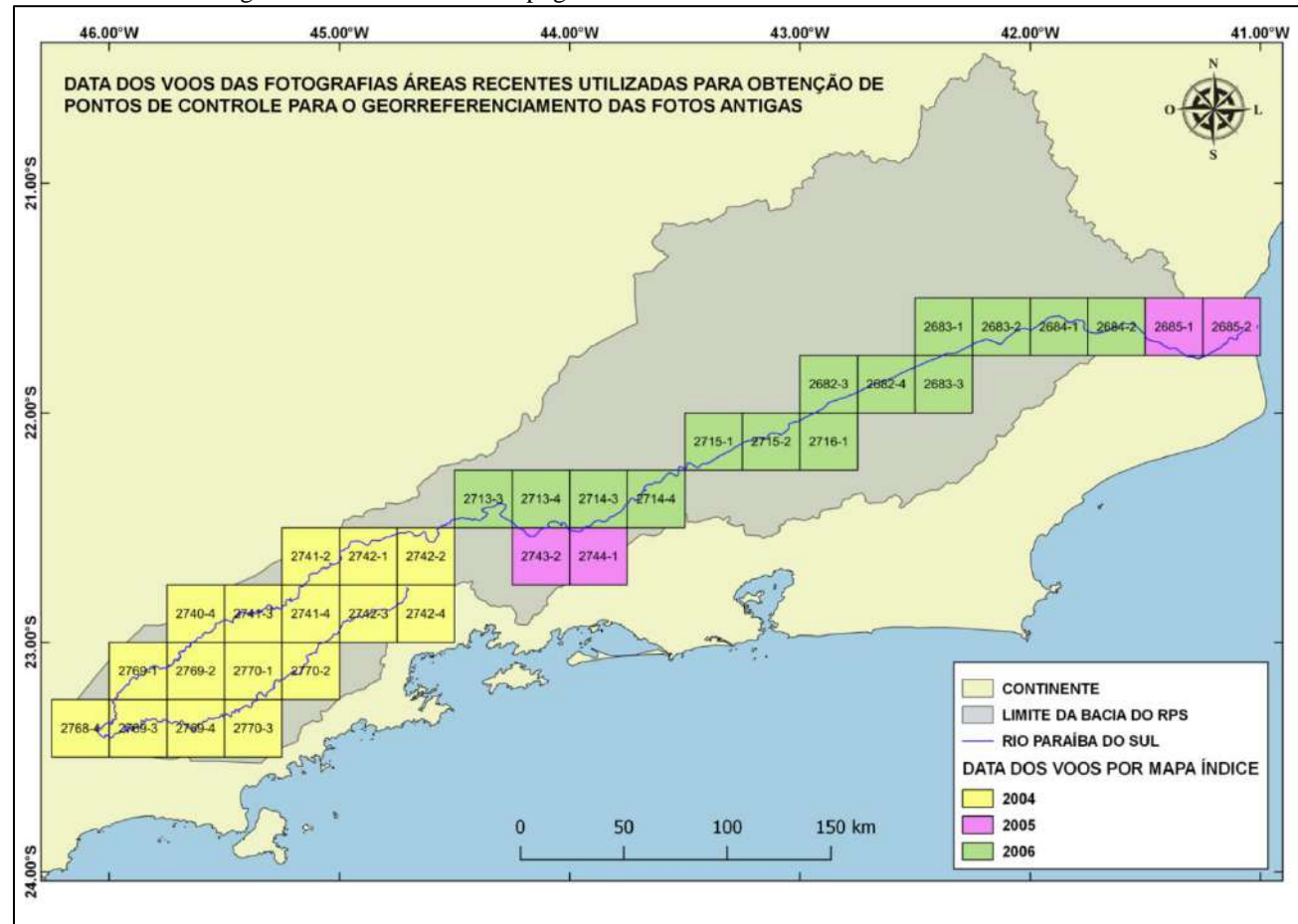


Nota: Os números no interior dos quadrados indicam o Mapa Índice (MI) de cada folha. Os voos foram realizados entre maio e agosto de cada um dos anos indicados na Figura.

Fonte: ANA, 2010, IBGE, 2014 e IBGE, 2017.



Figura 26 – Data dos voos para tomada das fotografias aéreas de 2004-2006 (projetos SP-25 e RJ-25), organizadas por blocos segundo o recorte da folha topográfica escala 1:50.000 do IBGE.



Nota: Os números no interior dos quadrados indicam o Mapa Índice (MI) de cada folha. Os voos foram realizados entre maio e agosto de cada um dos anos indicados na Figura.

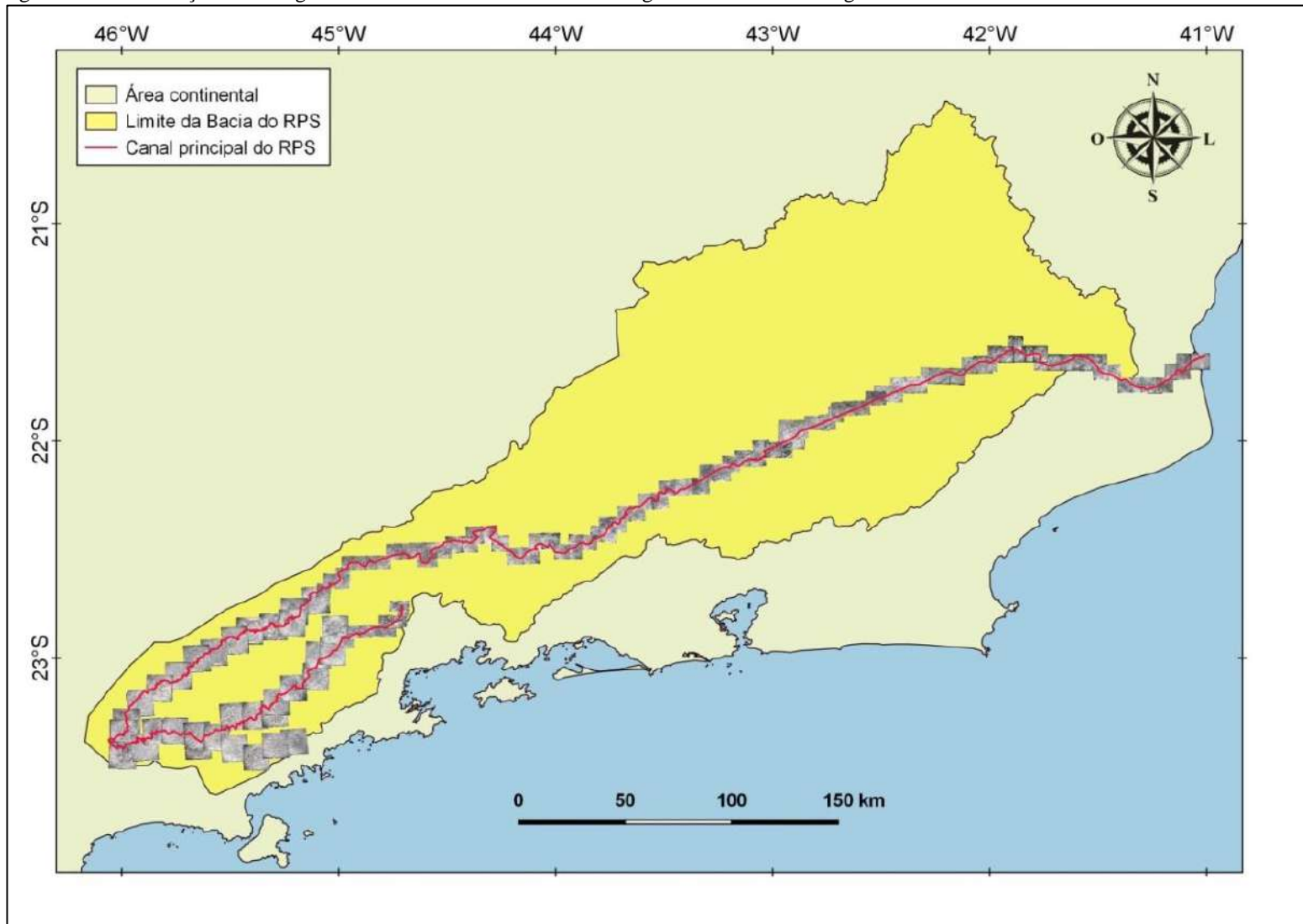
Fonte: ANA, 2010, IBGE, 2014 e IBGE, 2017.

Quadro 5 – Fotos aéreas de 1950/60 utilizadas para vetorização do curso fluvial do RPS e seus respectivos erros residuais (RMSE) médio, máximo e checkpoints obtidos no georreferenciamento.

FOLHA TOPOGRÁFICA	MAPA ÍNDICE	UF	ANO VOO	ESCALA VOO	RES. ESPACIAL (m)	Nº FOTOS	Nº GCPs/FOTO	RMSE MÉDIO (m)	RMSE MÁXIMO (m)	CHECKPOINTS (m)
RIO MAMBUCABA	2742-4	SP	1965	1:30.000	1	5	6	6,5	10,0	10,0
CAMPOS DE CUNHA	2742-3	SP	1966	1:30.000	1	6	6	7,4	10,0	10,0
LAGOINHA	2770-2	SP	1966	1:60.000	2,5	5	12	5,9	10,0	14,7
SÃO LUIZ DO PARAÍTINGA	2770-1	SP	1966	1:60.000	2,5	2	12	6,2	8,7	12,9
NATIVIDADE DA SERRA	2770-3	SP	1966	1:60.000	2,5	5	12	6,1	10,0	16,3
PARAIBUNA	2769-4	SP	1966	1:60.000	2,5	4	12	5,4	8,2	14,1
JACAREÍ	2769-3	SP	1966	1:60.000	2,5	3	12	4,5	8,1	10,7
SANTA ISABEL	2768-4	SP	1966	1:60.000	2,5	2	12	6,9	8,9	8,8
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	2769-1	SP	1966	1:60.000	2,5	2	12	5,7	9,3	11,1
TAUBATÉ	2769-2	SP	1966	1:60.000	2,5	2	12	3,8	8,0	9,2
TREMOMBÉ	2740-4	SP	1966	1:60.000	2,5	2	12	4,8	7,3	10,8
PINDAMONHANGABA	2741-3	SP	1966	1:60.000	2,5	2	12	6,6	9,0	9,3
GUARATINGUETÁ	2741-4	SP	1966	1:60.000	2,5	2	12	4,5	7,8	6,6
LORENA	2741-2	SP	1966	1:60.000	2,5	1	12	4	6,3	9,0
CRUZEIRO	2742-1	SP	1966	1:30.000	1	8	6	5,5	7,4	2,4
SÃO JOSÉ DO BARREIRO	2742-2	SP	1966	1:30.000	1	8	6	6,1	10,0	9,1
RESENDE	2713-3	RJ	1965	1:30.000	1	5	6	5,4	7,6	5,6
VOLTA REDONDA	2743-2	RJ	1966	1:30.000	1	2	6	4,9	4,9	5,6
NOSSA SENHORA DO AMPARO	2713-4	MG_RJ	1966	1:30.000	1	2	6	4,2	6,0	7,8
PIRAÍ	2744-1	RJ	1956	1:35.000	1	2	6	5,4	6,7	3,9
BARRA DO PIRAÍ	2714-3	RJ	1956	1:35.000	1	6	6	3,6	4,7	4,6
VASSOURAS	2714-4	RJ	1956	1:35.000	1	5	6	4,1	7,0	7,5
PARAÍBA DO SUL	2715-1	RJ	1956	1:35.000	1	5	6	4	6,6	5,8
TRÊS RIOS	2715-2	MG_RJ	1956	1:30.000	1	5	6	5,1	7,9	7,0
ANTA	2716-1	MG_RJ	1966	1:33.000	1	2	6	6,4	9,8	9,5
SAPUCAIA	2682-3	MG_RJ	1966	1:30.000	1	4	6	6,1	7,2	8,2
ALÉM PARAÍBA	2682-4	MG_RJ	1966	1:30.000	1	7	6	5,4	8,1	7,3
CANTAGALO	2683-3	MG_RJ	1966	1:33.000	1	2	6	5,1	6,1	10,4
RECREIO	2683-1	MG_RJ	1966	1:33.000	1	4	6	5,7	7,4	7,6
SANTO ANTÔNIO DE PÁDUA	2683-2	RJ	1966	1:33.000	1	5	6	5,6	8,4	10,2
CAMBUCI	2684-1	RJ	1956	1:30.000	1	9	6	6,3	9,2	7,0
SÃO FIDÉLIS	2684-2	RJ	1956	1:30.000	1	5	6	4,9	7,4	9,3
TRAVESSÃO	2685-1	RJ	1956	1:33.000	1	5	6	4,5	7,6	6,6
SÃO JOÃO DA BARRA	2685-2	RJ	1956	1:30.000	1	7	6	5,6	9,4	5,3
<b>TOTAL DE FOTOS</b>						<b>141</b>				

Fonte: Elaborado a partir de IBGE, 2014.

Figura 27 – Localização das fotografias aéreas das décadas de 1950/60 geometricamente corrigidas.



Fonte: ANA , 2010; IBGE , 2014.

### 3.1.3.3 A vetorização e a análise morfométrica do curso fluvial

Tanto nas fotografias aéreas georreferenciadas como nas ortorretificadas, foi possível identificar ao longo do canal fluvial do RPS, feições como bancos, ilhas, barras arenosas, meandros abandonados e reservatórios. Esses elementos foram vetorizados utilizando o *software* QGIS. A vetorização manual dos quatro cursos fluviais a partir das fotografias de diferentes épocas foi realizada por um único operador (a autora), de modo a reduzir o grau de subjetividade do processo. Em função do tamanho do pixel da maioria das fotos utilizadas (1 m), e assumindo que a escala ideal de vetorização é obtida pela razão entre o tamanho do pixel da fotografia e a acuidade visual humana (que é de 0,2 mm, segundo o IBGE, 1999), adotou-se a escala 1:5.000 para a vetorização (delineamento manual) dos elementos fluviais ao longo de todo o processo, evitando a geração de produtos vetoriais com diferentes níveis de detalhamento. Essa escala se mostrou satisfatória nessa fase, permitindo a distinção das feições fluviais de interesse.

Foram gerados polígonos para cada um dos elementos de hidrografia dos quatro cursos fluviais em que o RPS foi segmentado (superior, médio superior, médio inferior e inferior), e produtos cartográficos multiescalares a partir dos mesmos, de modo a representar em tamanho adequado, as feições fluviais características de cada curso. Com esses polígonos, foi possível analisar, em cada curso fluvial, as mudanças na morfologia de vista em planta e quantificar a variação de alguns parâmetros (área ocupada pela água, largura média, índices de sinuosidade, de entrelaçamento e área ocupada por ilhas) do canal fluvial (interpretado, nas fotos, como a porção do leito principal ocupada pela água).

A largura média ( $\bar{W}$ ) do canal fluvial do RPS foi calculada por meio de duas técnicas, de acordo com a metodologia proposta por Surian, Rinaldi e Pellegrini (2009). Na primeira, em cada um dos quatro cursos fluviais, a largura média do canal fluvial foi obtida como a razão entre a área e o comprimento do seu respectivo polígono. Como cada curso teve seu canal vetorizado sobre fotografias de diferentes datas, obteve-se, assim, a largura média do canal fluvial pretérito (décadas de 1950/60) e a do canal mais recente (2004-2006) e, em seguida, o percentual de variação desse parâmetro ao longo das décadas.

Foi adotado um índice adaptado do trabalho de Scorpio et al. (2015) para estimar o percentual de variação da largura média ( $\% \Delta \bar{W}$ ) de cada trecho do canal fluvial ao longo das décadas. Esse índice é expresso pela seguinte fórmula:

$$\% \Delta \bar{W} = 100 - (\bar{W}_{1950/60} / \bar{W}_{2004-06} * 100) \quad (9)$$

onde:

$\bar{W}_{1950/60}$  = largura média do canal fluvial obtida a partir da vetorização das fotografias aéreas de 1950/60 (georreferenciadas);

$\bar{W}_{2004-06}$  = a largura média do canal fluvial obtida a partir da vetorização das fotografias de 2004-06 ortorretificadas (cuja qualidade geométrica é superior em relação à das primeiras).

Os erros obtidos no cálculo da largura do canal fluvial obtida por essa técnica foram estimados usando o método de Mount et al. (2003), no qual são somados dois erros independentes. O primeiro erro está associado à vetorização do canal e depende da escala e da resolução espacial da fotografia aérea utilizada. Ele é calculado multiplicando-se o tamanho do pixel da fotografia pela média dos maiores erros de digitação da linha (vetor) construída na delimitação das duas margens do canal fluvial a partir dessa mesma fotografia. O segundo erro corresponde ao RMSE da correção geométrica e, no caso das fotografias aéreas das décadas de 1950/60, foi obtido no processo de georreferenciamento das mesmas; no caso das fotografias de 2004-06 ortorretificadas, esse erro foi fornecido pelo IBGE junto com os metadados do produto.

A segunda técnica, também de Surian, Rinaldi e Pellegrini (2009), foi adotada para calcular a largura média do canal em cada uma das áreas selecionadas dentro dos quatro cursos principais, nas quais se objetivou fazer uma análise mais detalhada da morfologia de vista em planta. Nelas, a largura média do canal foi obtida através de um número de seções desenhadas perpendicularmente ao eixo do canal, com equidistância de 500 m, para não introduzir elementos de subjetividade na medida. Esse método oferece maior exatidão na largura média do canal (SURIAN; RINALDI; PELLEGRINI, 2009) e é particularmente útil no cálculo de largura média de pequenos trechos fluviais, visto que não é uma técnica automatizada e demanda um tempo considerável para sua execução. Como essa técnica foi utilizada somente em algumas áreas selecionadas para análise morfológica em detalhe dentro de cada um dos quatro cursos fluviais, não representando, portanto, a largura média desses cursos (obtida pela primeira técnica), os

valores obtidos por meio da mesma serão apresentados ao longo do texto, no momento em que essas áreas forem discutidas.

Para avaliar a sinuosidade do RPS foi adotado o Índice de Sinuosidade de Mueller (MUELLER, 1968). Ele foi calculado para os quatro cursos fluviais, nos dois períodos em que o canal fluvial foi mapeado (décadas de 1950/60 e 2004-2006). Esse índice pode ser escrito em duas partes:

$$\text{ISH (Índice de Sinuosidade Hidráulica)} = \% \text{ equivalente de } (\text{IC} - \text{IV}) / (\text{IC} - 1) \quad (10)$$

$$\text{IST (Índice de Sinuosidade Topográfica)} = \% \text{ equivalente de } (\text{IV} - 1) / (\text{IC} - 1) \quad (11)$$

onde:

$$\text{IC (Índice do Canal)} = \text{CC}/\text{Ar} \quad (12)$$

$$\text{IV (Índice de Sinuosidade do Vale)} = \text{CV}/\text{Ar} \quad (13)$$

CC = comprimento do canal (que corresponde à linha traçada na metade da distância entre as margens esquerda e direita do mesmo, no curso fluvial considerado)

CV = comprimento do vale fluvial (que é o comprimento da linha traçada na metade da distância entre as bases das margens esquerda e direita do vale considerado)

Ar = menor distância (traçada em linha reta) entre o ponto inicial e o ponto final do curso fluvial considerado.

O resultado da soma do ISH com o IST deve ser 100%. O percentual de cada um dos índices indicará o tipo de sinuosidade predominante no curso fluvial.

Optou-se por não utilizar o Índice de Sinuosidade padrão de Schumm, que é definido pela razão entre o comprimento do canal fluvial e do vale fluvial (SCHUMM, 1963). Para canais retilíneos esse índice seria 1 e, à medida que o canal fosse deixando de ser retilíneo e ganhando sinuosidade, o valor do mesmo aumentaria, já que o comprimento do canal se tornaria maior em relação ao comprimento do vale. Porém, segundo Mueller (1968), isso nem sempre é verdadeiro, pois para canais sinuosos que não apresentam planícies de inundação, o valor do Índice de Sinuosidade Padrão continuaria sendo 1. No RPS, isso provavelmente aconteceria, e um valor próximo de 1, indicando baixa sinuosidade, seria encontrado em alguns trechos onde o canal é “encaixado”, sem planície de inundação, mas com sinuosidade considerável.

Outro detalhe interessante acontece quando há migração lateral das curvas dos rios meandrantos (contribuindo com o desenvolvimento da planície de inundação), o que faz com que

o nível da base do canal se eleve novamente. Quando tal rejuvenescimento ocorre, as características do vale fluvial voltam à fase juvenil, embora o padrão do canal se mantenha na forma de meandros entrincheirados (MUELLER, 1968). Nesse caso, apenas utilizando o Índice de Sinuosidade de Schumm, um fluxo altamente sinuoso poderá apresentar queda no valor do mesmo (indicando equivocadamente uma perda de sinuosidade) quando o rejuvenescimento ocorrer, embora a forma do seu canal não tenha sido alterada. Isso não acontece com o ISH e o IST, pois se o primeiro diminui durante o rejuvenescimento, o segundo aumenta proporcionalmente. O uso desses dois índices será importante para avaliar se houve, nos trechos sinuosos do RPS, alguma transição de um tipo de índice para outro ao longo das quase cinco décadas de intervalo entre os dados, o que poderia indicar uma mudança no estágio erosional do trecho em estudo.

Para avaliar possíveis alterações nos trechos do RPS com característica entrelaçada, foi utilizado o Índice de Entrelaçamento (IE) de Brice (1964), definido como:

$$IE = 2 (\sum Ci) / CC \quad (14)$$

no qual:

Ci é o comprimento de todas as ilhas e/ou barras arenosas no trecho fluvial considerado;

CC é o comprimento do canal, medido na metade da distância entre as margens esquerda e direita do mesmo, no trecho considerado.

Utilizou-se o valor do IE sugerido por Brice (1964) para definir se o canal apresentava padrão entrelaçado (>1,5), tendo sido encontrado valor superior a este somente no curso inferior. Em função disso, exclusivamente neste curso foi realizada a comparação entre o IE calculado a partir do mapeamento do canal fluvial de 1950/60 com aquele de 2004-06, com a finalidade de avaliar se o grau de entrelaçamento apresentou mudanças ao longo das décadas, após a instalação das barragens nos cursos a montante.

### 3.1.4 Morfologia transversal do canal

Análises da seção transversal de um canal fluvial podem evidenciar a ocorrência de migração lateral, marcas d'água características de cheias excepcionais, áreas de deposição e erosão. Assim como nos demais sinais vitais, alterações na morfologia transversal podem ser indicadoras de mudanças na dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica e na estabilidade do canal (LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009).

Para quantificar as alterações na morfologia transversal de um canal fluvial, observações de campo e séries de fotografias do próprio canal auxiliam, principalmente com relação à verificação da largura do mesmo e da geometria de bancos e sua dinâmica. Porém, a investigação da morfologia transversal por meio de séries de perfis transversais onde são dimensionadas a largura, a profundidade e as feições presentes no canal acrescentam informações que permitem uma análise mais detalhada (LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009).

A periodicidade necessária aos levantamentos para elaboração de perfis transversais é função das condições hidrológicas e do tipo de substrato do canal. Para a maioria dos canais aluviais, um levantamento anual ou semianual é suficiente (exceto se as condições hidrológicas sofrerem drásticas mudanças ao longo do ano, o que exigirá mais levantamentos); já em canais de leito rochoso – onde as mudanças na morfologia transversal são bem mais lentas – o intervalo entre as medições pode ser maior (LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009).

Neste trabalho foram utilizados perfis transversais das estações fluviométricas localizadas no canal do RPS em que tal parâmetro foi levantado. Essas estações são as mesmas (treze) anteriormente selecionadas para análise hidrológica (Figura 23). Nessas estações, os levantamentos para elaboração de perfis transversais foram realizados a partir da década de 1990 (Quadro 3).

Os perfis transversais do RPS são disponibilizados pela ANA em planilhas com valores de distância (em metros) e cotas/profundidades (em centímetros). Após a análise de consistência, foram eliminados os dados espúrios e selecionados apenas os perfis com número satisfatório de pontos para a representação gráfica da seção transversal do canal.

Graças à sazonalidade hidrológica do RPS, a análise dos perfis transversais foi realizada considerando-se duas épocas distintas do ano: estiagem e cheia. Não foram encontrados dados



anteriores à transposição do RPS para o rio Guandu nem anteriores à instalação das maiores barragens com reservatório (Paraibuna, Santa Branca e Funil); assim, foram construídos perfis transversais do canal fluvial posteriores a essas interferências, não sendo possível avaliar o quanto elas contribuíram para alteração direta da morfologia transversal do canal do RPS; já em relação à barragem de Anta (também com reservatório, operando desde 2013), existem dados de uma única estação (Campos/Ponte Municipal) a jusante da mesma, que permitiram a construção e a análise de perfis transversais anteriores e posteriores à sua instalação.

Para analisar as mudanças na morfologia transversal de canais fluviais submetidos a controle de vazão decorrentes de operações hidráulicas, Su et al. (2015) sugerem que alguns parâmetros podem ser calculados a partir de seus perfis transversais: área da seção transversal ( $A$ ); profundidade média da água ( $PM$ ), que é a razão entre a área da seção transversal e a largura da água ( $LA$ ); e a razão entre a largura da água e a profundidade média ( $LA/PM$ ). Em condições hidrológicas naturais, esses parâmetros variam bastante ao longo dos anos, e significativamente entre os períodos de estiagem e cheia. Em canais fluviais submetidos a controle de vazão (como acontece com os trechos do RPS submetidos a operações hidráulicas) a variação natural desses parâmetros fica comprometida (SU et al., 2015).

Como não há dados de perfis transversais anteriores à instalação da maioria das barragens com reservatório do RPS, a elaboração dos mesmos serviu principalmente para determinar a variabilidade dos parâmetros sugeridos por Su et al. (2015) em trechos do canal submetidos à regularização, e comparar os resultados com aqueles de uma estação mais próxima à nascente, onde o fluxo não é regularizado por essas estruturas, com intuito de verificar o quanto as barragens afetam esses parâmetros e, por conseguinte, a morfologia transversal.

### 3.1.5 Morfologia longitudinal do canal

Alterações hidrossedimentológicas modificam o perfil longitudinal, pois alteram a declividade (gerando agradação ou erosão) e a estrutura do canal. Por sua vez, a estrutura do canal (espaçamento entre cascatas e empoçamentos, material do fundo etc) está diretamente relacionada à qualidade dos habitats fluviais. O estudo da morfologia longitudinal dos canais

fluviais permite, além do gradiente, verificar a presença e alterações de pontos de quebra, cascatas, empoçamentos e materiais do fundo. Por meio de perfis longitudinais pode-se estimar o volume de sedimentos de fundo que é transferido de um trecho a outro do canal e a produção de novos sedimentos a partir da erosão dos leitos rochosos (LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009).

Nos perfis longitudinais da maioria dos cursos fluviais é comum a existência de mudanças na declividade ao longo do tempo; algumas dessas alterações parecem decorrer do próprio processo de ajuste natural contínuo pelo qual os cursos fluviais passam graças às variações no escoamento e carga sólida, frequentemente gerando o aparecimento de irregularidades no perfil (corredeiras e depressões). Com o tempo, o rio tende a eliminar essas irregularidades na tentativa de alcançar um perfil mais côncavo e liso, equilibrado, e com declividade suficiente para o sucesso do transporte sedimentar (MELO; FUJITA, SANTOS, 2009). Esse estado de equilíbrio, no entanto, será alterado inúmeras vezes, pois os rios estão submetidos a constantes alterações em sua vazão, carga sólida, eventos tectônicos etc.

As irregularidades que aparecem nos perfis fluviais, semelhantes a “degraus” ou quebras, e que correspondem a mudanças bruscas na declividade, são conhecidas como *knickpoints*. Quando eles surgem, o nível de base do rio (que teoricamente seria aquele abaixo do qual o rio não poderia mais causar erosão) se altera. Os *knickpoints* podem migrar ao longo do perfil fluvial com o tempo, variando sua localização conforme a dinâmica sedimentar, o potencial erosivo do fluxo fluvial, alterações na vazão etc. (LORD; GERMANOSKI; ALLMENDINGER, 2009).

Quando uma barragem é construída, ela cria um *knickpoint* artificial no perfil longitudinal que, ao contrário dos naturais, não migra ao longo do rio com o tempo. Esse *knickpoint* artificial acaba bloqueando o fluxo natural de sedimentos para jusante, facilitando o acúmulo sedimentar a montante do mesmo e alterando, conseqüentemente, o estado de equilíbrio do rio. Segundo Brandt (2000), no perfil longitudinal, a porção a jusante das barragens onde são encontrados *knickpoints* é uma área sujeita à degradação, indicando que o sistema fluvial não está em uma condição de completo equilíbrio.

Levantamentos de campo para elaboração de perfis longitudinais podem ser realizados com relativa facilidade e baixo custo em rios pequenos. Todavia, o custo dessas campanhas quando os cursos fluviais são extensos pode inviabilizar esse tipo de levantamento. Por isso, a identificação de *knickpoints*, fundos rochosos, empoçamentos e declividade de canais fluviais

diretamente de mapas topográficos e Modelos Digitais de Elevação (MDE) é uma alternativa para a elaboração desses perfis. Por meio desse tipo de insumo é possível extrair informações da variação da altitude em relação ao comprimento de um curso fluvial e, com isso, representar graficamente suas mudanças de declividade, da nascente à foz.

Os perfis longitudinais representam uma importante ferramenta para o estudo da geomorfologia, facilitando o entendimento da configuração fluvial. Trechos fluviais em equilíbrio (ou ajustados) apresentam normalmente inclinações suaves e constantes em seu perfil longitudinal, enquanto trechos em desequilíbrio (ou desajustados) têm perfis irregulares ou deformados (MELO; FUJITA, SANTOS, 2009).

A elaboração de perfis longitudinais de rios brasileiros ainda é uma atividade escassa e os poucos trabalhos existentes utilizam a análise do índice de gradiente elaborado por Hack (1973) para identificar anomalias tectônicas nos cursos fluviais e, assim, compreender a evolução da rede de drenagem e de seu substrato rochoso (MELO; FUJITA, SANTOS, 2009).

O índice de gradiente *Slope x Length* (ou simplesmente *SL*) de Hack (1973) – no Brasil conhecido como índice Relação Declividade x Extensão (ou RDE) – relaciona o declive de um determinado trecho da drenagem com sua extensão, possibilitando a normalização dos valores de gradiente, a comparação entre perfis longitudinais de canais de diferentes comprimentos e a identificação, nos mesmos, de anomalias em sua concavidade natural. Embora tradicionalmente empregado para a análise de perfis longitudinais de áreas tectonicamente ativas, por destacar quebras no gradiente dos canais fluviais associadas a mudanças litológicas ou movimentações tectônicas, ao desenvolvê-lo, Hack (1973) não estava interessado apenas em sua utilização para estudos litológicos ou tectônicos, mas também hidrológicos (TROIANI et al., 2014).

O índice de Hack pode ser calculado por trecho ( $RDE_{\text{trecho}}$ ) ou para toda a extensão do canal fluvial ( $RDE_{\text{total}}$ ):

$$RDE_{\text{trecho}} = (\Delta h/L_{\text{trecho}}) * L_{\text{acumulado}} \quad (15)$$

$$RDE_{\text{total}} = \Delta h/\ln L \quad (16)$$

onde:

$\Delta h$  é a diferença altimétrica entre os dois pontos extremos do curso d'água selecionado;

$L_{\text{trecho}}$  é o comprimento do trecho analisado;

$L_{\text{acumulado}}$  é a extensão acumulada do rio até o ponto do trecho onde o RDE está sendo calculado;

$\ln L$  é o logaritmo natural de toda a extensão do canal fluvial.

Graças à praticidade em determiná-lo a partir de cartas topográficas, o RDE consiste em uma ferramenta útil na identificação de anomalias na declividade que possam estar relacionadas a diferentes tipos de substrato (HACK, 1973). Além disso, é um indicador sensível das mudanças na declividade de um canal fluvial que podem estar associadas a desembocaduras de tributários com caudal expressivo, a diferentes resistências à erosão hidráulica do substrato rochoso e/ou atividade tectônica (ETCHEBEHERE et al., 2004). Ele apresenta grande potencial para solucionar problemas geomorfológicos relacionados a qualquer tipo de cenário geológico, especialmente na detecção de feições de grande escala que influenciam a evolução da paisagem (TROIANI et al., 2014). Assim, interferências antrópicas que introduzem mudanças na declividade do canal fluvial – como grandes barragens com reservatório, que criam *knickpoints* artificiais no perfil longitudinal – podem ser detectadas por meio dessa ferramenta.

Como em cada trecho de sua extensão os rios podem apresentar perfis longitudinais distintos devido à dinâmica dos sistemas fluviais (MELO; FUJITA, SANTOS, 2009), foram construídos oito perfis longitudinais do RPS – dois para cada um dos seus quatro cursos fluviais: um a partir de dados das décadas de 1950/60, e outro a partir de dados mais recentes.

Os primeiros foram construídos a partir das informações de hipsometria das folhas topográficas 1:50.000 do IBGE (Classe A, com Padrão de Exatidão Cartográfica de 10 m e Erro Padrão de cerca de 7 m para a altimetria). Essas cartas foram elaboradas nas décadas de 1950/60 a partir das mesmas fotografias aéreas que foram utilizadas neste trabalho para a análise da morfologia de vista em planta do canal fluvial do RPS. Nelas, a hipsometria apresenta equidistância de 100 m entre as curvas mestras e de 20 m entre as intermediárias. As camadas de informação que compõem essas cartas topográficas foram adquiridas separadamente, em formato *raster*, e aquelas referentes à hipsometria (originalmente compostas por cotas e curvas de nível na cor sépia) foram georreferenciadas no QGIS, utilizando como GCPs as coordenadas extraídas dos quatro cantos da folha topográfica original. Em seguida, sobre elas foram sobrepostos os vetores correspondentes ao canal do RPS elaborado a partir das fotografias aéreas de 1950/60 georreferenciadas. Foram, então, construídas planilhas com os valores de altitude nas margens fluviais e comprimento do curso fluvial (de 1 em 1 km) para a geração dos perfis longitudinais das décadas de 1950/60 dos quatro cursos fluviais do RPS.

Para elaboração dos perfis longitudinais dos trechos relativamente mais recentes do RPS foram extraídas as informações de altitude do Modelo Digital de Elevação (MDE) do *Shuttle RADAR Topographic Mission* (SRTM). Essa missão utilizou o ônibus espacial *Endeavour* para coletar medidas tridimensionais da superfície terrestre através de interferometria por meio de radares (bandas C e X). A missão ocorreu em 2000, percorrendo 16 órbitas por dia, visando à elaboração de um MDE mundial. A cobertura foi feita em 80% da área terrestre do planeta, entre latitudes 60° N e 56° S. Os modelos ajustados possuem os padrões norte-americanos de exatidão de mapas (*National Map Accuracy Standards*) e são distribuídos gratuitamente pela *United States Geological Survey* (USGS). A princípio foram gerados MDEs de 30 m de resolução espacial (em coordenadas geográficas, como 1 arco segundo) para os Estados Unidos e de 90 m (3 arcos de segundo) para o resto do mundo. Em 2015, porém, MDEs de 30 m de resolução foram liberados para os demais países. O sistema de referência desses modelos é o WGS84, com dados de altitude em metros inteiros. Foi utilizado o MDE de 30 m (SRTM 1 Arc-Second Global, sem áreas de vazios), cujos erros absolutos de posicionamento e altimétrico são, respectivamente, 9,0 m e 6,2 m para a América do Sul (JPL, 2016). Para a elaboração da planilha para confecção dos perfis longitudinais, foram sobrepostos os trechos de hidrografia vetorizados a partir das fotografias aéreas de 2004-06 ortorretificadas sobre o MDE do SRTM; em seguida, foram obtidas as altitudes dos mesmos pontos das margens fluviais utilizados na elaboração das planilhas geradas para os perfis longitudinais de 1950/60, construídos a partir das cartas topográficas do IBGE.

Tanto nos perfis longitudinais elaborados a partir das cartas topográficas como nos elaborados a partir do SRTM foram identificados os principais lineamentos estruturais (falhas) existentes ao longo do canal principal do RPS. Essas informações foram extraídas das Cartas Geológicas do Brasil ao Milionésimo SF-23 (Rio de Janeiro) e SF-24 (Vitória), do Serviço Geológico do Brasil, compiladas a partir do mapeamento geológico de 1:250.000 a 1:400.000 (CPRM, 2004). Nos perfis também foram localizados os pontos de captação dos principais afluentes de cada trecho fluvial e as barragens que já existiam no canal do RPS na data em que as folhas topográficas e o DEM foram gerados.

Após a construção dos perfis longitudinais referentes às décadas de 1950/60 e de 2000 foram calculados os valores de  $RDE_{\text{trecho}}$  dos quatro cursos fluviais do RPS e o  $RDE_{\text{total}}$  de todo o rio. Valores para a razão  $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$  abaixo de 2 correspondem a rios em equilíbrio ou ajustados; acima de 2, a rios em desequilíbrio ou desajustados, como sugerido por Etchebere

(2000), Melo, Fujita e Santos (2009) e Fujita et al. (2011), para alguns rios brasileiros. O cálculo da razão  $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$  dos cursos fluviais do RPS de épocas distintas foi realizado para avaliar se as barragens instaladas, nesse intervalo temporal, causaram algum desequilíbrio ou desajuste aos seus perfis longitudinais.

## 4 ANÁLISES E RESULTADOS

Segundo Lord, Germanoski e Allmendinger (2009), alterações na paisagem, nos parâmetros hidrológicos, sedimentológicos e na morfologia do canal fluvial devem ser investigadas na tentativa de compreender como os sistemas fluviais respondem às interferências antrópicas a que estão submetidos. Este capítulo traz os resultados das análises desses sinais vitais do RPS ao longo das últimas décadas, com o objetivo de avaliar se as barragens instaladas em seu canal principal os impactaram de alguma maneira.

Graças à classificação adotada, na qual o RPS foi dividido em quatro cursos fluviais (superior, médio superior, médio inferior e inferior), os resultados e análises serão inicialmente discutidos separadamente, por curso fluvial. Ao final do capítulo, uma síntese dos resultados abordando todo o curso fluvial do RPS será apresentada.

### 4.1 Curso superior do RPS

Embora na maior parte do seu curso superior o RPS atravessasse regiões relativamente menos antropizadas que aquelas dos demais cursos, em sua porção final, duas grandes barragens com reservatório foram construídas, alterando ali sua paisagem, seu fluxo fluvial e a morfologia de seu canal.

#### 4.1.1 Paisagem

O curso superior do RPS estende-se da nascente, no município paulista de Areias, a mais de 1800 m de altitude, até o município de Guararema (SP), a 572 m de altitude (Figuras 7 e 8). Nesse trecho, de aproximadamente 300 km de extensão, a declividade média é acentuada (4,9 m/km) e predomina o regime torrencial (ANA, 2001). Neste curso (Figura 10), o clima tropical

varia do mesotérmico brando úmido (com 3 meses secos e temperaturas médias entre 10 e 15°C no entorno da nascente do rio Paraitinga) ao subquente úmido (com 1 a 2 meses secos, predominante em sua porção central, no entorno dos reservatórios de Paraibuna e Santa Branca até sua porção final). Encaixado na Serra do Mar (Figura 9), o curso superior atravessa municípios que – embora possuam áreas extensas – são considerados de pequeno porte, com população inferior a 30.000 habitantes, segundo o Censo Demográfico 2010 (IBGE, 2010): Areias, Cunha, São Luís do Paraitinga, Natividade da Serra e Guararema (Figura 4).

Nesse trecho, o RPS drena uma região onde a vegetação predominante é secundária em função do desmatamento decorrente das atividades agrícolas ao longo dos séculos (Figura 14). Manchas de floresta ombrófila densa montana ainda existem ao redor do rio Paraibuna e na margem esquerda do rio Paraitinga, legalmente protegidas por duas unidades de conservação: o Parque Nacional da Serra da Bocaina e o Parque Estadual da Serra do Mar (Figura 6). Próximo à confluência dos rios Paraitinga e Paraibuna, onde atualmente se localiza o reservatório da barragem Paraibuna, foi demarcada uma das áreas da APA da BRPS. Mesmo em áreas teoricamente protegidas, na maior parte do entorno do curso superior predominam atividades de pastagem e usos diversificados; existem áreas de florestas que, em sua maioria, coexistem com pastagens e lavouras, estando as florestas naturais reduzidas a pequenas manchas (Figura 15).

A susceptibilidade à erosão no curso superior é menor que a dos demais cursos do RPS (Figura 16); há locais com baixa e moderada susceptibilidade, mas alta susceptibilidade também ocorre em alguns trechos, principalmente decorrente do desmatamento das matas ciliares e da construção de estradas de terra às margens do rio Paraitinga sem o devido critério técnico, levando ao assoreamento de seu leito (PATRIANI; CUNHA, 2010). Embora as águas da cabeceira do RPS sejam limpas, a cor turva do rio Paraitinga, em alguns trechos, revela o acentuado processo de assoreamento ao qual o mesmo está submetido.

#### 4.1.2 Parâmetros hidrológicos

Para avaliar as séries temporais de chuvas e dados hidrosedimentológicos, foram selecionadas duas estações pluviométricas (São Luís do Paraitinga e Santa Branca) e duas



fluviométricas (Estrada do Cunha e Santa Branca) no curso superior (Figura 23).

A estação pluviométrica São Luís do Paraitinga (A, Figura 23) situa-se na porção mediana do curso superior, a montante das barragens de Paraibuna e Santa Branca, e a estação pluviométrica Santa Branca (B, Figura 23) localiza-se no ponto onde está instalada a estação pluviométrica de mesmo nome, imediatamente a jusante da barragem de Santa Branca. A estação São Luís do Paraitinga possui série temporal completa de chuvas totais mensais de 1935 a 2018 (Figura 28), enquanto Santa Branca possui série mais curta, de 1952 a 2018, e descontínua (Figura 29).

Nas duas estações pluviométricas do curso superior as séries históricas de precipitação total mensal apresentaram ligeira tendência crescente ao longo das décadas analisadas (Figuras 28 e 29). Os correlogramas das duas séries temporais (Figura 30) indicaram ausência de correlação serial entre os dados de um determinado ano e do ano anterior, conforme esperado para séries de chuvas (MARENGO; ALVES, 2005). Face à ausência de autocorrelação, aplicou-se o teste de Mann-Kendall tradicional aos dados dessas estações para avaliar a direção e a significância da tendência dessas séries. O teste confirmou, nas duas estações, a tendência positiva da regressão linear anteriormente obtida das séries de precipitação (Figuras 28 e 29), bem como a significância estatística desse comportamento (Tabela 1).

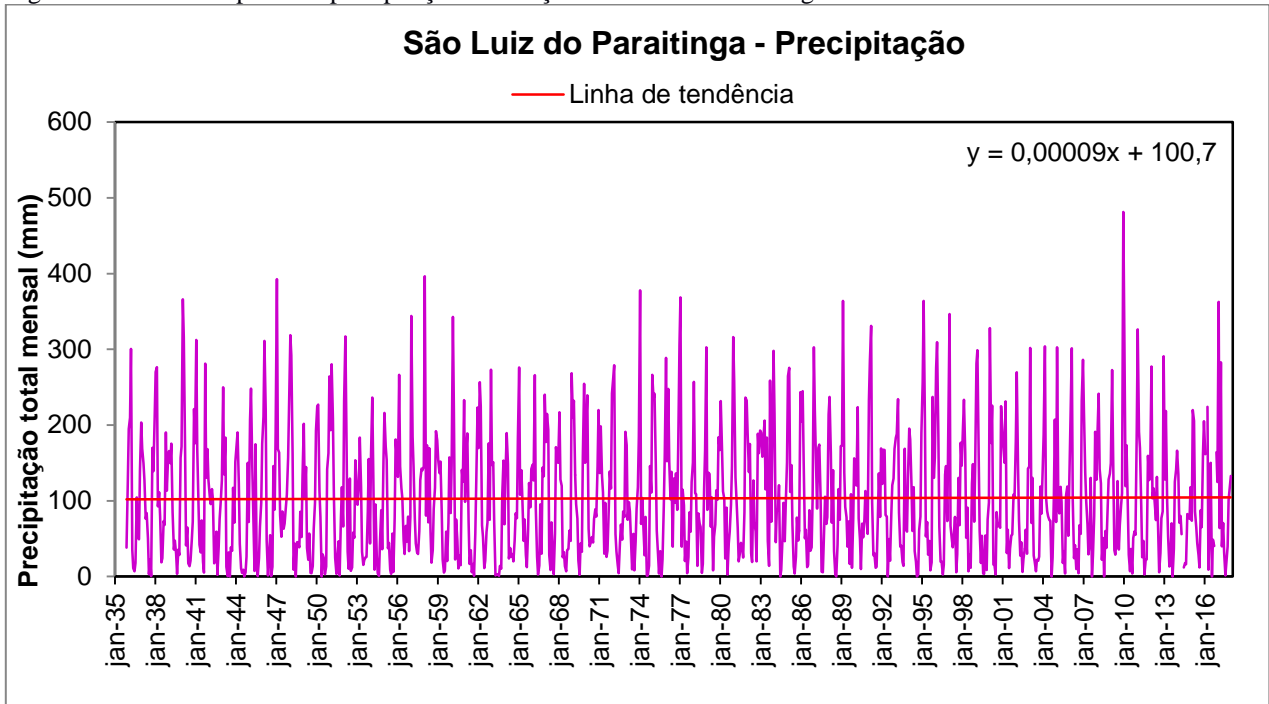
Tabela 1 – Resultado do teste de Mann-Kendall aplicado sobre as séries temporais de chuvas totais mensais das estações São Luís do Paraitinga e Santa Branca.

ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA		TESTE DE MANN-KENDALL		
Código	Nome	S	Tendência	SE
A	São Luís do Paraitinga	0,269	Positiva	Sim
B	Santa Branca	0,410	Positiva	Sim

Legenda: S – teste estatístico de Mann-Kendall (Equação 1); SE – significância estatística.

Fonte: A autora, 2019.

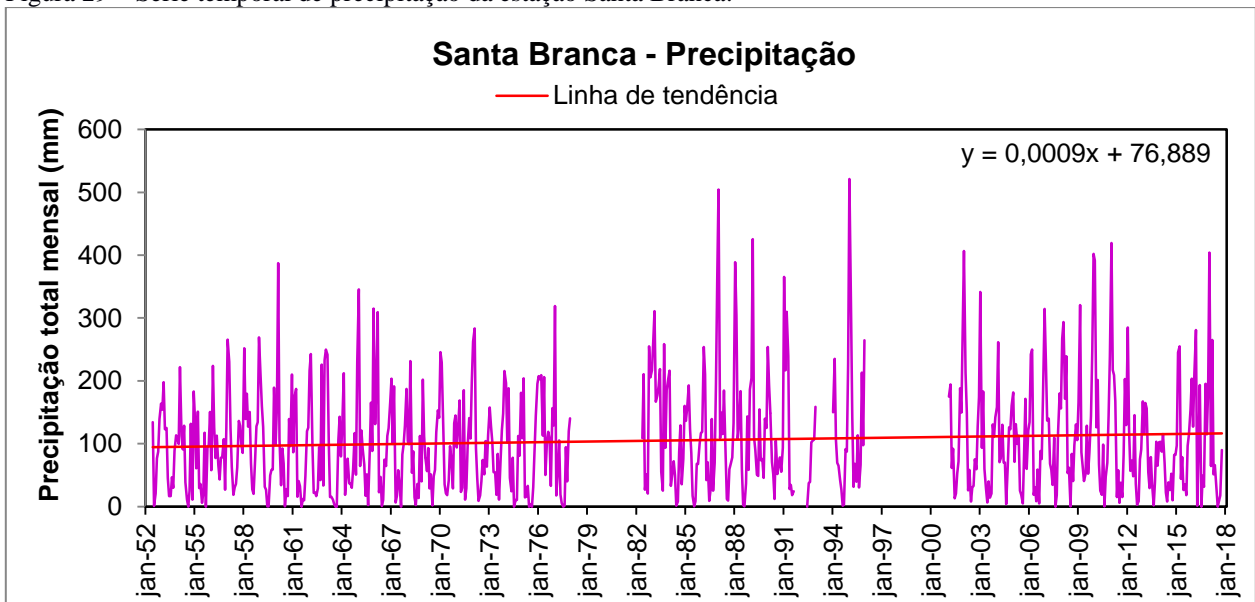
Figura 28 – Série temporal de precipitação da estação São Luís do Paraitinga.



nota: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

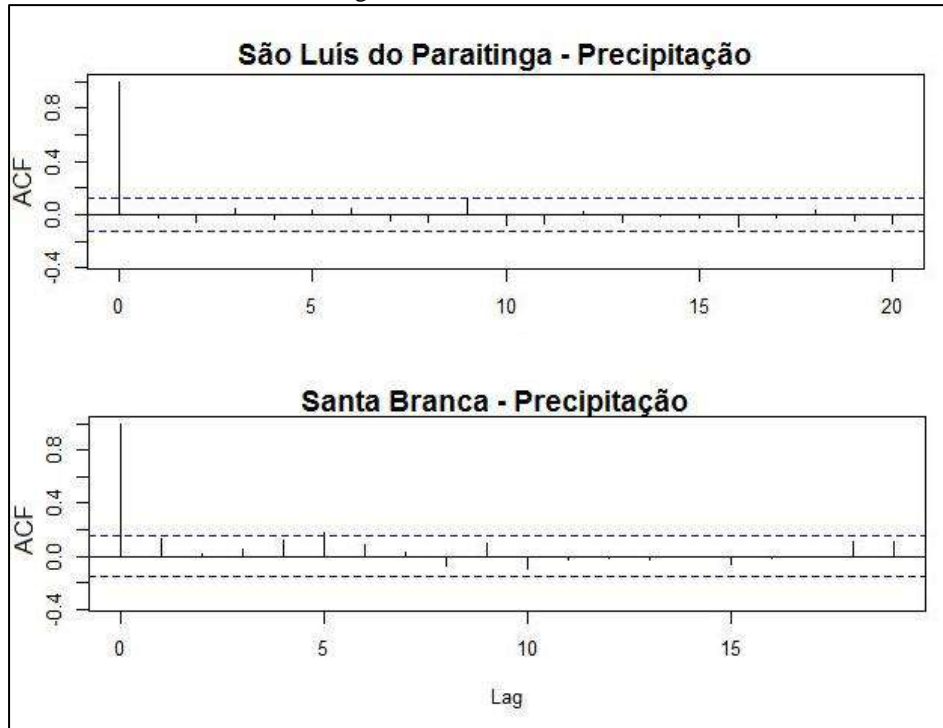
Figura 29 – Série temporal de precipitação da estação Santa Branca.



Nota: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 30 – Correlogramas das séries temporais de chuvas totais mensais das estações São Luís do Paraitinga e Santa Branca.



OBS.: As linhas tracejadas representam os limites de confiança a 95% para a hipótese de não ter correlação serial.

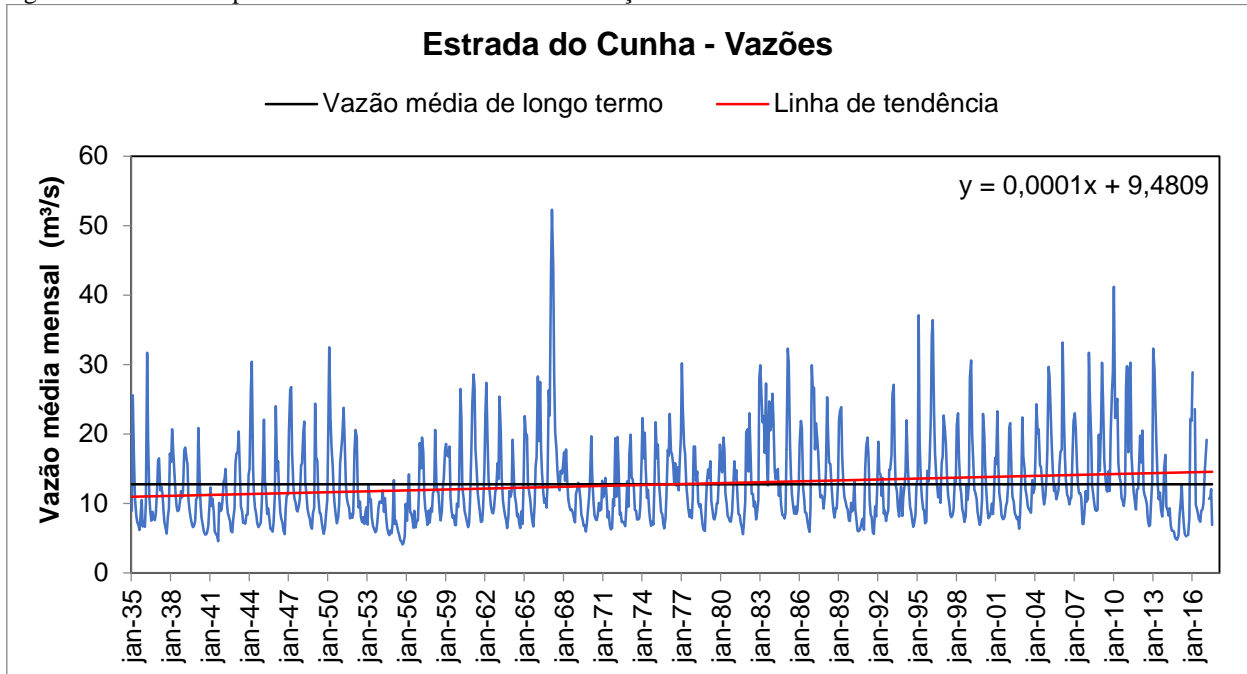
Legenda: ACF – Função de autocorrelação; Lag – Intervalo de tempo em anos.

Fonte: A autora, 2019.

A estação fluviométrica Estrada do Cunha (estação 1, Figura 23) – que das estações selecionadas para este trabalho é aquela localizada mais a montante do RPS – possui série completa de vazão média mensal de 1935 a 2018 (Figura 31). Ela situa-se aproximadamente 50 km a montante da primeira barragem existente no curso superior sendo, portanto, a única estação de todo o curso fluvial cuja vazão não está submetida à regularização.

A vazão média de longo termo (período de 1935 a 2018) nesta estação é de 12,8 m<sup>3</sup>/s, e a série temporal de vazão mostrou comportamento ligeiramente positivo ao longo das oito décadas analisadas (Figura 31).

Figura 31 – Série temporal da vazão média mensal da estação Estrada o Cunha.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

Analisando-se o comportamento por períodos (Quadro 6), observou-se que a vazão média de longo termo da estação Estrada do Cunha aumentou mesmo após o início da operação das barragens Santa Branca (em 1961) e Paraibuna (em 1977), ambas a jusante. A série temporal de vazão dessa estação – livre da influência da regularização de fluxo exercida por essas barragens – mostrou tendência positiva, assim como a série de chuvas da estação pluviométrica mais próxima (São Luís do Paraitinga, Figura 28).

Quadro 6 – Vazão média de longo termo e por períodos (de acordo com o início da operação das barragens de Santa Branca e Paraibuna) da estação Estrada do Cunha.

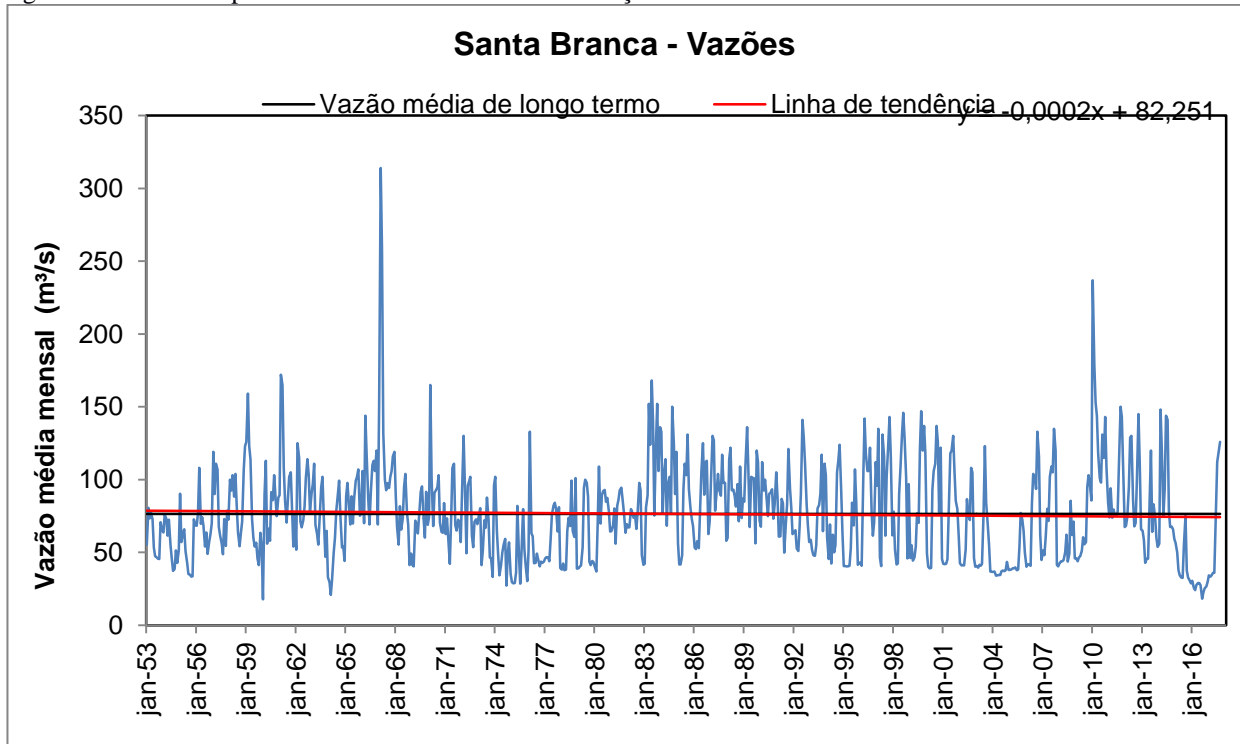
<b>Estrada do Cunha</b>	<b>Vazão média mensal</b>
De longo termo (1935-2018)	12,8
Antes da instalação de Santa Branca (1935-1960)	11,0
Após instalação de Santa Branca e antes de Paraibuna (1961-1976)	13,2
Após instalação de Paraibuna (1977-2018)	14,0

Fonte: A autora, 2019.

Na estação fluviométrica Santa Branca (estação 2, Figura 23), a série de vazão média mensal (de 1953 a 2018) apresentou tendência ligeiramente negativa (Figura 32), apesar da tendência positiva da série de chuvas da estação pluviométrica adjacente (B, na Figura 23, e Figura 29).

A estação fluviométrica Santa Branca situa-se imediatamente a jusante da barragem homônima e sofre os efeitos diretos da regularização de vazão realizada por essa obra desde 1961, intensificados após 1977 com a instalação da barragem Paraibuna. A mudança na assinatura da série temporal de vazão é observável após 1961, mas grandes oscilações de vazão ainda ocorreram após essa data (Figura 32); após 1977, porém, as grandes oscilações de vazão (como a ocorrida em 1966-1967) não foram mais observadas (Figura 32), consequência do aumento do controle de fluxo após a entrada em operação do reservatório de Paraibuna. A linha de tendência da série de vazões dessa estação, após 1978 (ano subsequente à entrada em operação da barragem de Paraibuna), passou a apresentar valores abaixo do valor da vazão média de longo termo (Figura 32).

Figura 32 – Série temporal de vazão média mensal da estação Santa Branca.

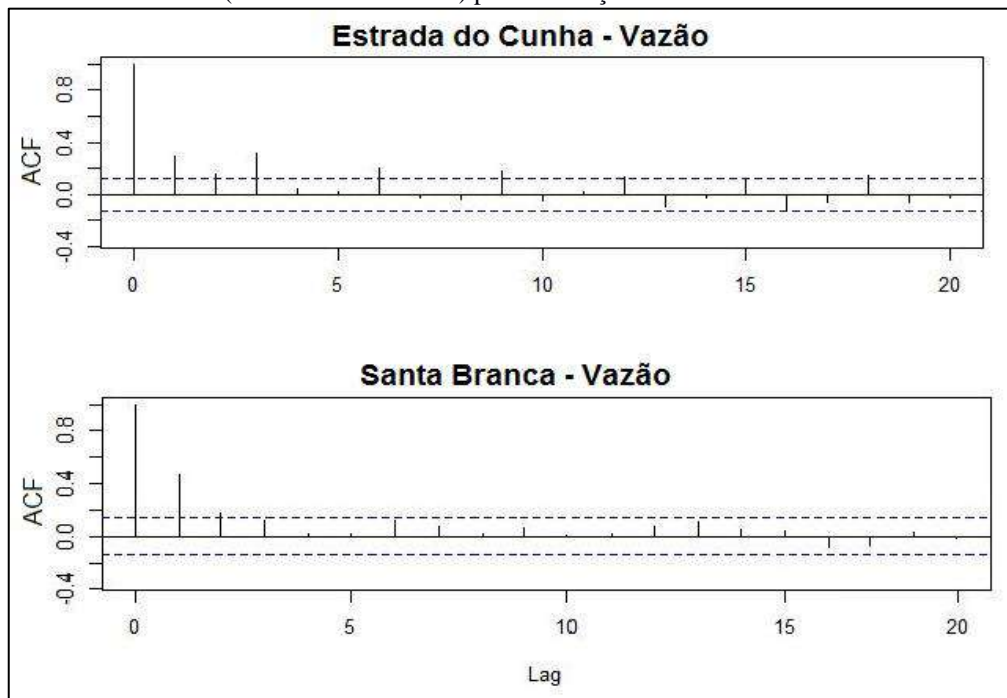


OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

Os correlogramas das séries de vazão média mensal de ambas as estações fluviométricas do curso superior (Figura 33) mostraram existência de autocorrelação, principalmente entre os dados de um determinado ano e do ano anterior, conforme esperado de séries hidrológicas de rios submetidos à regularização. Assim, para avaliar o grau de significância estatística da linha de tendência dessas séries aplicou-se o teste Sazonal de Mann-Kendall em substituição ao teste de Mann-Kendall tradicional, que deve ser aplicado a séries sem correlação serial. No teste Sazonal de Mann-Kendall utilizaram-se dados dos meses de pico de chuva e de vazão (que no caso do RPS é de dezembro a fevereiro), e que são os mais afetados pelo controle de fluxo realizado pelas barragens. O teste Sazonal de Mann-Kendall confirmou a tendência positiva do comportamento da vazão para a estação Estrada do Cunha, embora com pouca significância estatística; já para a estação Santa Branca, o teste confirmou a tendência negativa, com significância estatística (Tabela 2).

Figura 33 – Correlogramas das séries temporais de vazão média mensal durante o pico de vazão (dezembro a fevereiro) para as estações Estrada do Cunha e Santa Branca.



OBS.: As linhas tracejadas representam os limites de confiança a 95% para a hipótese de não ter correlação serial.

Legenda: ACF – Função de autocorrelação; Lag – Intervalo de tempo em anos.

Fonte: A autora, 2019.

Tabela 2 – Resultado do teste Sazonal de Mann-Kendall aplicado sobre as séries temporais de vazão média mensal das estações Estrada do Cunha e Santa Branca.

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA		TESTE SAZONAL DE MANN-KENDALL		
Código	Nome	S	Tendência	SE
1	Estrada do Cunha	0,635	Positiva	Não
2	Santa Branca	-0,264	Negativa	Sim

Legenda: S – teste estatístico de Mann-Kendall (Equação 1); SE – significância estatística.

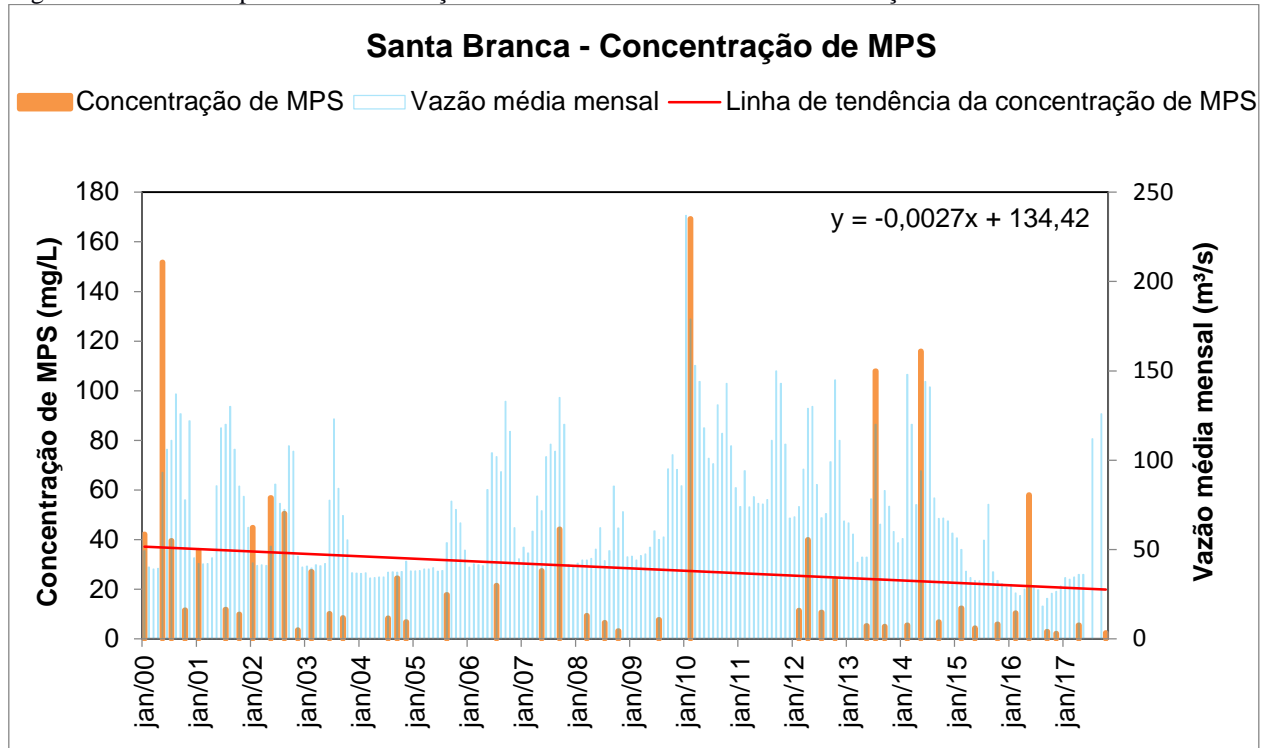
Fonte: A autora, 2019.

Cabe ressaltar que nas séries históricas de vazões de ambas as estações fluviométricas do curso superior (Figuras 31 e 32) foram observados os efeitos das grandes estiagens de 1952-1955 (MARENGO; ALVES, 2005) e de 2013-2014 que assolaram a Região Sudeste brasileira; nesses períodos, as vazões caíram drasticamente, acompanhando o comportamento da série de chuvas dos mesmos períodos, das duas estações pluviométricas (Figuras 28 e 29). A estiagem ocorrida em 2001-2003 Na Região Sudeste (MARENGO; ALVES, 2005) não mostrou alterações tão significativas nas séries históricas de chuvas e vazões quanto os dois períodos de seca citados anteriormente.

#### 4.1.3 Parâmetros sedimentológicos

No curso superior, apenas a estação fluviométrica Santa Branca (estação 2, Figura 23), localizada imediatamente a jusante da barragem Santa Branca, possui série temporal de dados de concentração de MPS. Embora esta estação fluviométrica possua dados de vazão de 1953 a 2018, as amostragens sedimentológicas foram realizadas somente a partir de 2000, quando ambas as barragens do curso superior já estavam instaladas há décadas. Apesar de essa estação possuir quase vinte anos de dados de MPS, a frequência das amostragens é muito irregular (Figura 34 e Quadro 4).

Figura 34 – Série temporal de concentração de MPS e vazão média mensal da estação Santa Branca.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência obtida por regressão linear para a concentração de MPS; a equação da reta está representada no canto superior direito.

Legenda: MPS – Material particulado em suspensão.

Fonte: A autora, 2019.

A série temporal de concentração de MPS mostrou comportamento decrescente de 2000 a 2018 (Figura 34), como possível resposta à retenção de água e sedimentos nos dois reservatórios de cabeceira. O valor médio de concentração de MPS no período foi de 29 mg/L. Valores acima da média foram registrados normalmente no verão, coincidindo, na maioria das vezes, com os picos de vazão.

Foi possível observar os efeitos da estiagem de 2013-2014 na série de concentração de MPS. Nesse período, foram registrados alguns valores acima da média, porém, a frequência de valores baixos de concentração de MPS aumentou, fazendo com que de 2013 a 2018, a média caísse para 19 mg/L.

Apesar da inexistência de dados anteriores à instalação das barragens Paraibuna e Santa Branca, a diminuição dos valores de concentração de MPS de 2000 a 2018 nas poucas amostras disponíveis da estação Santa Branca (Figura 34) pode ser um indicativo de que essas barragens

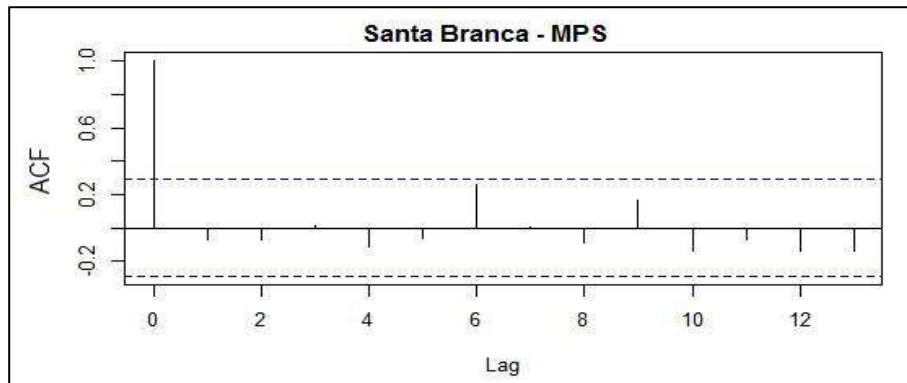


impactam o fluxo fluvial a sua jusante. Além da retenção de grandes volumes de água (e, conseqüentemente, sedimentos) em seus reservatórios, as barragens Paraibuna e Santa Branca regularizam o fluxo hidrológico para controlar os picos de vazão. Assim, podem estar contribuindo para diminuir o fluxo de sedimentos que normalmente fluiria rio abaixo. Isso poderá interromper a continuidade longitudinal do sistema fluvial e alterar morfologicamente o canal.

Ao contrário do ocorrido com a série de vazões da estação Santa Branca (onde graças à regularização do fluxo ocorre autocorrelação dos dados de um ano com os do ano anterior), não foi detectada correlação serial no correlograma da série temporal de MPS (Figura 35). Essa ausência de autocorrelação dos dados pode ser explicada devido ao pequeno número e irregularidade na frequência das amostragens.

Apesar da ausência de autocorrelação, o teste de Mann-Kendall tradicional não foi aplicado à série de concentração de MPS para confirmar a direção da tendência e a significância estatística do comportamento negativo indicado pela regressão linear em função do pequeno número de amostragens, o que poderia comprometer os resultados do mesmo.

Figura 35 – Correlograma da série temporal de concentração de MPS da estação Santa Branca.



OBS.: As linhas tracejadas representam os limites de confiança a 95% para a hipótese de não ter correlação serial.

Legenda: ACF – Função de autocorrelação; Lag – Intervalo de tempo em anos.

Fonte: A autora, 2019.

#### 4.1.4 Morfologia de vista em planta

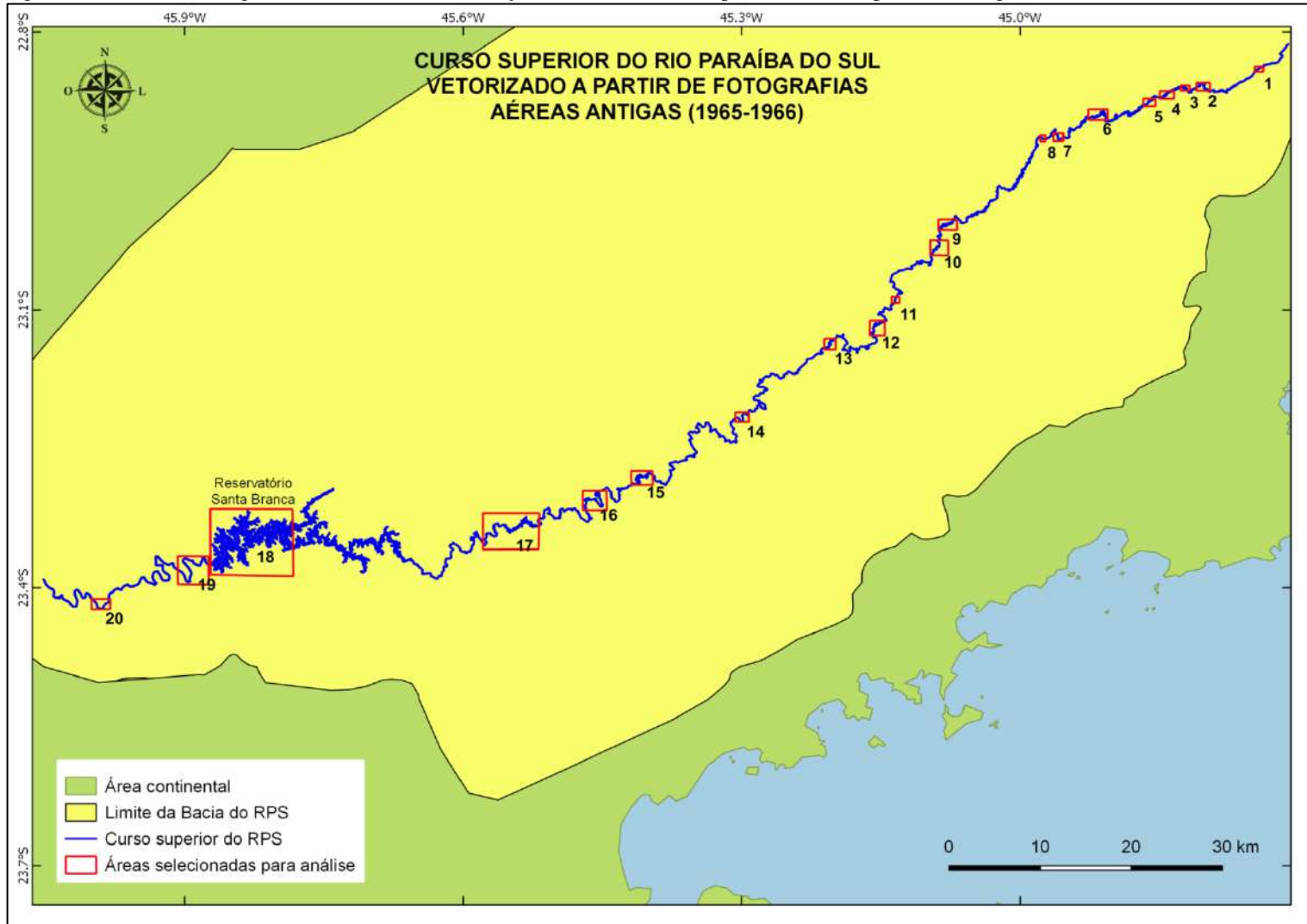
Para a análise da morfologia de vista em planta do curso superior do RPS foram vetorizados os elementos fluviais extraídos de fotografias aéreas de datas distintas: 1966 (exceto pequeno trecho próximo à nascente, cuja fotografia data de 1965) e 2004 (Figuras 25 e 26).

Nos produtos cartográficos resultantes dessa vetorização (Figuras 36 e 37) é possível identificar, mesmo em escala reduzida, a dimensão dos reservatórios das duas grandes barragens construídas no curso superior: Paraibuna e Santa Branca, respectivamente, nas porções mediana e final desse curso. A primeira foi construída no final da década de 1970 e, por isso, seu reservatório, que é o maior do RPS, está contemplado apenas no produto cartográfico gerado a partir das fotografias de 2004 (Figura 37). Já o reservatório de Santa Branca, existente desde 1961, está representado nos dois produtos cartográficos resultantes da vetorização das fotografias aéreas (Figuras 36 e 37).

No curso superior foi possível observar, pelas fotografias, que o canal fluvial apresenta trechos de baixa sinuosidade (bem próximo à nascente) e outros bastante sinuosos e até mesmo meandantes (na porção mediana); à medida que o rio se aproxima do reservatório de Paraibuna, a sinuosidade torna-se sua característica mais marcante. Face à extensão do curso superior, e visando facilitar a análise morfológica, foram selecionadas vinte áreas ao longo do mesmo onde foi observado algum tipo de alteração morfológica relevante (Figuras 36 e 37).

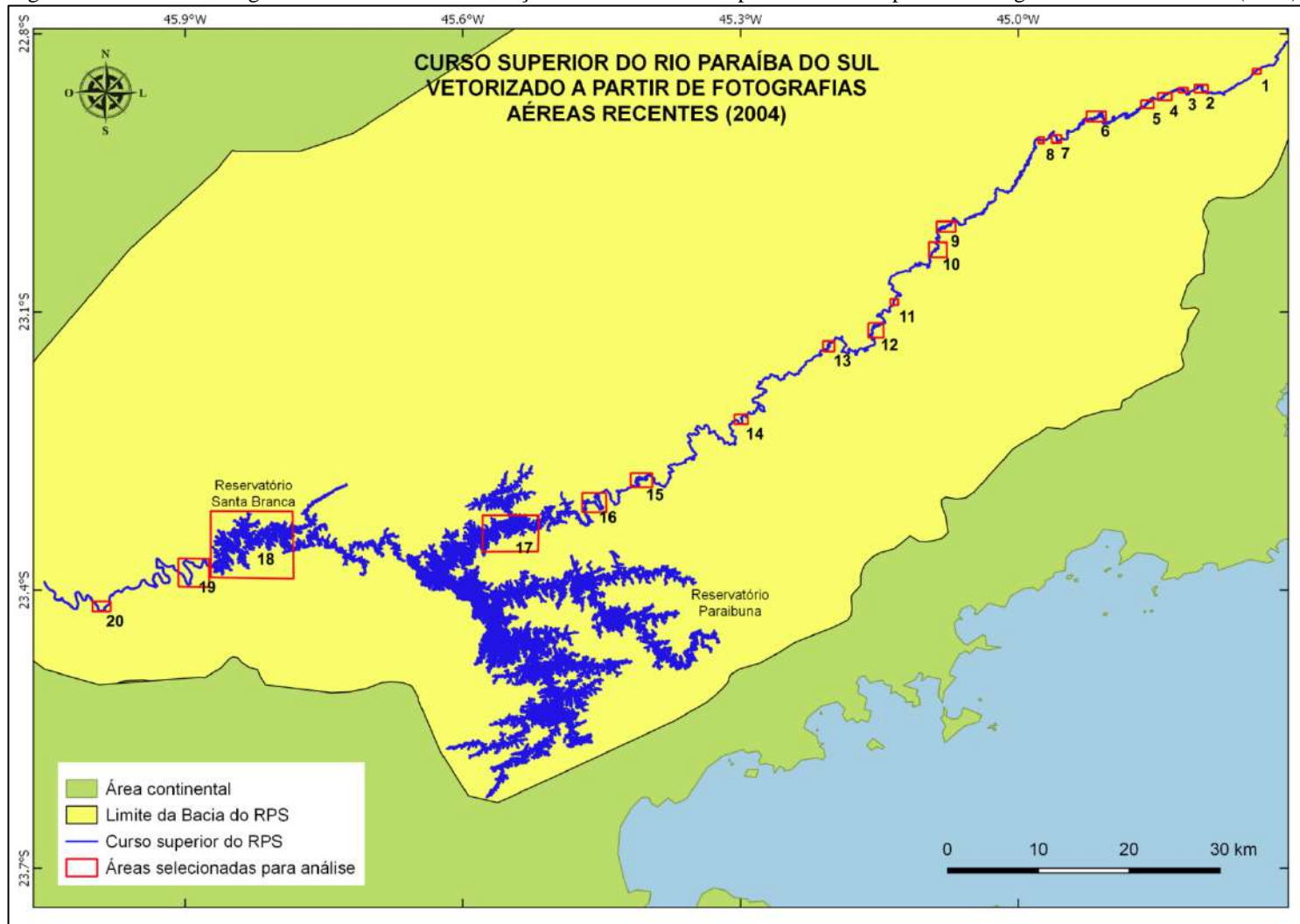
Essas áreas apresentam diferentes tamanhos e, por isso, foram gerados produtos cartográficos multiescalares a partir das mesmas, de acordo com o detalhe que se pretendeu mostrar. As áreas 1 a 16 encontram-se a montante da área que foi ocupada pelo reservatório da barragem de Paraibuna; a área 17 corresponde àquela alagada por esse reservatório, e a área 18, à do reservatório de Santa Branca; as áreas 19 e 20 localizam-se a jusante dos reservatórios, na porção final do curso superior. Nessas áreas, a hidrografia (canal principal, meandros abandonados e reservatórios) foram representados em azul; as ilhas, em amarelo; e as barras arenosas, em laranja.

Figura 36 – Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso superior do RPS a partir de fotografias aéreas do IBGE (1965-1966).



Fonte: A autora, 2019.

Figura 37 – Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso superior do RPS a partir de fotografias aéreas do IBGE (2004).



Fonte: A autora, 2019.

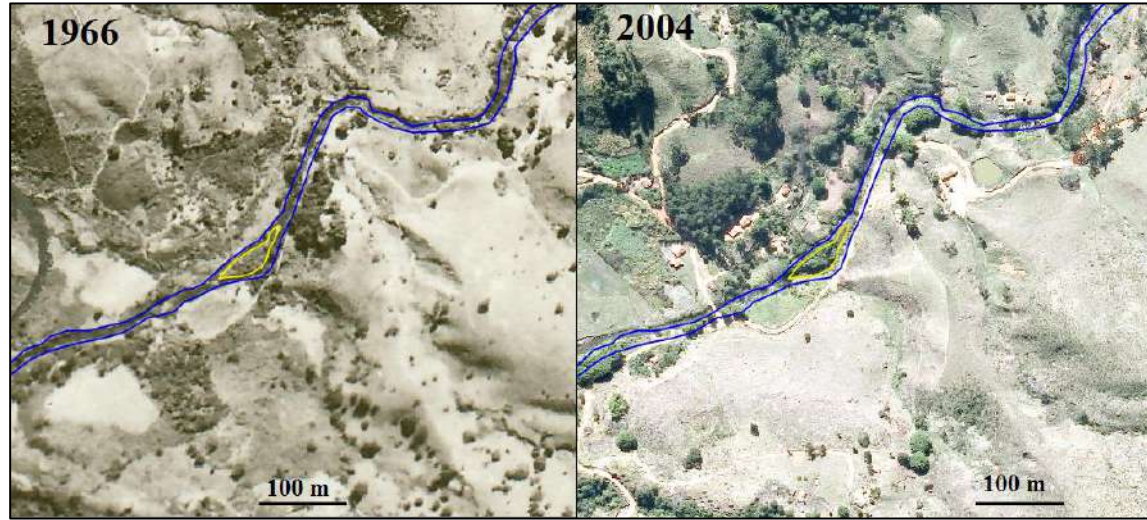
A área 1 (Figuras 36 e 37), localizada menos de 10 km a jusante da nascente e longe da influência da regularização de vazão realizada pelas barragens da porção final do curso superior, apresenta o canal fluvial sinuoso, sem alterações morfológicas significativas ao longo dos quase 40 anos de intervalo temporal entre as fotografias aéreas daquele trecho (Figura 38); a ilha fotografada em 1966 foi registrada sem grandes alterações também na foto de 2004; a largura média do canal fluvial sofreu diminuição de 3 m nesta área.

As áreas 2 a 6 (Figuras 36 e 37) localizam-se em um trecho meandrante do rio que se estende de 15 km a 50 km, aproximadamente, a jusante da nascente do rio Paraitinga/RPS; embora a montante dessas áreas não existam barragens, nelas foram observados os primeiros sinais de mudanças morfológicas no canal fluvial.

A área 2 (Figura 39), por exemplo, apresentou a primeira alteração significativa na morfologia de vista em planta ao longo das quase quatro décadas entre as fotografias; nela se observou a presença de um meandro abandonado, feição não identificada a montante. Nesta área, a largura média do canal fluvial sofreu uma diminuição de 2 m ao longo dos anos.

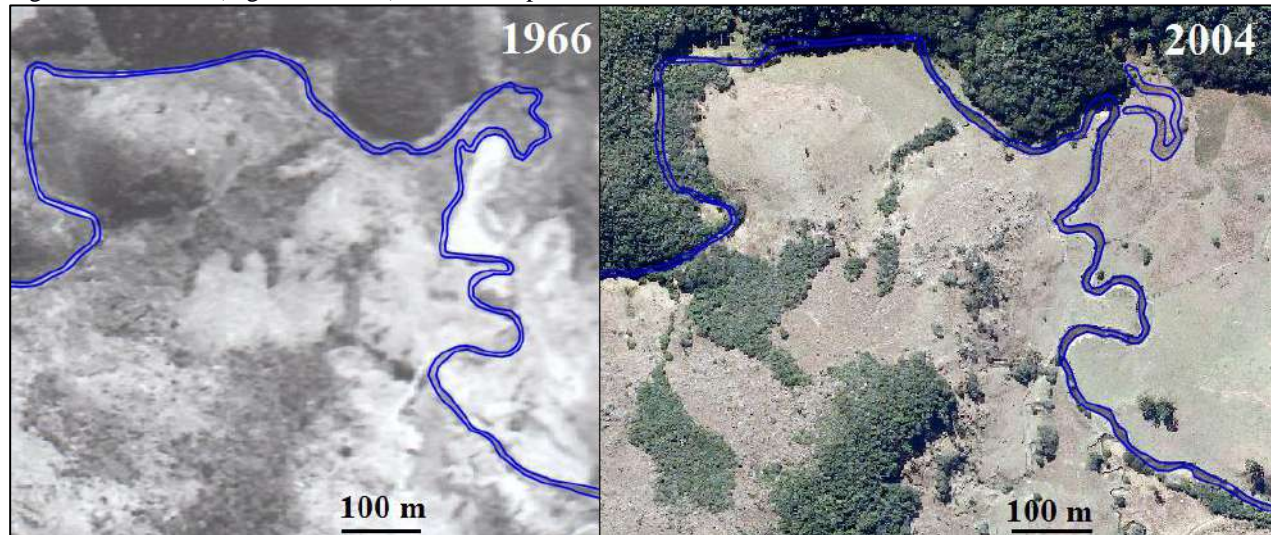
À medida que o curso fluvial segue a jusante, novas mudanças foram observadas nas áreas 3 a 6 (Figuras 36 e 37). A variação da largura média do canal fluvial oscilou ao longo do trecho onde essas quatro áreas estão localizadas: na área 3 (Figura 40), a largura média diminuiu 1 m, na área 4 (Figura 41) aumentou 1 m, na área 5 (Apêndice A) diminuiu 2 m e na área 6 (Apêndice A) aumentou 1 m. A presença de vários meandros abandonados indicam uma migração lateral do canal do RPS ao longo dos anos, evidenciando uma dinâmica fluvial intensa, que pode ter sido a razão da irregularidade na variação da largura média do canal nesse trecho. Até mesmo a revitalização de meandros abandonados foi observada (Área 4, Figura 41).

Figura 38 – Área 1 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



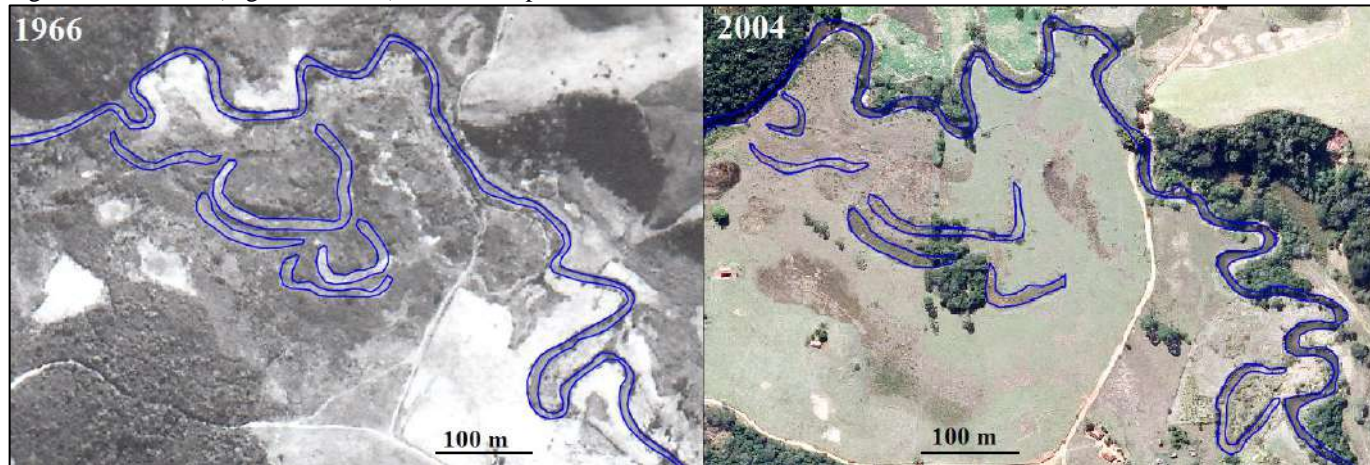
Fonte: A autora, 2019.

Figura 39 – Área 2 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



Fonte: A autora, 2019.

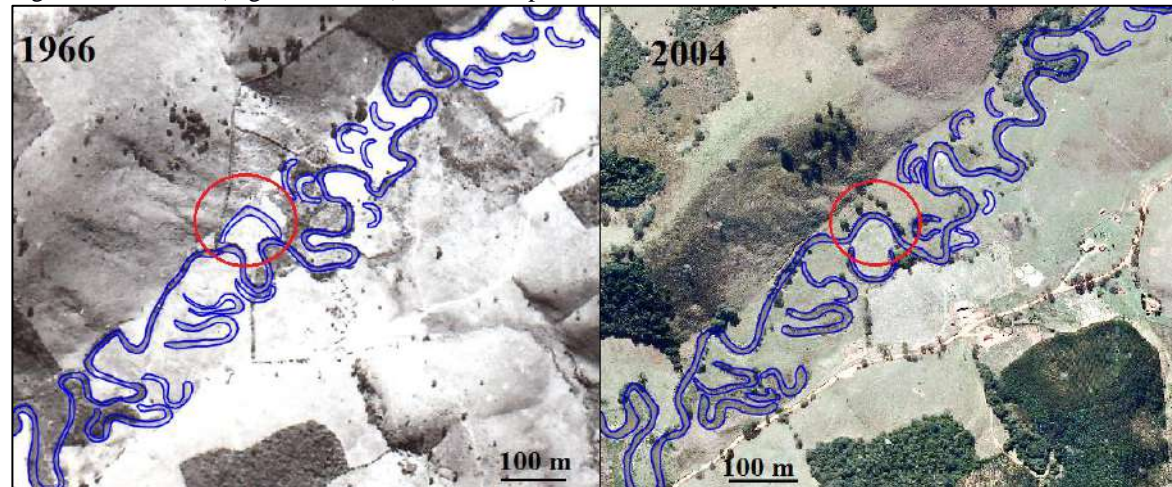
Figura 40 – Área 3 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



OBS.: Presença de meandros abandonados, alguns já existentes em 1966 e outros registrados apenas na foto mais recente, evidenciando a alteração no curso fluvial nas últimas décadas.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 41 – Área 4 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



OBS.: No detalhe em vermelho, um meandro abandonado em 1966, revitalizado 2004.

Fonte: A autora, 2019.

Na área 7 (Figuras 36, 37 e 42), em um trecho mais “encaixado”, o canal voltou a apresentar poucas alterações morfológicas na vista em planta. Ilhas existentes em 1966 continuam presentes em 2004, com pequenas mudanças em sua forma. A largura média do canal aumentou 1 m.

Na área 8 (Figuras 36, 37 e 43), barras arenosas existentes em 1966 também foram observadas em 2004, embora menores, registrando prováveis processos de erosão ao longo do tempo ou diminuição da área emersa das mesmas devido ao aumento no volume de água do canal, que teve sua largura média aumentada em 4 m nesse trecho.

As áreas 9 a 16 (Figuras 36 e 37) foram selecionadas na porção mediana do curso superior, a montante dos reservatórios de Paraibuna e Santa Branca. Nesse trecho, intercalaram-se alterações morfológicas em alguns pontos do curso fluvial do rio Paraitinga/RPS (como aquelas já registradas em algumas áreas anteriores) com a manutenção de feições morfológicas em outros.

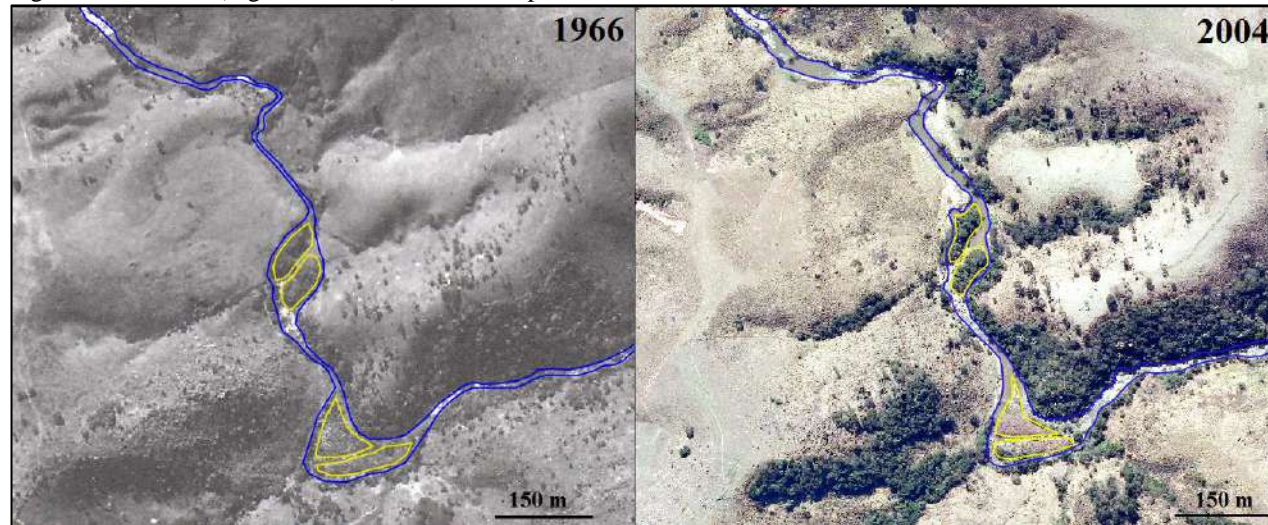
A área 9 (Apêndice B) – que teve um aumento de 1 m na largura média do canal – apresentou, assim como alguns trechos a montante, vários meandros abandonados. Já na Área 10, 1 km a jusante da anterior, o padrão sinuoso do curso fluvial se manteve inalterado (Apêndice B), com variação apenas na largura média do canal, que aumentou 9 m entre uma data e outra. O mesmo aconteceu na área 11 (Apêndice C), aproximadamente 15 km a jusante da área 10, onde o curso fluvial manteve praticamente o mesmo padrão morfológico, aumentando também a largura média do canal em 9 m. Nesta área foi identificada uma barra arenosa na fotografia de 2004 que não foi observada na fotografia antiga. Aproximadamente 7 km a jusante da área 11, na área 12 (Apêndice C), o canal fluvial voltou a apresentar mudanças morfológicas significativas ao longo do tempo: meandros abandonados, surgimento de uma ilha e de uma barra arenosa; nessa área, houve aumento de 1 m na largura média do canal.

Na área 13 (Figura 44), 15 km a jusante da anterior, ocorreu aumento de 3 m na largura média do canal fluvial e algumas alterações nas ilhas existentes. Algumas aumentaram de tamanho, outras se fundiram em uma única ilha e novas ilhas surgiram.

Mais a jusante, na área 14 (Figura 45), a largura média do canal aumentou ainda mais (4 m) com a proximidade dos reservatórios de Paraibuna e Santa Branca (Figuras 36 e 37). Algumas ilhas observadas em 1966 não foram vistas em 2004, afogadas devido à elevação do nível de água do canal após o represamento a jusante.



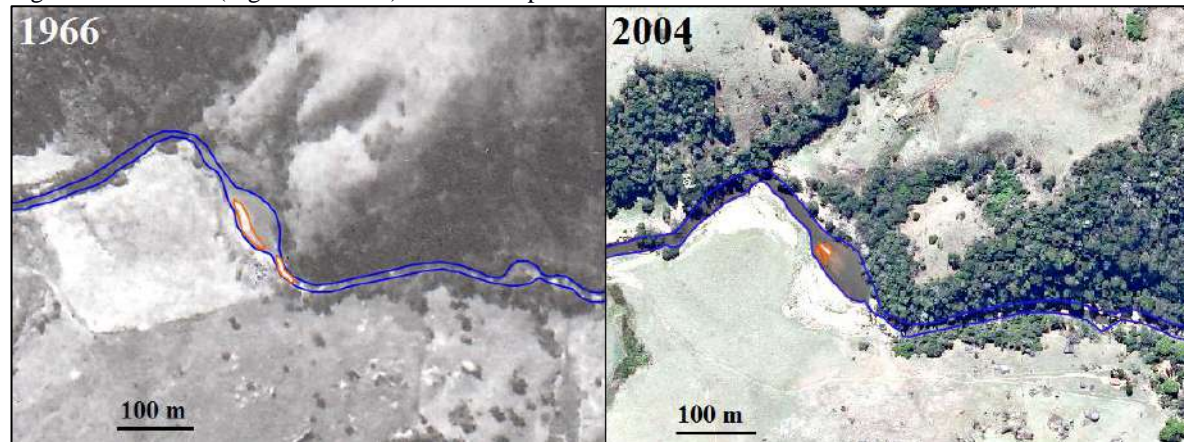
Figura 42 – Área 7 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



OBS.: Ilhas com vegetação (em amarelo) fotografadas em 1966 continuam presentes em 2004.

Fonte: A autora, 2019.

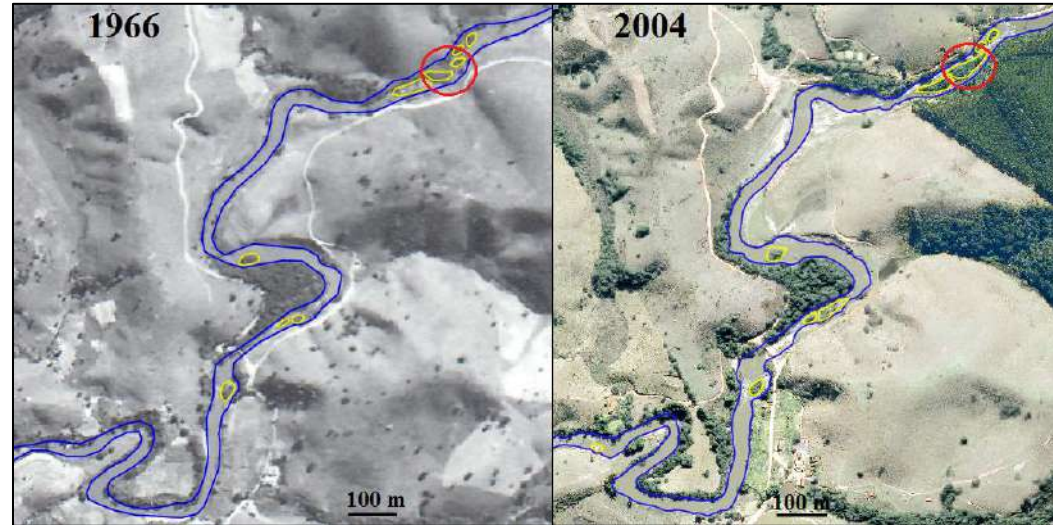
Figura 43 – Área 8 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



OBS.: Barras arenosas (em laranja) existentes em 1966 estão também presentes na fotografia recente, embora menores.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 44 – Área 13 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



OBS.: Aumento no tamanho de algumas ilhas (em amarelo) já existentes na década de 1960. No detalhe em vermelho, duas ilhas que aparecem em 1966 tornaram-se uma única feição mais alongada com o tempo.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 45 – Área 14 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



OBS.: Presença de algumas ilhas (em amarelo) em 1966, não observadas na foto mais recente.

Fonte: A autora, 2019.

As áreas 15 e 16 foram selecionadas a 8 km e 1 km a montante do reservatório de Paraibuna, respectivamente (Figuras 36 e 37). Observaram-se, na área 15 (Figura 46), meandros abandonados ao longo do canal fluvial; porém, eles já existiam em 1966, antes da instalação do reservatório de Paraibuna. Nesta área, a largura média do canal fluvial aumentou 5 m com a proximidade da represa. Na área 16 (Figura 47), ainda mais próxima ao reservatório de Paraibuna, as mudanças morfológicas foram mais significativas: ilhas existentes em 1966, antes da instalação do reservatório, desapareceram após a inundação do mesmo; a largura média do canal aumentou mais de dez vezes em relação à anterior (54 m). Durante o processo de vetorização do canal a partir das fotografias de 2004, observou-se, nas margens do mesmo, vegetação típica de ambientes lênticos, influência das águas paradas do reservatório.

Na área alagada pelo reservatório de Paraibuna (área 17 nas Figuras 36 e 37) observaram-se mudanças intensas ocorridas na morfologia fluvial (Figura 48). Ali, pequenas ilhas que existiam antes da inundação da represa foram encobertas pelas águas, que também atingiram grandes extensões no entorno do vale do Rio Paraitinga/RPS transformando topos de morros em ilhas do reservatório.

A área 18 (Figura 49) foi selecionada na represa Santa Branca (Figuras 36 e 37), já existente em 1966. Praticamente não se observaram alterações morfológicas neste trecho, onde as águas paradas do reservatório preservaram a morfologia fluvial há quase quatro décadas.

As áreas 19 e 20 (Figuras 36 e 37) estão situadas a jusante do reservatório de Santa Branca. Em ambas (Figuras 50 e 51), observou-se o surgimento de barras arenosas e pequenas ilhas, além do aumento da área emersa das mesmas, decorrente da diminuição do volume de água no canal fluvial após o represamento das águas a montante. Nas duas áreas houve diminuição da largura média do canal fluvial: 11 m na área 19, e 2 m na área 20.

As principais alterações observadas nas áreas 1 a 20 do curso superior do RPS foram compiladas e organizadas em um quadro para melhor compreensão (Apêndice D).