

4.3.5 Morfologia transversal

No curso médio inferior foram construídos perfis transversais de sete estações fluviométricas: Queluz (estação 5, Figura 23), localizada a jusante das barragens de Lavrinhas e Queluz (ambas sem reservatório) e a montante da barragem de Funil (com reservatório); Itatiaia (estação 6, Figura 23), Resende (estação 7, Figura 23) e Volta Redonda (estação 8, Figura 23), nesta ordem, a jusante da barragem de Funil e a montante da UEL Santa Cecília (onde ocorre a transposição de águas para o rio Guandu); e Barra do Pirá (estação 9, Figura 23), Paraíba do Sul (estação 10, Figura 23) e Anta (estação 11, Figura 23), nesta sequência, a jusante da UEL Santa Cecília. A estação Anta, também se localiza a jusante da barragem de mesmo nome (com reservatório).

Da estação Queluz (estação 5, Figura 23), foram utilizados dados de 2000 a 2013 para elaboração dos perfis transversais, sendo dois do período da estiagem e dois da cheia (Figura 111). Embora em todos os perfis a forma “UV” do canal predomine, observam-se irregularidades na parte lateral do canal tanto nos perfis da estiagem como nos da cheia. Entretanto, a migração lateral do canal nesse trecho do RPS, onde o vale se encontra “encaixado” em um relevo controlado estruturalmente, ocorreu, mas foi pequena (de até ~ 1,5 m na estiagem e ~ 2,5 m na cheia) quando comparada àquelas observadas nos perfis transversais das estações Pindamonhangaba e Guaratinguetá (Figuras 79 e 80), nas planícies aluviais do curso médio superior.

Da estação Itatiaia (estação 6, Figura 23), imediatamente a jusante do reservatório de Funil, foram gerados perfis transversais de 1992 a 2013, quatro da estiagem e quatro da cheia (Figura 112). Nessa estação, apesar do controle estrutural do relevo do curso médio inferior e da regulação da vazão exercida pelo reservatório de Funil, a montante, ocorreu migração lateral do canal tanto na estiagem (de até ~ 7 m) como na cheia (de até ~ 10 m), embora também menos expressiva que aquela registrada nas estações do curso médio superior (Figuras 79 e 80). A forma geral do canal (em “UV”) variou pouco, embora na cheia irregularidades tenham sido observadas no fundo do canal (Figura 112).

Segundo Kondolf (1997), enquanto a montante das barragens com acúmulo de água os sedimentos de fundo e a grande maioria dos sedimentos em suspensão são depositados nas águas do reservatório ou mais acima deste, a jusante dessas obras a água que é liberada pode até ter força suficiente para mobilizar sedimentos, mas não possui carga sedimentar. Essa água, denominada por muitos autores de “*hungry water*” (“água faminta”), em função do

excesso de energia, erode o canal e suas margens provocando incisão. Provavelmente graças a esse fenômeno – típico de trechos fluviais a jusante de reservatórios – se formaram irregularidades no fundo do canal da estação Itatiaia na época da cheia (Figura 112), período em que as águas dos reservatórios podem ser liberadas para evitar o excesso de carga nas barragens.

Os perfis da estação Resende (estação 7, Figura 23), datam de 2008 a 2013, sendo dois da estiagem e dois da cheia (Figura 113). Os perfis da estação Volta Redonda (estação 8, Figura 23) são de 1993 a 2011, sendo quatro da estiagem e cinco da cheia (Figura 114). Assim como na estação Itatiaia (Figura 112), os efeitos da geologia local (vale “encaixado”) e da regularização da vazão nesse segmento onde essas estações estão localizadas, influenciaram na homogeneidade dos seus perfis (Figuras 113 e 114). Tanto na estação Resende como Volta Redonda, a forma do canal (em “U”) variou pouco de um ano para outro e entre diferentes épocas do ano, e a migração lateral foi, tanto na estiagem como na cheia, de até ~ 4 m em Resende e de até ~ 7 m, em Volta Redonda. Também nessas estações foram registradas irregularidades no fundo do canal, indicando a ocorrência de processos erosivos no fundo, provavelmente relacionados à ação das “*hungry waters*” (Figuras 113 e 114).

Da estação Barra do Piraí (estação 9, Figura 23), a jusante da UEL Santa Cecília (onde ocorre a transposição para o rio Guandu), foram gerados perfis de 1994 a 2013, quatro da estiagem e três da cheia (Figura 115). A forma “UV” do canal foi preservada ao longo dos anos, evidenciando como a geologia e a regularização da vazão inibiram a ocorrência de alterações significativas na forma do mesmo. Mesmo assim, houve migração lateral de até ~ 10 m (na estiagem e na cheia), e oscilações no fundo do canal foram registradas em ambas as épocas do ano (Figura 115), evidenciando a existência de processos erosivos. No trecho onde a estação Barra do Piraí está localizada, o volume de água do RPS chega reduzido em um terço do original, em função da transposição que ocorre a montante, e com menor carga sedimentar após passar pela barragem de Funil. Logo, o canal, neste segmento, também está suscetível à ação erosiva das “*hungry waters*” quando a vazão das barragens a montante é liberada.

Dados de 1995 a 2015 foram utilizados para construção dos perfis transversais da estação Paraíba do Sul (estação 10, Figura 23), localizada a jusante da estação Barra do Piraí e da UEL Santa Cecília; dentre os perfis gerados (Figura 116), três correspondem à época da estiagem e quatro à da cheia. Como nas estações a montante do curso médio inferior, a morfologia do canal (“UV”) se manteve ao longo do tempo, característico de um canal com fluxo regularizado e com controle estrutural. Nessa estação, a migração lateral foi de até ~ 2

m na estiagem, e até ~ 5 m na cheia. Mudanças no fundo do canal foram observadas nos perfis desta estação (Figura 116), também submetida à ação das “*hungry waters*”. Ali, tanto na estiagem como na cheia, houve aumento da profundidade do canal, resultante de processos erosivos. Cabe destacar que a estação fluviométrica Paraíba do Sul está localizada a montante da confluência de dois importantes rios do curso médio inferior – o Paraíba (mineiro) e o Piabanha – que contribuem com o aumento da disponibilidade hídrica do RPS cerca de 20 km abaixo desta estação, não influenciando os dados da mesma.

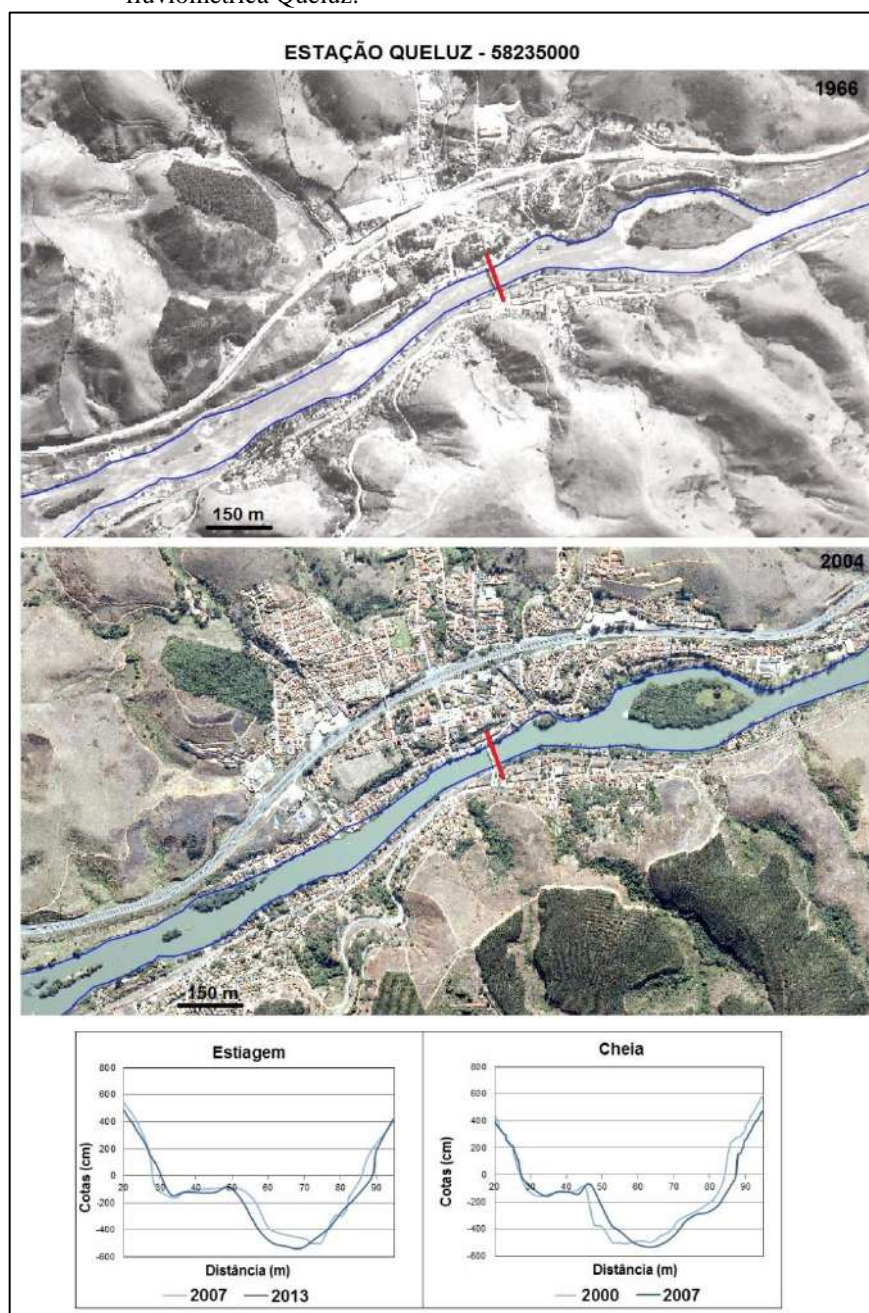
Finalmente, a estação Anta (estação 11, Figura 23), imediatamente a jusante do reservatório da barragem de Anta, possui dados de 1992 a 2005 que permitiram a elaboração de seis perfis transversais, três da estiagem e três da cheia (Figura 117). Como a barragem de Anta entrou em operação em 2013, não foi possível avaliar o impacto dessa obra sobre os perfis transversais desta estação. Nos perfis transversais da estação Anta (Figura 117) foram identificados os efeitos de regularização do RPS, realizada pelas barragens mais antigas, localizadas a montante. A forma geral do canal fluvial se manteve em “UV”, porém, ocorreram processos de migração lateral do canal, tanto na estiagem como na cheia (de até ~ 5 m e ~ 16 m, respectivamente), e oscilações na morfologia do fundo (Figura 117), típicos de trechos submetidos à ação erosiva das “*hungry waters*” (Figuras 112 a 116).

A partir dos perfis transversais das estações do curso médio inferior, foram calculados os parâmetros sugeridos por Su et al. (2015) para avaliação de mudanças na morfologia transversal do canal: área da seção transversal (A), profundidade média da água (PM) e a razão LA/PM, na qual LA corresponde à largura da água (Tabelas 10 e 11). Em todas as estações deste curso, a variabilidade dos parâmetros de Su et al. (2015), foi menor que a registrada na estação Estrada do Cunha (estação 1, Figura 23), localizada no curso superior a montante de todas as barragens do RPS, onde o fluxo fluvial não é regularizado (Tabela 3) e também menores que as obtidas nas estações do curso médio superior (estações 3 e 4, Figura 23), onde atividades antrópicas ostensivas contribuem com o aumento da variabilidade dos parâmetros (Tabela 6).

Nas estações do curso médio inferior, submetidas aos efeitos da regularização da vazão desde a década de 1950, a variação dos parâmetros calculados a partir dos perfis transversais foi, em média, de 7% para A, 8% para PM e -7% para a razão LA/PM na estiagem. No período da cheia, a variação média foi de -16% para A, -1% para PM e -2% para a razão LA/PM (Tabelas 10 e 11). Os baixos percentuais de variação dos parâmetros mencionados indicam o quanto a regularização inibe as alterações naturais do fluxo fluvial e, conseqüentemente, as mudanças na morfologia transversal do canal advindas dessas

oscilações. Soma-se a isso o fato de que o curso médio inferior do RPS encontra-se, em sua maior parte, submetido a grande controle estrutural, o que também contribui com a manutenção da morfologia do canal fluvial.

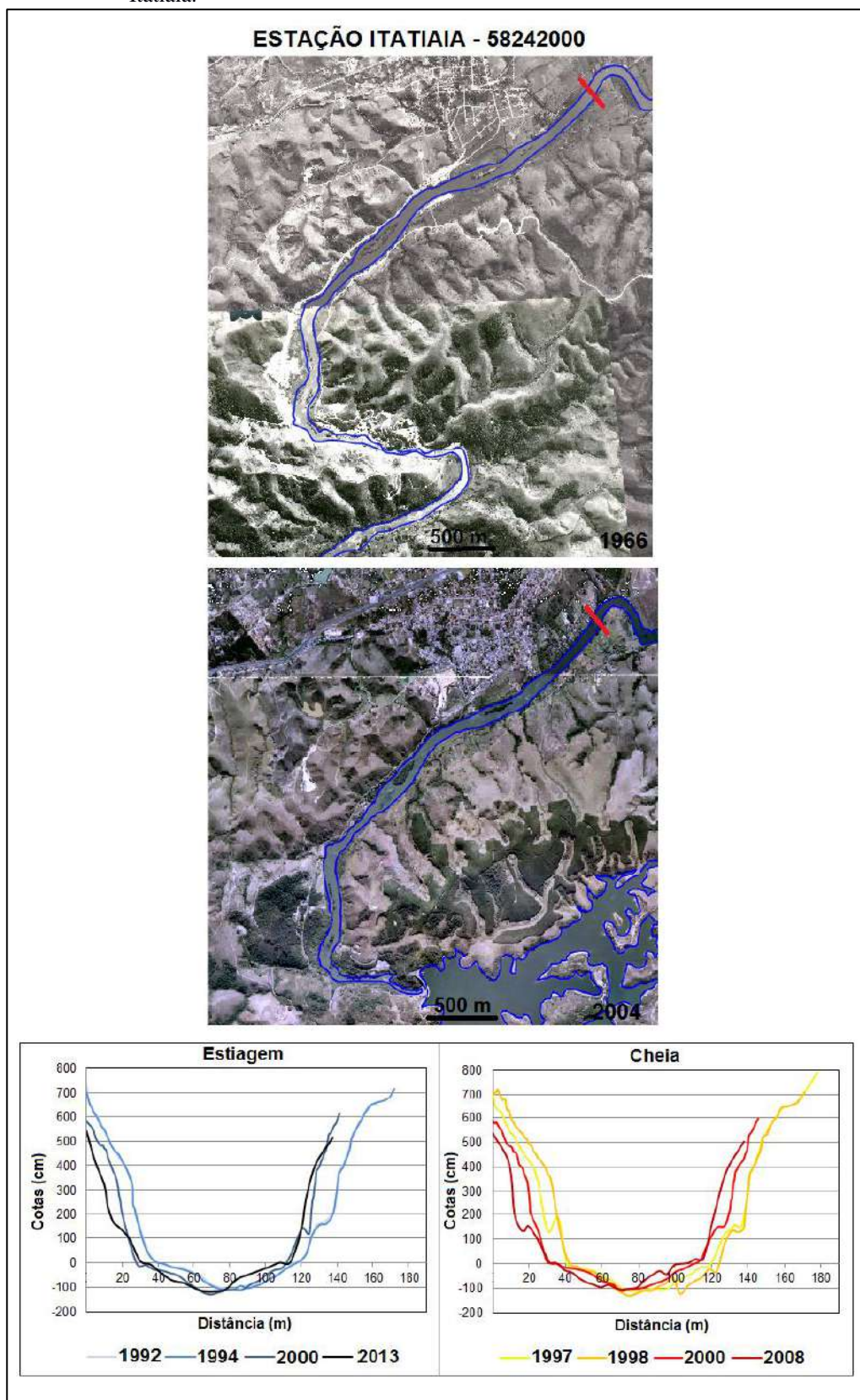
Figura 111 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Queluz.



OBS.: Nas fotografias aéreas, o segmento vermelho refere-se à localização do perfil transversal.

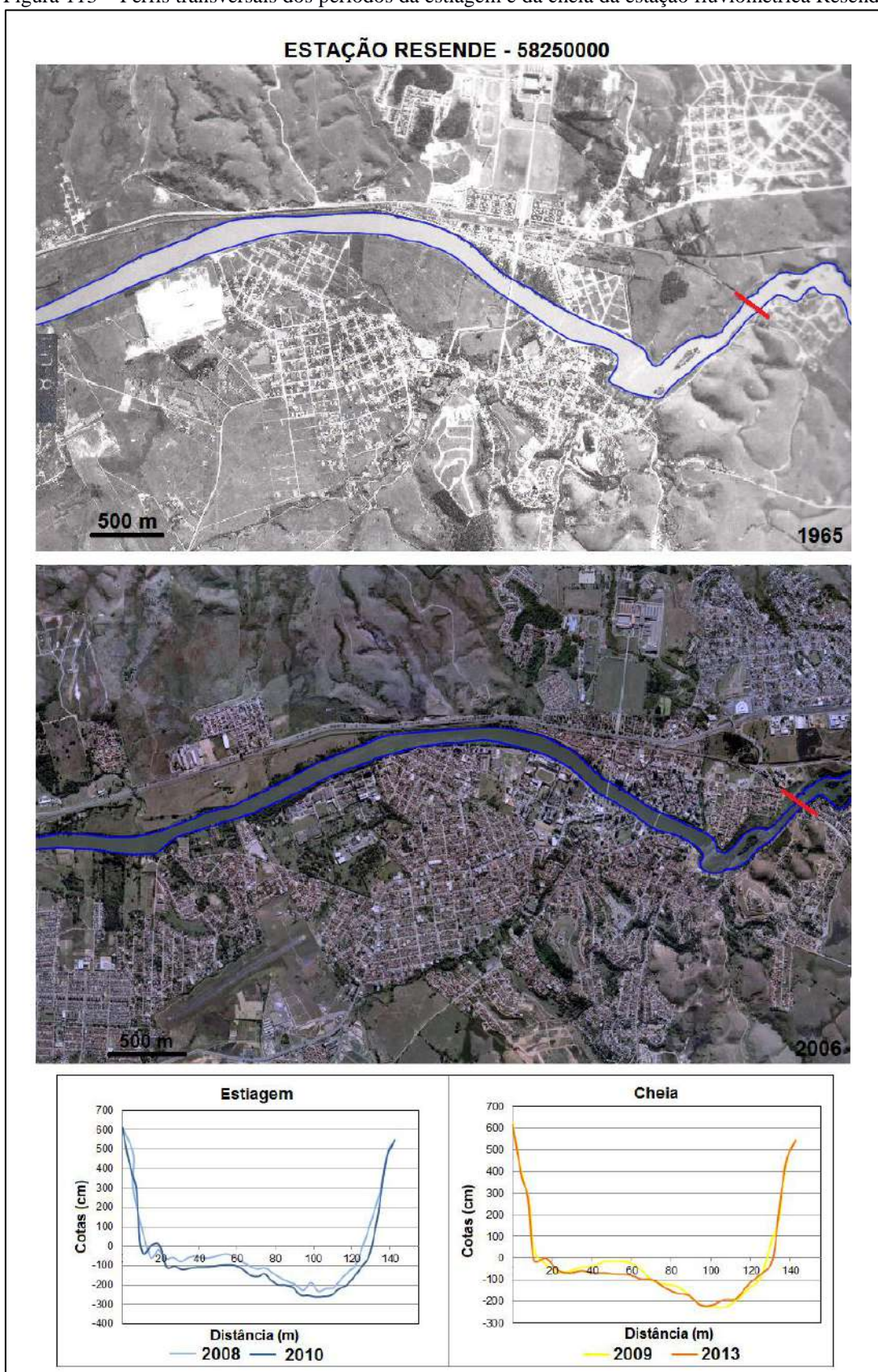
Fonte: A autora, 2019.

Figura 112 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Itatiaia.



OBS.: Nas fotografias aéreas, o segmento vermelho refere-se à localização do perfil transversal.
 Fonte: A autora, 2019.

Figura 113 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Resende.



OBS.: Nas fotografias aéreas, o segmento vermelho refere-se à localização do perfil transversal.

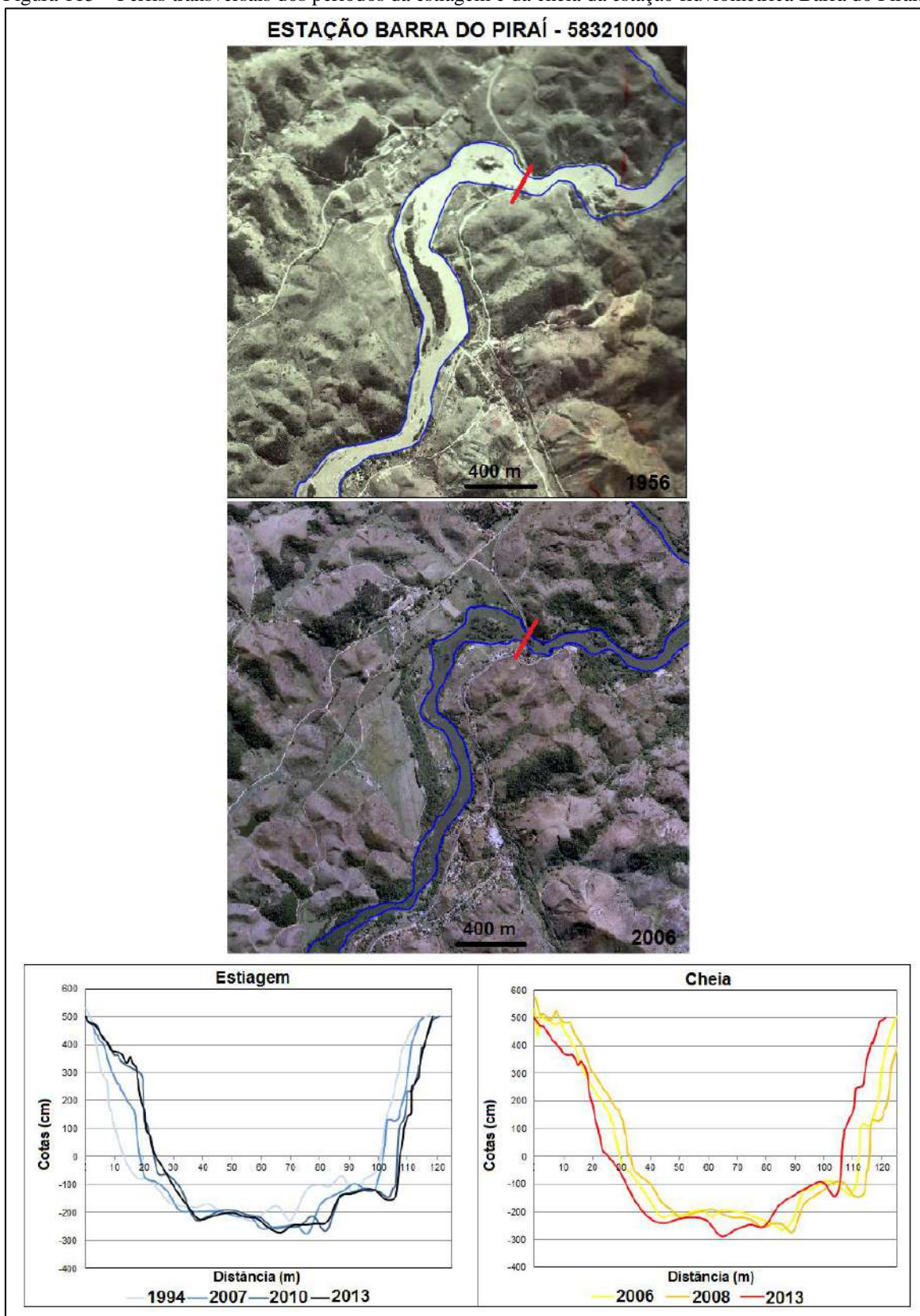
Fonte: A autora, 2019.

Figura 114 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Volta Redonda.



OBS.: Nas fotografias aéreas, o segmento vermelho refere-se à localização do perfil transversal.
Fonte: A autora, 2019.

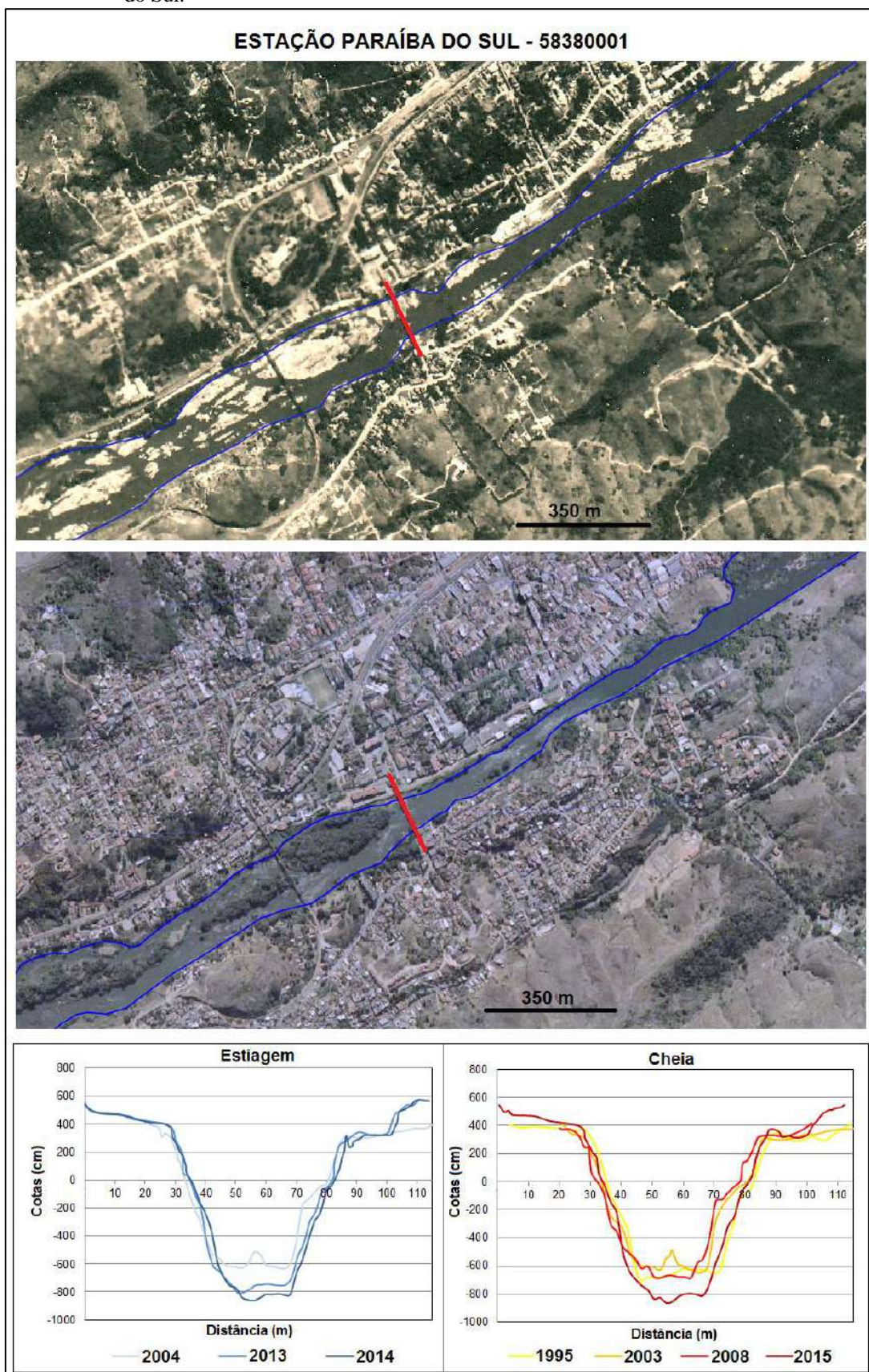
Figura 115 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Barra do Piraí.



OBS.: Nas fotografias aéreas, o segmento vermelho refere-se à localização do perfil transversal.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 116 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Paraíba do Sul.



OBS.: Nas fotografias aéreas, o segmento vermelho refere-se à localização do perfil transversal.
 Fonte: A autora, 2019.

Figura 117 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Anta.

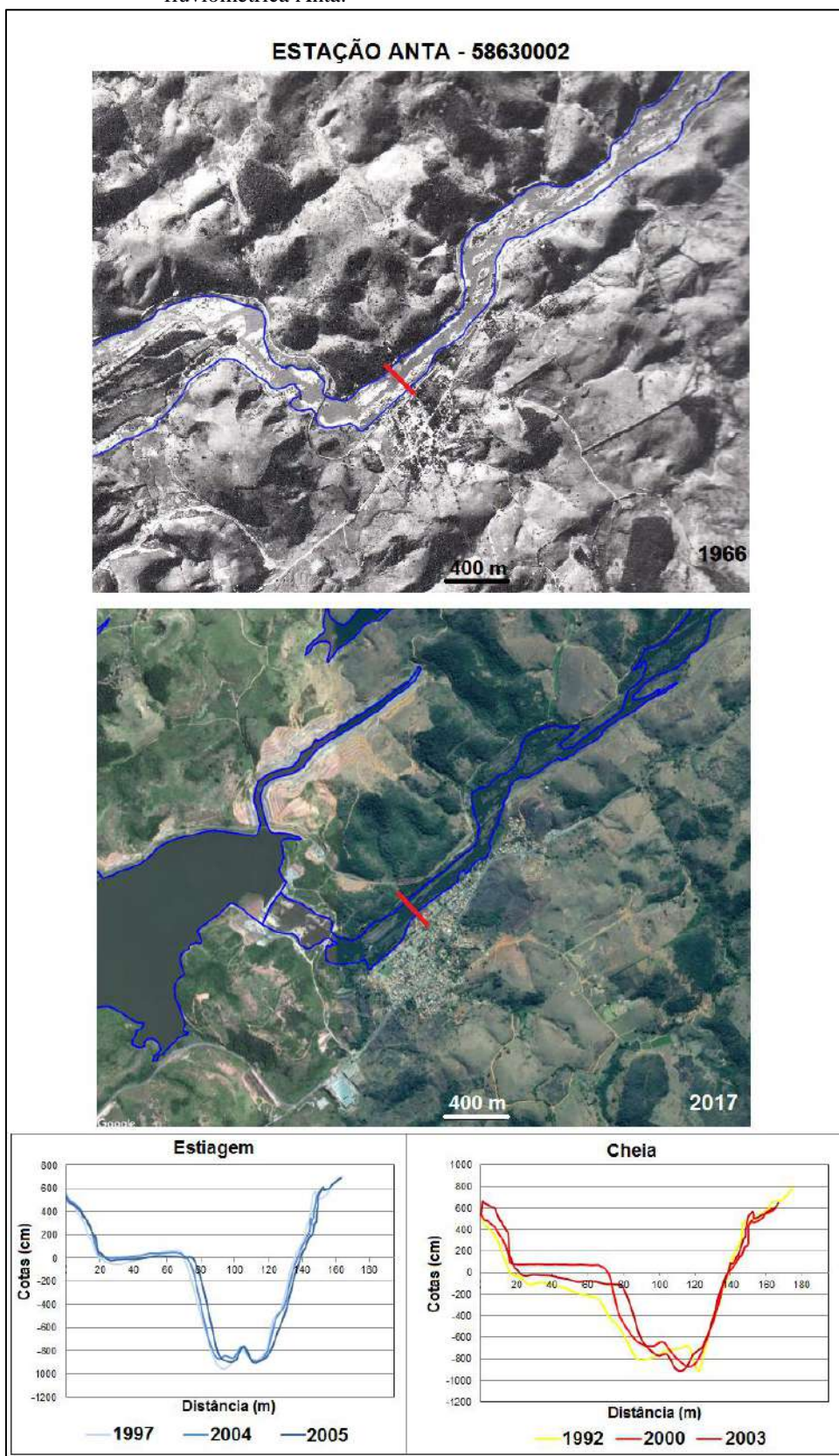


Tabela 10 – Parâmetros para avaliação de mudanças na morfologia transversal das estações Queluz, Itatiaia, Resende, Volta Redonda e Barra do Pirai.

ESTAÇÃO QUELUZ									
ESTIAGEM					CHEIA				
DATA	LA	A	PM	LA/PM	DATA	LA	A	PM	LA/PM
SET/2007	60,5	241,5	4,0	15,2	NOV/2000	59,5	240,3	4,0	14,7
MAI/2013	62,4	262,8	4,2	14,8	NOV/2007	62,4	262,0	4,2	14,9
%Δ		8,8	5,5	-2,2	%Δ		9,0	4,0	0,9
ESTAÇÃO ITATIAIA									
ESTIAGEM					CHEIA				
DATA	LA	A	PM	LA/PM	DATA	LA	A	PM	LA/PM
JUN/1992	108,7	232,3	2,1	50,9	NOV/1997	110,0	229,8	2,1	52,7
JUL/1994	113,3	234,2	2,1	54,8	DEZ/1998	104,0	258,3	2,5	41,9
ABR/2000	105,5	248,3	2,4	44,8	NOV/2000	108,0	229,8	2,1	50,8
SET/2013	107,8	233,7	2,2	49,7	MAR/2008	108,3	220,7	2,0	53,1
%Δ		0,6	1,4	-2,2	%Δ		-4,0	-2,5	0,9
ESTAÇÃO RESENDE									
ESTIAGEM					CHEIA				
DATA	LA	A	PM	LA/PM	DATA	LA	A	PM	LA/PM
JUN/2008	132,0	448,2	3,4	38,9	DEZ/2009	128,4	446,8	3,5	36,9
JUL/2010	129,6	516,8	4,0	32,5	ABR/2013	127,7	469,3	3,7	34,7
%Δ		15,3	17,4	-16,4	%Δ		5,0	5,6	-5,8
ESTAÇÃO VOLTA REDONDA									
ESTIAGEM					CHEIA				
DATA	LA	A	PM	LA/PM	DATA	LA	A	PM	LA/PM
MAI/1993	116,0	347,0	3,0	38,8	JAN/2001	113,6	298,6	2,6	43,2
ABR/2002	113,5	299,7	2,6	43,0	NOV/2003	112,7	262,5	2,3	48,4
JUN/2007	114,9	298,8	2,6	44,2	DEZ/2004	120,8	314,9	2,6	46,3
JUL/2011	116,0	339,4	2,9	39,6	FEV/2006	117,4	347,0	3,0	39,7
					JAN/2007	115,9	315,4	2,7	42,6
%Δ		-2,2	-2,2	2,2	%Δ		5,6	3,5	-1,5
ESTAÇÃO BARRA DO PIRAI									
ESTIAGEM					CHEIA				
DATA	LA	A	PM	LA/PM	DATA	LA	A	PM	LA/PM
AGO/1994	92,0	202,5	2,2	41,8	DEZ/2006	84,9	216,0	2,5	33,4
AGO/2007	85,0	219,1	2,6	33,0	MAR/2008	85,1	225,1	2,6	32,2
JUL/2010	86,0	219,9	2,6	33,6	DEZ/2013	85,0	228,3	2,7	31,6
JUN/2013	87,3	226,3	2,6	33,7					
%Δ		11,8	17,8	-19,4	%Δ		5,7	5,6	-5,2

Legenda: LA – largura da água (em m); A – área da seção transversal (em m²); PM – profundidade média (em m); LA/PM – razão entre a largura da água e a profundidade média; %Δ – percentual de variação entre as datas extrema do período (estiagem/cheia).

Fonte: A autora, 2019.

Tabela 11 – Parâmetros para avaliação de mudanças na morfologia transversal das estações Paraíba do Sul e Anta.

ESTAÇÃO PARAÍBA DO SUL									
ESTIAGEM					CHEIA				
DATA	LA	A	PM	LA/PM	DATA	LA	A	PM	LA/PM
JUL/2004	51,0	244,5	4,8	10,6	NOV/1995	52,5	273,3	5,2	10,1
ABR/2013	50,2	305,0	6,1	8,3	MAR/2003	50,4	226,4	4,5	11,2
ABR/2014	51,0	300,5	5,9	8,7	DEZ/2008	48,8	250,5	5,1	9,5
					JAN/2015	49,4	291,6	5,9	8,4
%Δ		22,9	22,9	-18,6	%Δ		-8,3	-1,4	-5,7
ESTAÇÃO ANTA									
ESTIAGEM					CHEIA				
DATA	LA	A	PM	LA/PM	DATA	LA	A	PM	LA/PM
MAI/1997	122,9	551,6	4,5	27,4	OUT/1992	128,3	626,8	4,9	26,3
SET/2004	122,0	499,7	4,1	29,8	OUT/2000	126,3	465,9	3,7	34,2
ABR/2005	123,6	507,4	4,1	30,1	NOV/2003	120,7	443,9	3,7	32,8
%Δ		-8,0	-8,5	10,0	%Δ		-29,2	-24,7	25,0

Legenda: LA – largura da água (em m); A – área da seção transversal (em m²); PM – profundidade média (em m); LA/PM – razão entre a largura da água e a profundidade média; %Δ – percentual de variação entre as datas extremas do período (estiagem/cheia).

Fonte: A autora, 2019.

4.3.6 Morfologia longitudinal

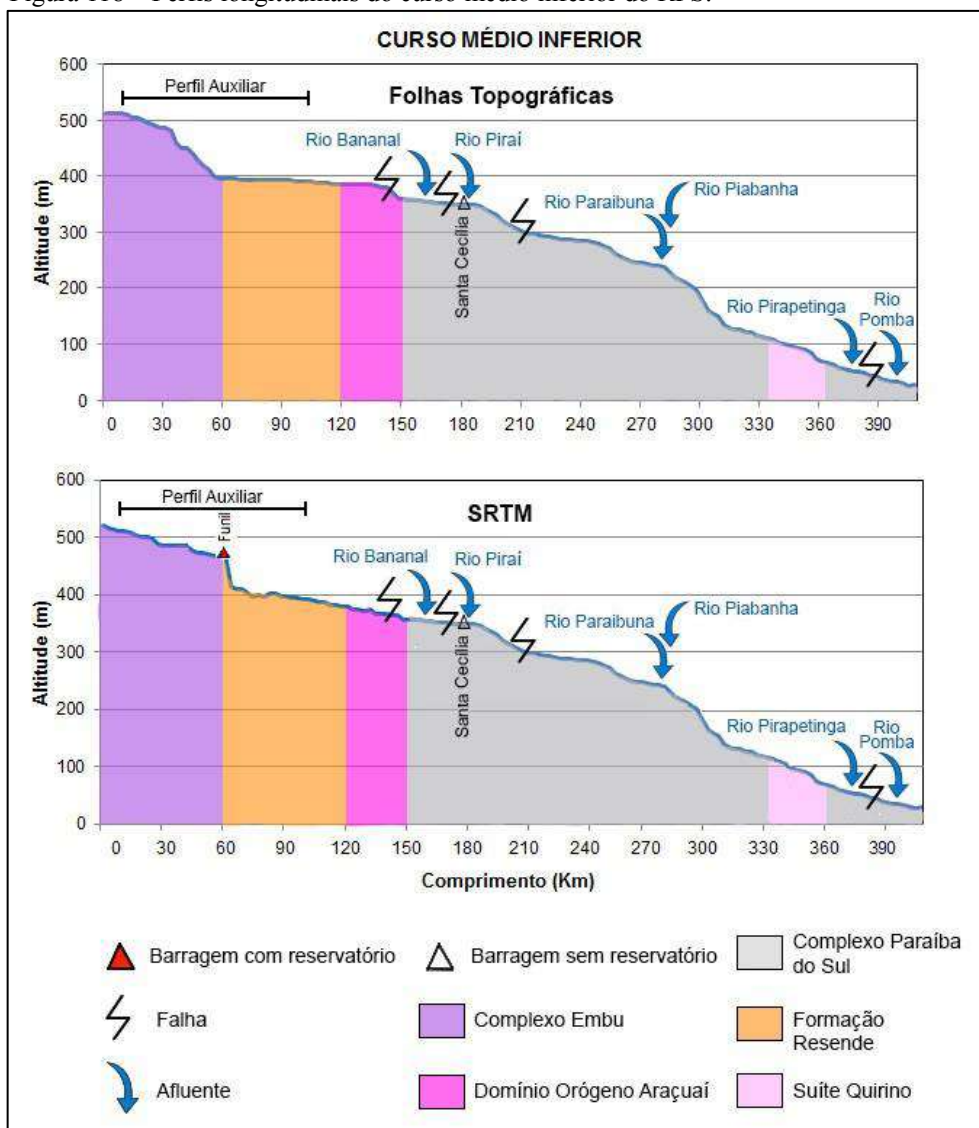
Geologicamente caracterizado por intenso controle estrutural, o relevo do curso médio inferior é formado, desde sua porção mais a montante até a distal, pela unidade paragnáissica do Complexo Embu, pelas rochas da Formação Resende, pelos granitoides do Domínio Orógeno Araçuaí e pelas rochas do Complexo Paraíba do Sul que, em sua porção terminal se intercalam com os granitos e granodioritos da Suíte Quirino do Orógeno Mineiro (Figura 118). Seu perfil longitudinal apresenta quatro falhas ao longo de seu canal fluvial e recebe as águas de seis afluentes: rios Bananal, Piraí, Piabanha, Paraibuna, Pirapetinga e Pomba (Figura 118).

A razão $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$, calculada a partir dos perfis longitudinais do curso médio inferior, indicaram valores superiores a 2, caracterizando este trecho do RPS como desajustado, segundo Etchebehere (2000), Melo, Fujita e Santos (2009) e Fujita et al. (2011). Essa razão, obtida a partir dos perfis de 1950/60 e de 2000 foi, respectivamente, 3,83 e 3,87 (aumento de 1%).

O desajuste nos perfis de ambas as datas pode indicar anomalias, possivelmente relacionadas à existência de falhas no canal e à presença de *knickpoints* naturais e artificiais. Dentre os *knickpoints*, há aquele criado pela barragem de Funil, presente exclusivamente no perfil mais recente (Figura 118). Este *knickpoint* artificial introduziu um desnível vertical de aproximadamente 60 m no perfil, interrompendo a evolução para uma silhueta mais côncava e lisa, o que normalmente aconteceria com o passar dos anos.

As demais barragens que existem no curso médio inferior (Lavrinhas, Queluz e Anta) não foram representadas, pois não existiam quando os dados utilizados para elaboração dos perfis longitudinais foram gerados.

Figura 118 – Perfis longitudinais do curso médio inferior do RPS.



Fonte: A autora, 2019. Elaborado a partir de folhas topográficas 1:50.000 do IBGE (décadas de 1950/60) e MDE do SRTM, 2000.

Legenda: MDE – Modelo digital de elevação; SRTM – *Shuttle Radar Topographic Mission*.

4.4 Curso inferior do RPS

Após percorrer aproximadamente 1000 km por áreas bastante antropizadas e ter seu fluxo represado e regularizado pelas barragens construídas a montante, o RPS chega ao curso inferior enfraquecido. Este capítulo apresenta a paisagem e os resultados das análises dos parâmetros hidrológicos, sedimentológicos e morfológicos dos últimos quilômetros que o RPS ainda precisa percorrer antes de entregar suas águas ao Atlântico.

4.4.1 Paisagem

O curso inferior do RPS se inicia no município fluminense de São Fidélis e percorre a planície litorânea da Baixada Campista antes de despejar suas águas e sedimentos no oceano Atlântico (Figura 7). Atravessando terrenos com altitude inferior a 50 m e declividade média de 0,2 m/km, é o menor dos quatro cursos fluviais, com menos de 100 km de extensão (Figura 8). A porção final desse trecho se localiza na região deltaica do Paraíba do Sul (ANA, 2001).

O clima tropical quente semiúmido com 4 a 5 meses secos ao longo do ano predomina desde a porção inicial até a metade do curso inferior (Figura 10). Daí até a foz o clima dominante passa a ser o tropical quente úmido com um período ainda menor de estiagem (de apenas 3 meses) devido à proximidade do mar. Nesse curso as temperaturas médias são superiores a 18°C em todos os meses do ano.

No início do curso inferior o RPS recebe em sua margem direita a contribuição das águas do rio Dois Rios (resultante da confluência dos rios Negro e Grande) e mais adiante, na margem esquerda, próximo de sua porção central, do rio Muriaé (Figura 7). Nesse curso o canal fluvial passa por dois domínios geomorfológicos: as planícies fluviais (cercadas em sua maior parte pela Depressão do RPS) e as planícies marinhas, limitadas ao norte pelos Tabuleiros Costeiros (Figura 9).

Em seu trajeto final, o Paraíba do Sul deixa o município de São Fidélis, margeia Cardoso Moreira, corta Campos dos Goytacazes e serve de limite natural entre São Francisco do Itabapoana e São João da Barra (Figura 4), onde finalmente entrega suas águas ao mar. Apesar da necessidade de proteção ambiental do entorno do curso inferior em face de sua importância na manutenção do equilíbrio da região deltaica do Paraíba do Sul, ainda não

foram delimitadas Unidades de Conservação na área (Figura 6). Desprotegidas, as terras do entorno do curso inferior são ocupadas por vegetação secundária e lavouras, e próximo ao Atlântico, por formações pioneiras com influência marinha (Figura 14).

As atividades econômicas predominantes no entorno do curso inferior são as lavouras e pastagens (Figura 15). Os municípios de Campos dos Goytacazes e São Francisco de Itabapoana destacam-se pela produção de cana-de-açúcar no estado do Rio de Janeiro, cultivada por meio de irrigação nas várzeas marginais da Baixada Campista; outro produto primário que vem ganhando destaque na região é o abacaxi (IBGE, 2016). Como consequência dessas e outras interferências humanas, a susceptibilidade à erosão no curso inferior é muito alta (Figura 18).

A erosão é mais acentuada próximo à foz, resultado da combinação de uma série de fatores naturais e antrópicos: atividades agrícolas e pecuárias, responsáveis pela construção de canais de irrigação, diques e aterros, há décadas; as próprias características da costa, relativamente nova e baixa e sujeita à ação incessante das ondas e à forte dinâmica dos ventos; e o próprio RPS, que apesar de não possuir nenhuma barragem ou reservatório no seu curso inferior, chega enfraquecido à foz graças às obras hidráulicas localizadas nos trechos a montante. Na foz, o rio chega com pelo menos dois terços a menos da água de seu volume original, desviada para abastecer o Rio de Janeiro e sua região metropolitana. A transposição realizada a montante e a retenção de água em alguns reservatórios de barragens diminuem a capacidade hidráulica do RPS de servir como barreira à entrada de água oceânica pelo canal fluvial. Além do controle do fluxo de água, essas obras retêm parte dos sedimentos do rio necessários à alimentação de seu delta (PATRIANI; CUNHA, 2010).

4.4.2 Parâmetros hidrológicos

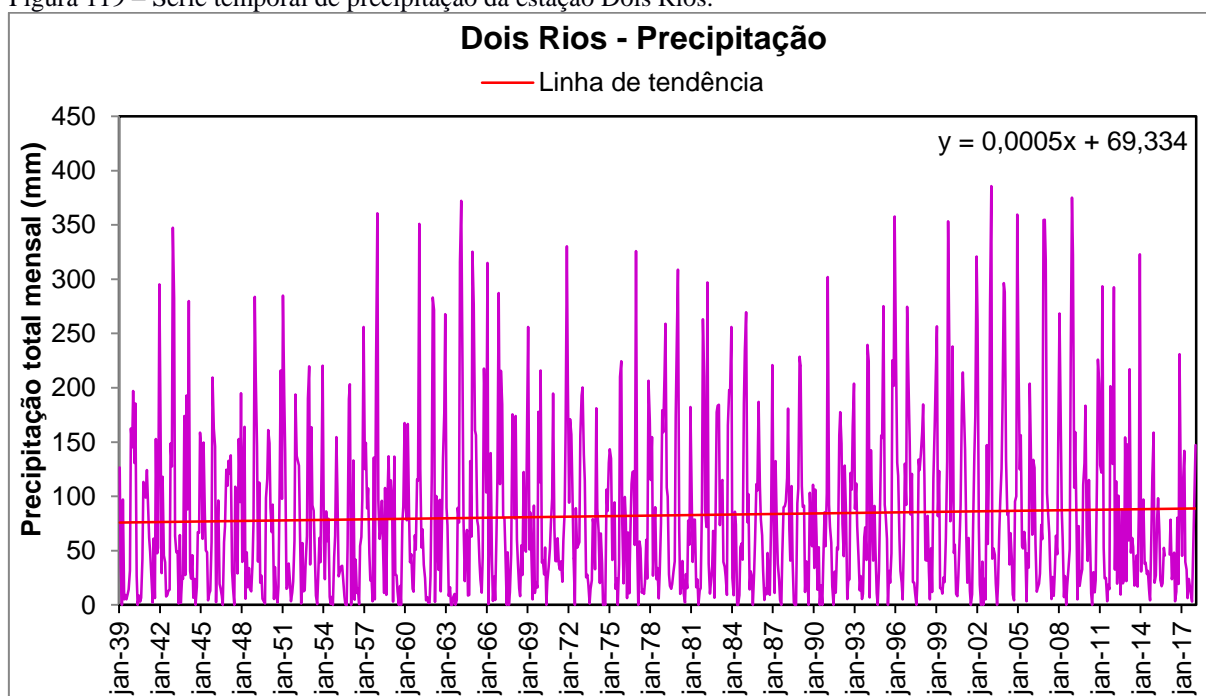
No curso inferior foram utilizados dados de uma estação pluviométrica (Dois Rios) e de duas fluviométricas (São Fidélis e Campos/Ponte Municipal).

A estação pluviométrica Dois Rios (J, Figura 23) situa-se na porção inicial desse curso, a jusante de todas as barragens existentes no RPS. Em relação à barragem de Anta (a mais recente e mais próxima da foz), esta estação encontra-se aproximadamente 150 km a jusante. Ela possui série temporal completa de chuvas totais mensais de 1939 a 2017 (Figura 119) e se encontra a menos de 5 km de distância da estação fluviométrica São Fidélis (estação 12,

Figura 23), e aproximadamente 50 km da estação Campos/Ponte Municipal (estação 13, Figura 23).

A série histórica de chuvas da estação Dois Rios (Figura 119) apresentou, ao longo de quase oitenta anos de dados, ligeira tendência crescente. Como o correlograma da série temporal (Figura 120) indicou ausência de correlação serial entre os dados de um determinado ano e do ano anterior, aplicou-se o teste de Mann-Kendall tradicional, que confirmou tanto a tendência positiva anteriormente observada nos gráficos de precipitação total mensal como sua significância estatística (Tabela 12).

Figura 119 – Série temporal de precipitação da estação Dois Rios.



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.

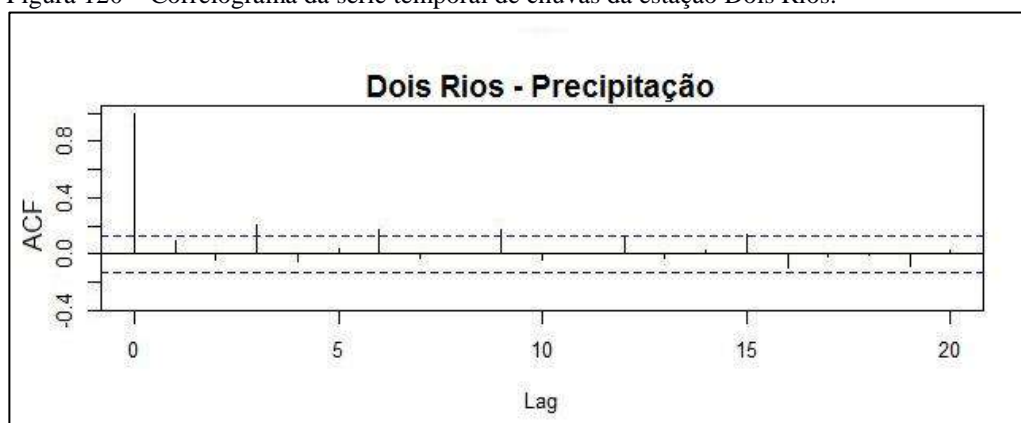
Tabela 12 – Resultado do teste de Mann-Kendall aplicado sobre a série temporal de chuvas totais mensais da estação Dois Rios.

ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA		TESTE DE MANN-KENDALL		
Código	Nome	S	Tendência	SE
J	Dois Rios	0,123	Positiva	Sim

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

Fonte: A autora, 2019.

Figura 120 – Correlograma da série temporal de chuvas da estação Dois Rios.



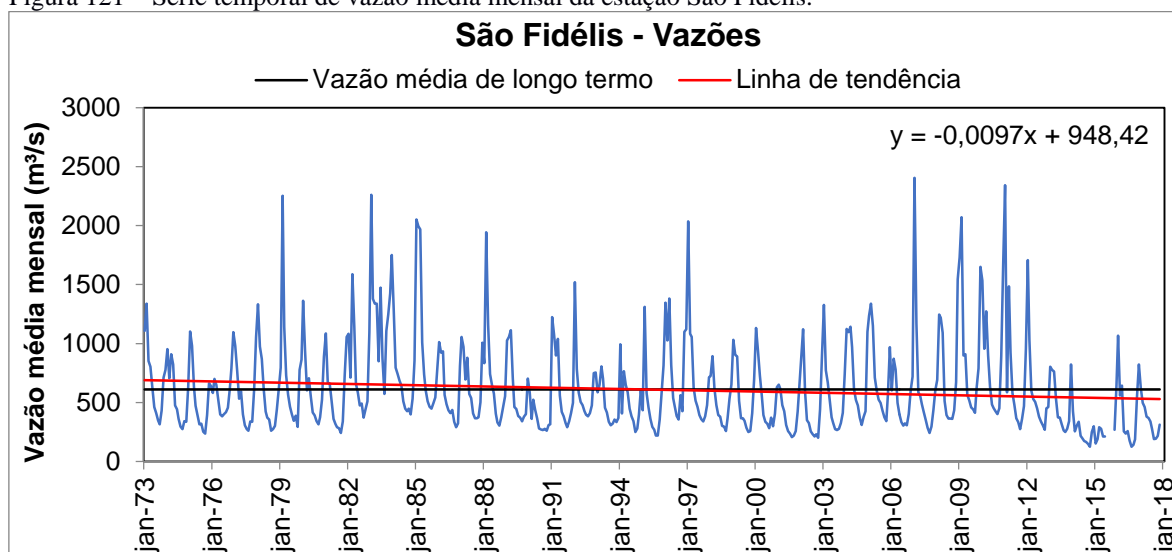
OBS.: As linhas tracejadas representam os limites de confiança a 95% para a hipótese de não ter correlação serial.

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

Fonte: A autora, 2019.

A estação fluviométrica São Fidélis (estação 12, Figura 23), localizada na porção mais a montante do curso inferior, possui série de vazões médias mensais de 1973 a 2018 (Figura 121), com uma pequena lacuna (abril a novembro de 2015) na sequência de amostragens. Embora essa estação não possua série histórica tão longa como outras existentes nos cursos anteriores, ela foi selecionada face à inexistência de outras para análise das vazões nessa porção do curso inferior. A vazão média de longo termo nessa estação foi 609,7 m³/s, e antes de alcançá-la, o RPS recebe a contribuição de três afluentes: os rios Pirapetinga, Pomba e Dois Rios (Figura 23). Mesmo assim, o aporte de águas desses três rios não foi suficiente para reverter os efeitos da transposição, da regularização e do represamento do fluxo fluvial realizados pelas barragens dos demais cursos, a montante: a série temporal de vazões apresentou tendência decrescente (Figura 121), mesmo com as chuvas mostrando comportamento contrário (Figura 119). Após 2013, é possível também perceber no hidrograma a queda acentuada da vazão (Figura 121), como resposta à estiagem que ocorreu na Região Sudeste do Brasil e à retenção de água a montante, no reservatório da barragem de Anta (Figura 121). Mudanças na assinatura hidrológica a partir de 1977, como resposta à entrada em operação da barragem Paraibuna, não foram percebidas na série temporal da estação São Fidélis (Figura 121), diferentemente das séries das estações dos cursos superior, médio superior e médio inferior, a jusante dessa barragem e menos distantes da mesma (Figuras 32, 59, 60, 88, 90, 91 e 93).

Figura 121 – Série temporal de vazão média mensal da estação São Fidélis.



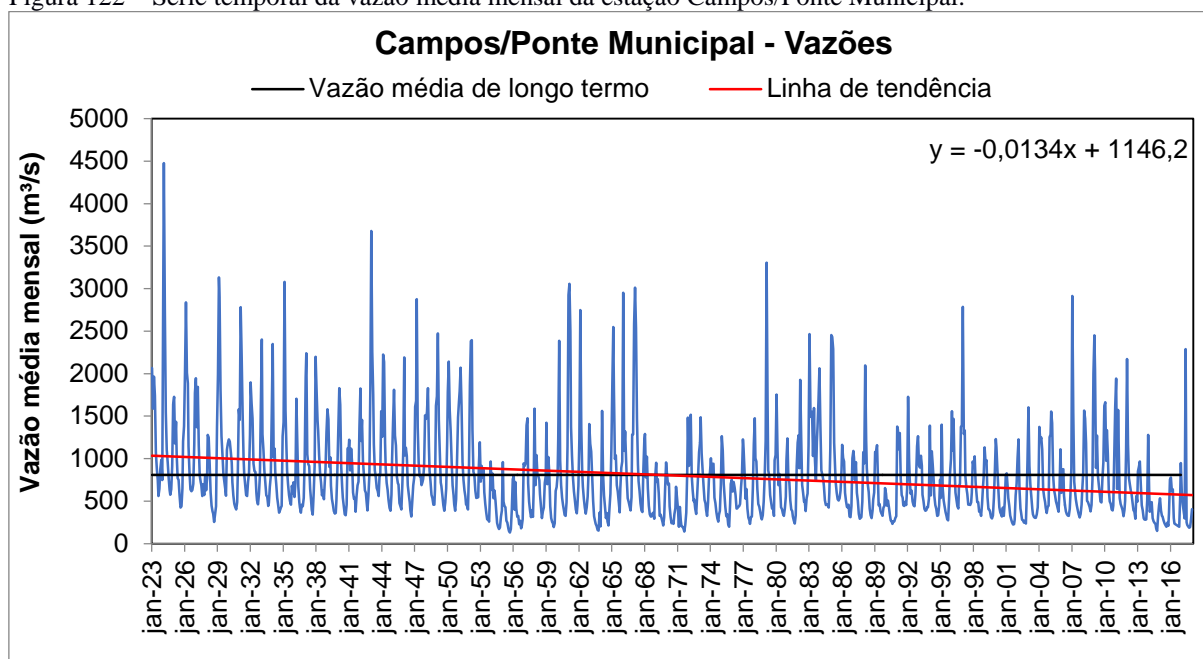
OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

A estação fluviométrica Campos/Ponte Municipal (estação 13, Figura 23), situada a uma distância inferior a 50 km da foz, apresenta série mais longa de vazões médias mensais (1923 a 2018) que a estação anterior e, assim como aquela, apresentou tendência negativa (Figura 122). A vazão média de longo termo foi 807,3 m³/s. A série temporal da estação Campos/Ponte Municipal mostrou mudanças na assinatura hidrológica a partir de 1952 (ano de início da transposição), quando o fluxo se tornou mais regular e com menor amplitude entre os valores extremos de vazão (Figura 122). Os eventos relacionados à entrada em operação dos grandes reservatórios reguladores de fluxo situados a montante também puderam ser detectados: após 1961, quando a barragem Santa Branca foi concluída; após 1969, com a entrada de Funil no circuito de regularização (ano em que a linha de tendência passou a apresentar valores abaixo da vazão média de longo termo); após 1977, quando a regularização se intensificou ainda mais com a entrada do reservatório de Paraibuna no processo; e após 2013, com a entrada em operação da barragem de Anta (Figura 122).

Cabe ressaltar que, ao longo das séries históricas de vazão de ambas as estações fluviométricas do curso inferior (Figuras 121 e 122), os efeitos das grandes estiagens que ocorreram na Região Sudeste em 2001-2003 (MARENGO; ALVES, 2005) e, principalmente em 2013-2014 foram observados. A seca que ocorreu de 1952-1955 no Sudeste também pôde ser percebida (Figura 122). Essas estiagens severas contribuíram para acentuar ainda mais os impactos da transposição e da regularização sobre a assinatura hidrológica da série temporal de vazão.

Figura 122 – Série temporal da vazão média mensal da estação Campos/Ponte Municipal.



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 dos dados de vazão média mensal das séries de ambas as estações fluviométricas do curso inferior (Figura 123) mostraram autocorrelação entre os dados de um determinado ano e do ano anterior. Para avaliar o grau de significância estatística da linha de tendência dessas séries aplicou-se o teste Sazonal de Mann-Kendall sobre os dados dos meses de pico de vazão (de dezembro a fevereiro), os mais afetados pelo controle de fluxo pelas barragens. Esse teste confirmou a tendência decrescente do comportamento da vazão de ambas as estações, com significância estatística (Tabela 13).

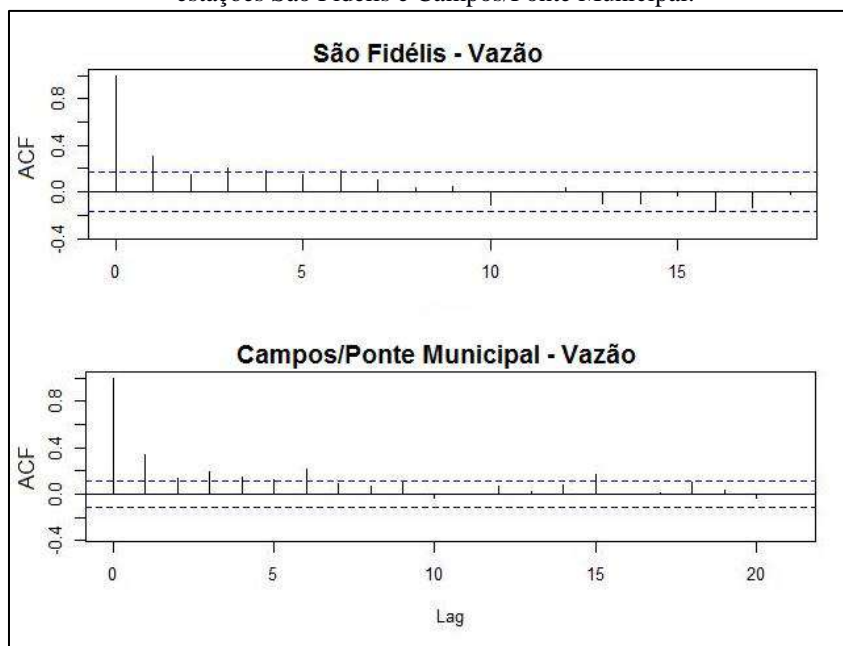
Tabela 13 – Resultado do teste Sazonal de Mann-Kendall aplicado sobre as séries temporais de vazão média mensal das estações São Fidélis e Campos/Ponte Municipal.

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA		TESTE SAZONAL DE MANN-KENDALL		
Código	Nome	S	Tendência	SE
12	São Fidélis	-0,296	Negativa	Sim
13	Campos/Ponte Municipal	-0,324	Negativa	Sim

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

Fonte: A autora, 2019.

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.



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.

4.4.3 Parâmetros sedimentológicos

No curso inferior, somente a estação fluviométrica Campos/Ponte Municipal (estação 13, Figura 23) possui série temporal de dados de concentração de MPS. Embora essa estação possua dados de vazão desde 1923, as amostragens de sedimentos em suspensão foram realizadas somente a partir do final da década de 1980 (Figura 124), quando as grandes barragens com reservatório (Santa Branca, Paraibuna e Funil) já haviam sido instaladas e a transposição do RPS para o rio Guandu já acontecia desde 1952. A única barragem com reservatório que foi instalada após o início das amostragens dessa estação é Anta (Figura 23), que contribui com a regularização do fluxo do RPS desde 2013. Apesar de possuir quase três décadas de dados de concentração de MPS, a frequência das coletas dessa estação mostrou-se bastante irregular (Quadro 4).

A série temporal de concentração de MPS apresentou comportamento decrescente de 1989 a 2018 (Figura 124). Os picos de concentração de MPS coincidiram, na maioria das vezes, com os picos de vazão e foram diminuindo nas décadas analisadas. Essa diminuição

deve estar relacionada à diminuição dos parâmetros hidrológicos observados nas estações deste curso (Figuras 121 e 122) e daquelas dos cursos a montante (Figuras 32, 59, 60 e 87 a 93) e à retenção de sedimentos nos reservatórios das barragens do RPS.

De 1989 a 2017, a média dos valores de concentração de MPS das amostragens foi 87 mg/L. Neste período, houve ocorrência de valores excepcionais, como em 1994, que chegou a 870 mg/L (Figura 124); porém, da década de 1990 até 2017, o valor máximo atingido foi 236 mg/L em 2002 e, após o alagamento do reservatório de Anta, em 2013, nenhum valor ultrapassou a média do período de 1989 a 2017 (de 87 mg/L), chegando, no máximo, a 43 mg/L.

O período de estiagem de 2013-2014 ocorrido na Região Sudeste brasileira impactou os valores de vazão da estação Campos/Ponte Municipal (Figura 122), o que acabou refletindo, também, nos baixos valores de concentração de MPS nesse período (Figura 124). Do início da estiagem até o início de 2017, as vazões mantiveram-se relativamente baixas, mas a partir de meados de 2017 até 2018 elas começaram a apresentar sinais de recuperação (Figura 122). Porém, os valores de concentração de MPS se mantiveram ainda bem abaixo da média da série (87 mg/L) após a estiagem; de 2017 a 2018, a média dos valores de concentração de MPS foi 14,4 mg/L. A hipótese de retenção de sedimentos no reservatório de Anta, a montante dessa estação, deve ser considerada na tentativa de compreender o porquê da manutenção dos baixos valores de concentração de MPS nesse trecho mesmo após o fim do período de escassez de chuvas e o início da recuperação dos valores de vazão.

Na série de concentração de MPS foi observada autocorrelação entre os dados de um ano e do ano anterior (Figura 125), assim com ocorreu com sua série de vazões (Figura 123), como é esperado em séries de dados hidrológicos de rios regularizados. O teste Sazonal de Mann-Kendall foi aplicado à série temporal, confirmando a tendência negativa da regressão linear e sua significância estatística (Tabela 14).

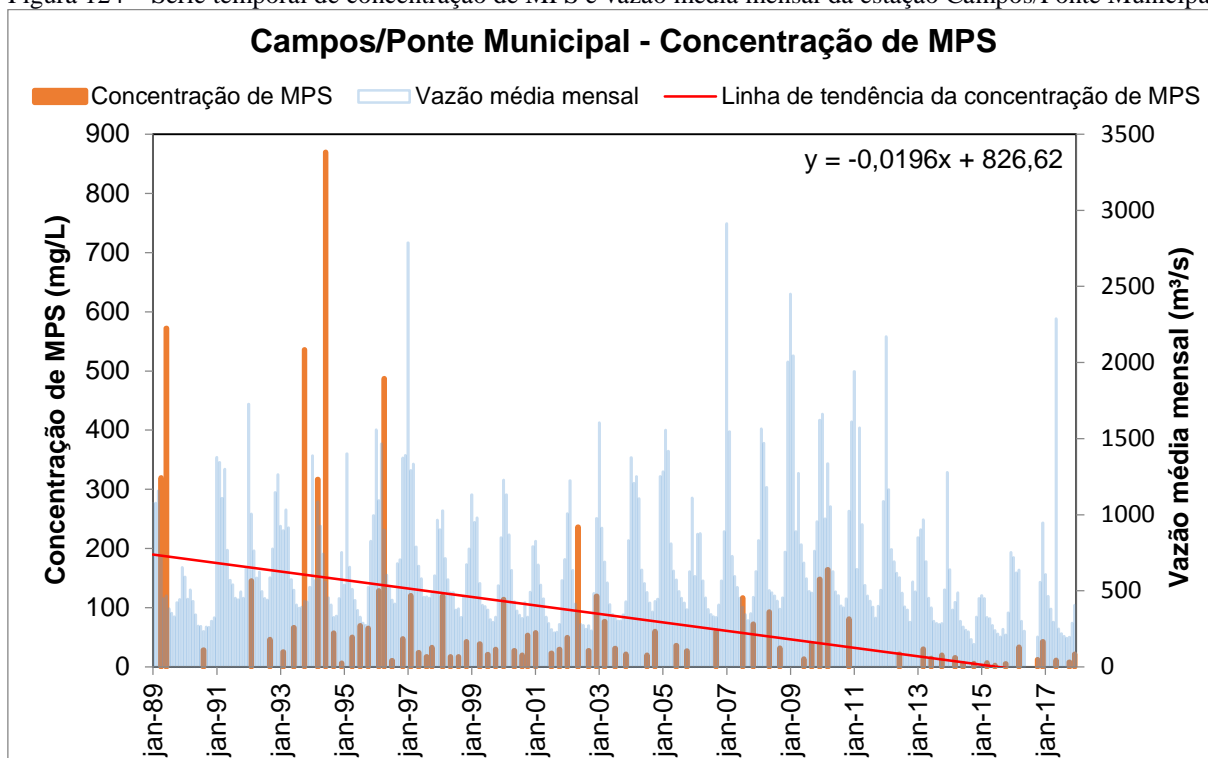
Tabela 14 – Resultado do teste Sazonal de Mann-Kendall aplicado sobre a série temporal de concentração de MPS da estação Campos/Ponte Municipal.

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA		TESTE SAZONAL DE MANN-KENDALL		
Código	Nome	S	Tendência	SE
13	Campos/Ponte Municipal	-0,261	Negativa	Sim

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

Fonte: A autora, 2019.

Figura 124 – Série temporal de concentração de MPS e vazão média mensal da estação Campos/Ponte Municipal.

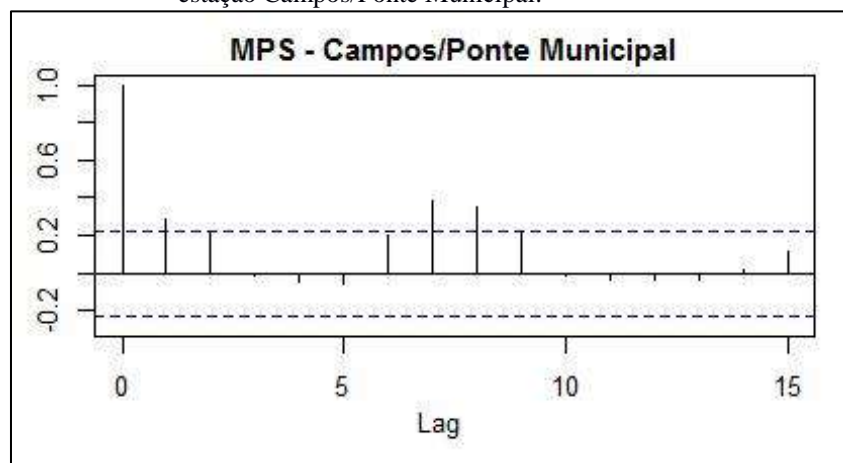


OBS.: Em vermelho, a linha de tendência obtida por regressão linear para a concentração de MPS; a equação da reta está representada no canto superior direito.

Legenda: MPS – Material particulado em suspensão.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 125 – Correlograma da série temporal de concentração de MPS da estação Campos/Ponte Municipal.



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.

4.4.4 Morfologia de vista em planta

O curso inferior do Paraíba do Sul é sinuoso, com grande número de ilhas e barras arenosas, apresentando, predominantemente, características de canal entrelaçado.

Para análise da morfologia de vista em planta desse curso, foram vetorizados seu canal principal, os meandros abandonados, as ilhas e as barras arenosas extraídos de fotografias aéreas de 1956 e 2005/2006 (Figuras 25 e 26). Complementando a análise da morfologia de vista em planta do canal, foi realizado também um estudo da dinâmica morfológica da foz nas últimas décadas. Para isso, foram utilizadas imagens de satélite com intervalo temporal menor, extraídas do *Google Earth (Digital Globe)*, de 2003 a 2016.

Sendo o mais curto dos quatro trechos fluviais, foi possível a representação cartográfica do curso inferior em apenas dois produtos cartográficos (Figuras 126 e 127), um representando sua morfologia pretérita (1956), e o outro, a mais recente (2005/2006).

Nesse curso foram selecionadas seis áreas em escalas maiores (Figuras 126 e 127) para que as alterações morfológicas mais significativas pudessem ser cartografadas em detalhe nos insumos de diferentes datas. Nessas áreas, o canal principal e os meandros abandonados foram representados em azul, as ilhas em amarelo; e as barras arenosas na cor laranja.

Figura 126 – Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso inferior do RPS a partir de fotografias aéreas do IBGE (1956).



Fonte: A autora, 2019.

Figura 127 – Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso inferior do RPS a partir de fotografias aéreas do IBGE (2005-2006).



Fonte: A autora, 2019.

Na área 1 (Figura 128), situada no início do curso inferior (Figuras 126 e 127) aproximadamente 150 km a jusante da última barragem (Anta) com reservatório do RPS, não foi observada alteração na forma do canal, mas de 1956 a 2006 ocorreu diminuição de 110 m na largura média do mesmo e aumento no tamanho das ilhas (aumento da área emersa das mesmas e fusão de pequenas ilhas vizinhas em alguns trechos), graças ao volume reduzido de água que chega a esse trecho.

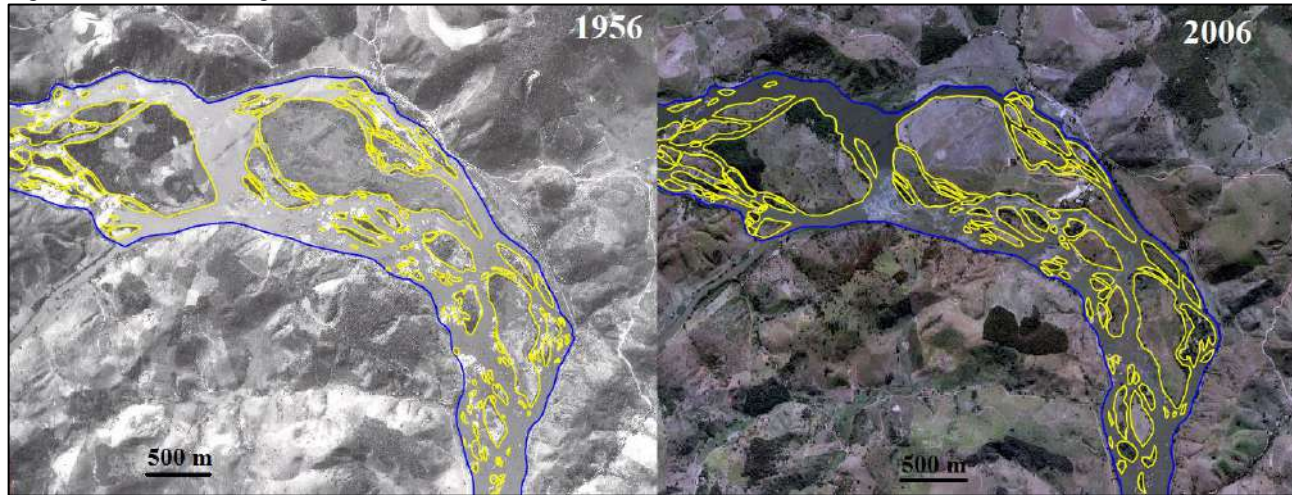
Na área 2 (Figura 129), localizada 7 km a jusante da área 1 (Figuras 126 e 127), também ocorreu diminuição da largura média do canal (106 m), aumento relativo no tamanho de ilhas existentes e surgimento de novas ilhas com o tempo. Nessa área também foi observada a incorporação de ilhas às margens do canal (Figura 129). Barras arenosas foram registradas nas extremidades de ilhas e nas margens do canal, tanto na fotografia de 1956 como na de 2006. Pelas fotos percebe-se que esses depósitos migraram ao longo dos anos, evidenciando a dinâmica sedimentar nesse trecho. A forma do canal não sofreu mudanças significativas com o tempo (Figura 129).

As áreas 3 e 4 (Apêndice O), localizadas 12 km e 26 km a jusante da área 2, e cerca de 70 km e 60 km a montante da foz, respectivamente (Figuras 126 e 127), também apresentaram diminuição da largura média do canal fluvial (70 m na área 3 e 131 m na área 4), aumento relativo do tamanho das ilhas devido à diminuição da disponibilidade hídrica, incorporação de ilhas às margens do canal e presença de barras arenosas. Meandros abandonados foram identificados na área 4 (Apêndice O). Algumas dessas feições foram vistas tanto na foto de 1956 como na de 2005, evidenciando que a mudança do curso de alguns canais às margens do RPS já acontecia antes de 1956. Alguns meandros apareceram apenas na foto mais antiga, não tendo sido possível identificá-los mais recentemente graças às alterações antrópicas no entorno do canal, onde se pratica a agricultura irrigada (Apêndice O).

Finalmente, nas áreas 5 e 6 (Figuras 130 e 131), localizadas cerca de 20 km a montante da foz e na porção final do RPS, respectivamente (Figuras 126 e 127), também foram registradas mudanças semelhantes às encontradas nas áreas anteriores do curso inferior, tais como diminuição da largura média do canal fluvial (de 148 m e 18 m, respectivamente), aumento relativo do tamanho das ilhas e/ou fusão de ilhas em função da diminuição do volume de água do RPS, incorporação de ilhas às margens do canal, presença de alguns meandros abandonados e de barras arenosas (principalmente na fotografia de 1956).

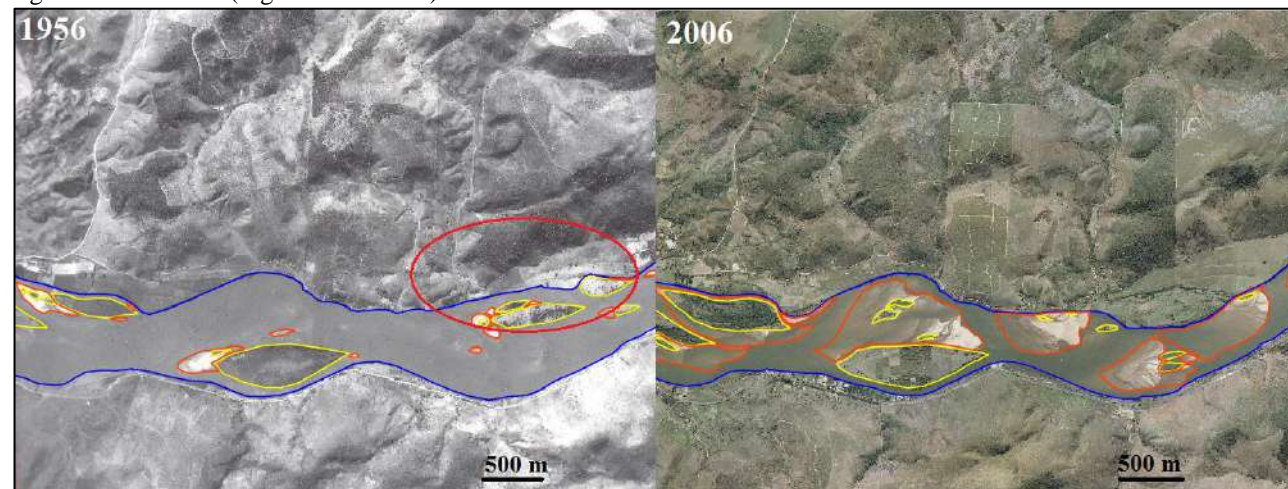
As principais alterações morfológicas ocorridas no canal fluvial do curso inferior de 1956 a 2005/2006 foram resumidas e organizadas em um quadro (Apêndice P).

Figura 128 – Área 1 (Figuras 126 e 127) do curso inferior.



Fonte: A autora, 2019.

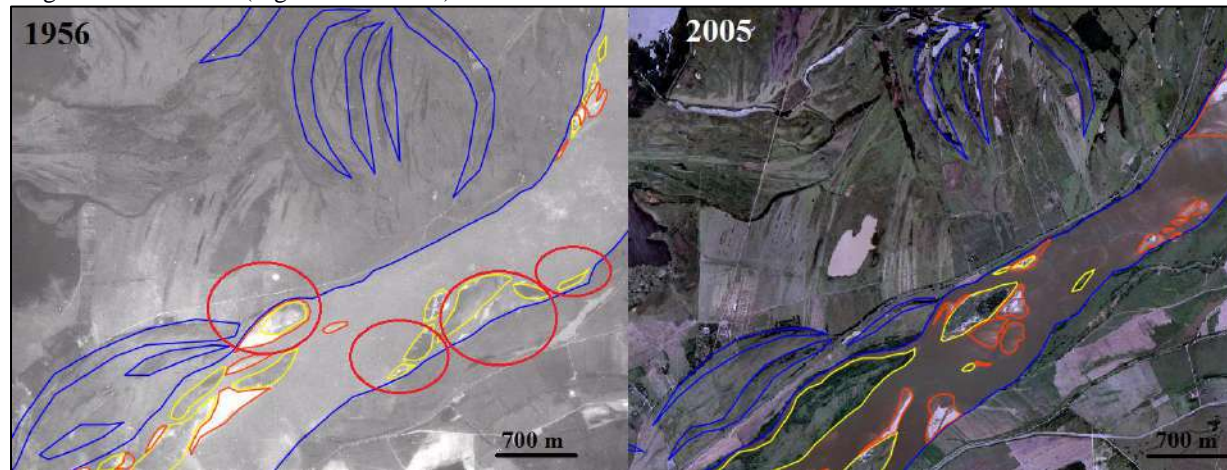
Figura 129 – Área 2 (Figuras 126 e 127) do curso inferior.



OBS.: Ilhas incorporadas à margem do canal (circuladas em vermelho).

Fonte: A autora, 2019.

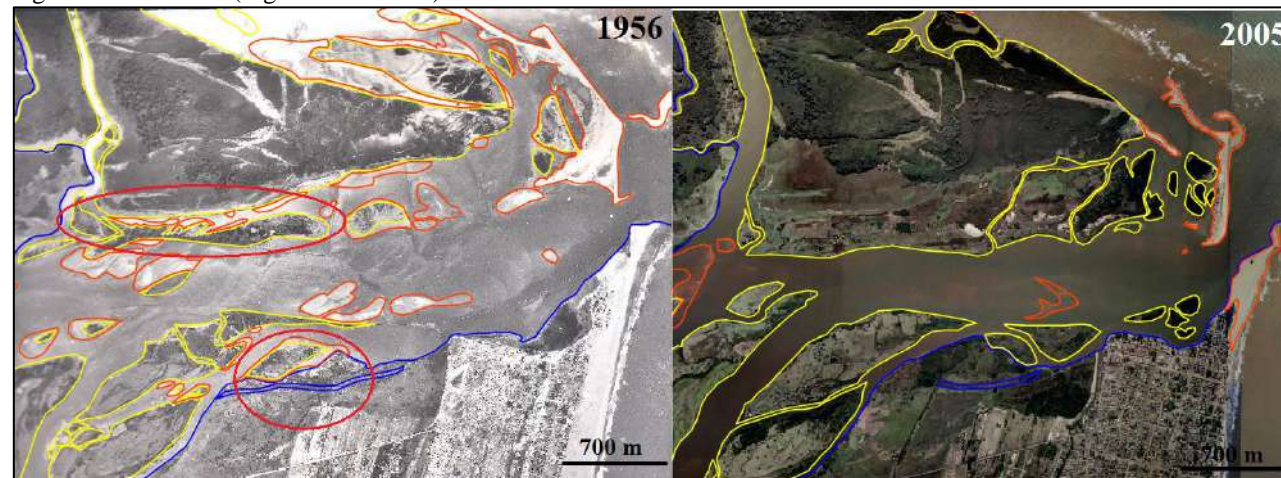
Figura 130 – Área 5 (Figuras 126 e 127) do curso inferior.



OBS.: Ilhas incorporadas à margem do canal (circuladas em vermelho).

Fonte: A autora, 2019.

Figura 131 – Área 6 (Figuras 126 e 127) do curso inferior.



OBS.: Ilhas incorporadas à margem do canal (circuladas em vermelho).

Fonte: A autora, 2019.

Algumas mudanças morfológicas fluviais observadas ao longo do canal fluvial do RPS – em função da velocidade com que ocorreram – só puderam ser percebidas e quantificadas por meio das fotografias aéreas em função do intervalo temporal de mais de quase cinco décadas entre elas. Porém, algumas mudanças morfológicas significativas acontecem em intervalos temporais relativamente pequenos no RPS. É o caso, por exemplo, dos processos de erosão e acreção sedimentar que vêm se intercalando ao longo dos anos e modificando rapidamente a morfologia da porção mais distal de seu canal, dos pontais arenosos e das ilhas da foz. Ali, a dinâmica é tão intensa, que grandes mudanças morfológicas acontecem relativamente mais rápido que aquelas das porções mais internas do canal fluvial (com exceção das grandes mudanças provocadas por interferências antrópicas, como retificações de canal, barramentos etc). Assim, na desembocadura, imagens de satélite sequenciais podem ser bastante úteis para captar essas alterações morfológicas e, inclusive, quantificá-las.

Um processo que vem acontecendo nos últimos anos na foz do RPS, mais especificamente no canal sul da desembocadura (e que é facilmente identificado por meio de imagens de satélite), é a erosão do pontal arenoso da porção inferior desse canal, que protegia os manguezais ali existentes da ação das ondas. Em contraposição, na porção norte do canal sul, acreção sedimentar vem criando, ali, condições propícias ao desenvolvimento de um novo manguezal (Figura 132).

Figura 132 – Canal sul da foz do RPS, em 2003 e 2015.



Fonte: Elaborado a partir de GOOGLE INC., 2017.

Para quantificar a dinâmica das alterações morfológicas na foz do RPS utilizaram-se imagens de satélite de 2003 a 2016. Com essas imagens – provenientes da série histórica da *Digital Globe* disponibilizada pelo *Google Earth* – foi possível mensurar as mudanças que

vêm ocorrendo nos pontais arenosos do canal sul da desembocadura do RPS. Para isso, foram vetorizados os limites desses pontais, utilizando imagens das seguintes datas (Figura 133):

- a) setembro de 2003 – vetorizado em azul;
- b) setembro de 2010 – vetorizado em verde;
- c) setembro de 2011 – vetorizado em laranja;
- d) dezembro de 2012 – vetorizado em roxo;
- e) abril de 2015 – vetorizado em amarelo;
- f) maio de 2016 – vetorizado em vermelho.

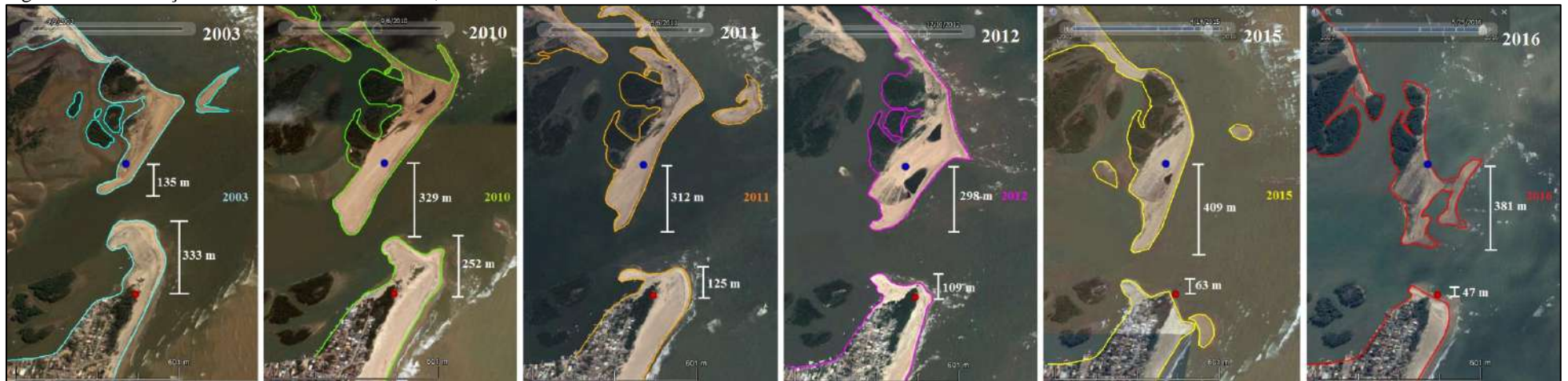
Para mensurar os comprimentos dos pontais arenosos do canal sul foram selecionados dois pontos de referência (de coordenadas geográficas $21^{\circ} 36.873' S$, $41^{\circ} 0.857' O$ e $21^{\circ} 37.187' S$, $41^{\circ} 0.770' O$) como origem das medidas nas seis imagens utilizadas (Figura 133). Para medir o comprimento do pontal arenoso norte, partiu-se do ponto azul até a extensão máxima desse pontal, perpendicularmente na direção sul; analogamente, para obter o comprimento do pontal sul, partiu-se no ponto vermelho em direção perpendicular norte até a sua máxima extensão.

Observou-se que, no pontal norte, ocorreu acreção sedimentar de 2003 a 2016 (Figura 133); tomando como referência os anos extremos, seu comprimento aumentou 246 m de 2003 a 2016. Entre 2003 e 2015, esse crescimento foi ainda maior (274 m). De 2015 a 2016 houve uma pequena diminuição do pontal de cerca de 28 metros. A tendência geral, no entanto, foi a progradação do mesmo na direção sul (Figura 133).

Por outro lado, de 2013 a 2016, o pontal sul sofreu uma perda de aproximadamente 290 metros em sua extensão. Ao longo desse período, esse pontal mostrou tendência à erosão (Figura 133). Consequência disso foi a destruição de parte de seu manguezal (Figuras 134-C).

Apesar da progradação da linha de costa na região central da planície deltaica do RPS (SILVA, 1987), atualmente também são observados ali eventos erosivos localizados, como o que ocorre ao sul da desembocadura, na praia de Atafona (Figura 134). Neste segmento submetido à intensa erosão, observa-se inclusive, a destruição de ruas e casas (Figura 134). Argento e Costa (2005) relataram que desde a década de 1950 o pontal de Atafona vem sofrendo com a erosão e, até o ano de 2005, 183 construções, distribuídas em 14 quadras, haviam sido destruídas com o recuo da linha de costa.

Figura 133 – Evolução do canal sul da foz do RPS, de 2003 a 2016.



OBS.: Os marcadores esféricos azul e vermelho, presentes em todas as imagens, são os pontos utilizados como referência (origem) para medição do comprimento dos pontais arenosos norte e sul do canal, respectivamente.

Fonte: Elaborado a partir de imagens históricas *Digital Globe*, do *Google Earth*, GOOGLE INC., 2017.

Figura 134 – Praia de Atafona, São João da Barra (RJ).



Legenda: A – A ação das ondas, dentre outros fatores, já levou à destruição muitas casas na praia de Atafona; B – Além da ação das ondas, Atafona sofre também com a atividade eólica bastante intensa, que forma dunas que migram e se sobrepõem às construções que ainda resistem na orla da praia; entre as dunas, formam-se corredores por onde circulam ventos predominantes de NE; C – O manguezal localizado na porção inferior do canal sul da desembocadura do RPS vem sofrendo com a intensa erosão do pontal arenoso que o protegia da ação das ondas; D – Um novo manguezal rapidamente vem se formando na porção superior do canal sul da desembocadura, onde a deposição sedimentar favorece o crescimento de um novo pontal.

Fonte: A autora, 2016 (fotografias tiradas pela autora durante trabalho de campo).

Para analisar as mudanças ocorridas na praia de Atafona ao longo das décadas, foram utilizadas as mesmas fotografias aéreas (de 1956 e 2005) usadas neste trabalho para análise do canal fluvial do curso inferior. Sobre elas foram plotados os dois pontos de referência anteriormente usados como origem das medições dos pontais arenosos norte e sul nas imagens do *Google Earth* de 2003 a 2016 (pontos azul e vermelho, respectivamente, nas Figuras 133 e 135).

Figura 135 – Canal sul da foz do RPS em 1956 e 2005.



Fonte: A autora, 2019.

Analisando a dinâmica da paisagem do canal sul da desembocadura em relação a esses pontos de referência foi possível mensurar a intensidade das modificações morfológicas que ali ocorreram no intervalo temporal de quase 50 anos: ambos os pontais arenosos do canal sul localizavam-se bem mais a leste em 1956; a linha de costa, daquele ano até 2005, sofreu retrogradação nessa porção da desembocadura; outra mudança significativa foi a diminuição da largura do canal sul, decorrente da diminuição da disponibilidade hídrica do RPS ao longo das décadas; isso, somado aos processos sedimentares na porção norte desse canal, levaram à incorporação de ilhas à sua margem superior (Figura 135).

As mudanças na paisagem de Atafona foram tantas, que houve necessidade de identificação de alguns elementos em comum entre as duas fotos utilizadas na análise e, desta maneira, verificou-se também a qualidade da correção geométrica da fotografia de 1956. Para isso, foram traçadas/vetorizadas algumas ruas sobre a fotografia de 1956 (Figura 136) cujos cruzamentos foram, inclusive, utilizados como GCPs no georreferenciamento. Ao sobrepor os vetores dessas ruas à fotografia de 2005, verificou-se a coincidência entre aqueles e os logradouros da foto ortoretificada, chancelando, dessa maneira, a qualidade geométrica da correção da foto mais antiga. O RMSE do georreferenciamento ficou abaixo de 5 metros e o erro de deslocamento dos *checkpoints*, inferior a 10 m nesta fotografia.

Figura 136 – Logradouros identificados na Praia de Atafona.



OBS.: À esquerda, em vermelho, algumas ruas traçadas sobre a fotografia aérea de 1956 (georreferenciadas); à direita, o mesmo arruamento vetorizado a partir da fotografia mais antiga, plotado sobre a fotografia de 2005.

Fonte: A autora, 2019.

Outra análise que foi realizada foi a da dinâmica da linha de costa. Inicialmente, vetorizou-se a mesma sobre a fotografia aérea de 2005 (delineada ao longo do continente, sem considerar a faixa de areia da praia de Atafona, extremamente dinâmica ao longo dos anos). Em seguida, essa linha foi sobreposta à fotografia de 1956, tornando possível compará-las e quantificar, inclusive, os efeitos da erosão costeira sobre a área urbanizada de Atafona (Figura 137). Ocorreu o recuo da linha de costa ao longo dos 49 anos de intervalo temporal entre as fotografias, com diminuição de uma parcela considerável da faixa de areia da praia (superior a 200 metros em alguns pontos). Foi constatado o desaparecimento de 185 casas e 14 quadras inteiras, números semelhantes aos reportados por Argento e Costa (2005).

As causas do fenômeno que vem ocorrendo em Atafona podem ser muitas. Além da vazão e da descarga sedimentar do RPS, que chegam bastante reduzidas à foz devido à transposição para o rio Guandu, e à retenção de água e sedimentos nas barragens construídas a montante – Muehe (2005) aponta ainda outros fatores que devem ser considerados ao estudar o fenômeno: o trecho submetido à intensa erosão está localizado à montante de uma célula de transporte litorâneo com transporte residual sazonal sempre dirigido para sul, na direção contrária à desembocadura; a própria retenção de sedimentos arenosos no interior do canal

fluvial; a transformação de um muro em espigão devido ao recuo da linha de costa; e o trapeamento das areias da antepraia pela deposição de lamas fluviais próximo à desembocadura atuam juntos, reduzindo o aporte sedimentar para a praia. Argento e Costa (2005) aventam ainda a hipótese de que movimentos de massa subaquáticos possam ter magnitude expressiva para alterar as estruturas sedimentares deltaicas do RPS, contribuindo para o rebaixamento da área de Atafona e, conseqüentemente, para a intensificação dos processos erosivos.

Figura 137 – Linha de costa da Praia de Atafona em dois momentos: 2005 e 1956.



OBS.: À esquerda, em linha tracejada amarela, a linha de costa (sem a faixa de areia) de Atafona, traçada sobre a fotografia aérea de 2005; à direita, essa mesma linha, sobreposta à fotografia aérea de 1956.

Fonte: A autora, 2019.

4.4.5 Morfologia transversal

No curso inferior do RPS, os perfis transversais do canal fluvial foram gerados a partir de dados de duas estações fluviométricas: São Fidélis e Campos/Ponte Municipal (estações 12 e 13, respectivamente, na Figura 23).

Da primeira, no início do curso inferior (estação 12, Figura 23), foram construídos perfis de 2001 a 2012, três do período da estiagem e quatro da cheia (Figura 138). Da segunda, localizada na porção central do curso inferior (estação 13, Figura 23), foram elaborados perfis de 1993 a 2016, sendo cinco da estiagem e cinco da cheia (Figura 139).

Nos perfis transversais da estação São Fidélis (Figura 138) foi observado, ao longo os anos, a manutenção da forma geral do canal em “U”, característica de ambientes deposicionais (LIMA, 2006), e migrações laterais de até ~ 10 m e ~ 20 m, na estiagem e na cheia, respectivamente. A morfologia irregular do fundo do canal sugere alternância entre processos erosivos e deposicionais de um ano a outro, nas duas épocas (Figura 138). É importante ressaltar que, apesar do volume reduzido de águas do RPS que chega ao curso inferior (impactado pela transposição e pela retenção de água e sedimentos nas barragens a montante, nos outros cursos), a ação erosiva das “*hungry waters*” (típicas de trechos imediatamente a jusante de reservatórios) talvez não seja tão pronunciada como em alguns segmentos a jusante da barragem de Funil, no curso médio inferior, por exemplo. Na estação São Fidélis, localizada mais distante dos reservatórios, o RPS conta com a contribuição das águas e sedimentos do rio Pomba, na margem esquerda, e do rio Dois Rios (confluência dos rios Negro e Grande) na margem direita, favorecendo, ali, a ocorrência de processos deposicionais.

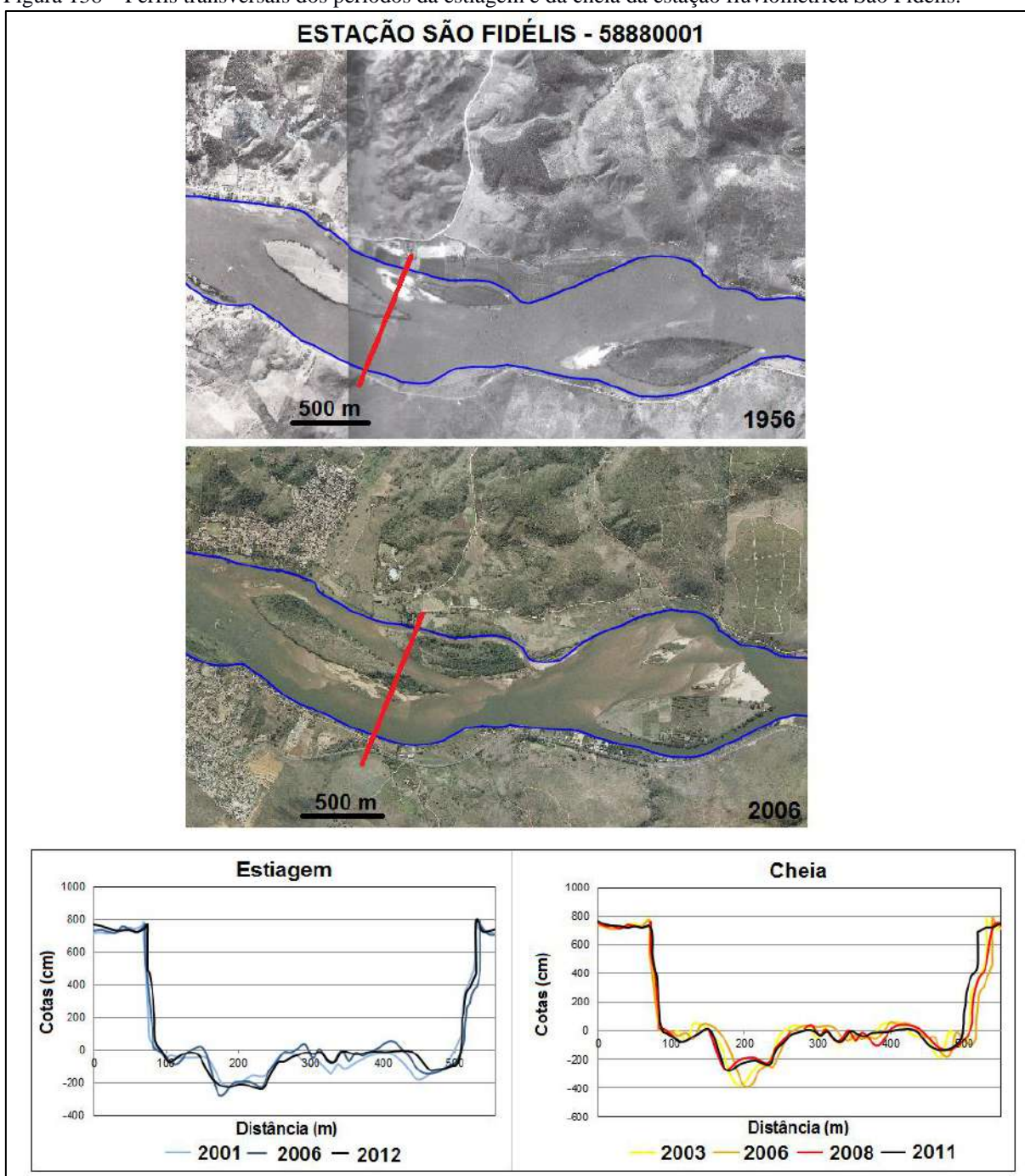
Nos perfis transversais da estação Campos/Ponte Municipal (estação 13, Figura 23), o canal fluvial também manteve a forma em “U” ao longo dos anos (Figura 139). As irregularidades do fundo do canal foram significativas nos dois períodos do ano, embora tenham sido mais pronunciadas na cheia; a migração lateral do canal atingiu até ~ 20 m na estiagem e ~ 25 m, na cheia.

A estação Campos/Ponte Municipal possui dados (da estiagem) anteriores e posteriores à instalação da barragem de Anta (em operação desde 2013), situada no curso médio inferior, 180 km a montante. Analisando o comportamento de dois perfis transversais (da estiagem) desta estação, um anterior (2010) e outro posterior (2016) ao alagamento do reservatório de Anta (Figura 140), observaram-se elevação e suavização do fundo do canal, sugerindo a ocorrência de processos deposicionais. Isso não é comum em trechos a jusante de reservatórios, onde processos erosivos no canal são comuns (KONDOLF, 1997).

Para tentar compreender o que levou à intensificação dos processos deposicionais (e, com isso, a elevação do fundo do canal), foi necessário investigar os parâmetros hidrológicos

da estação Campos/Ponte Municipal no período entre 2010 e 2016.

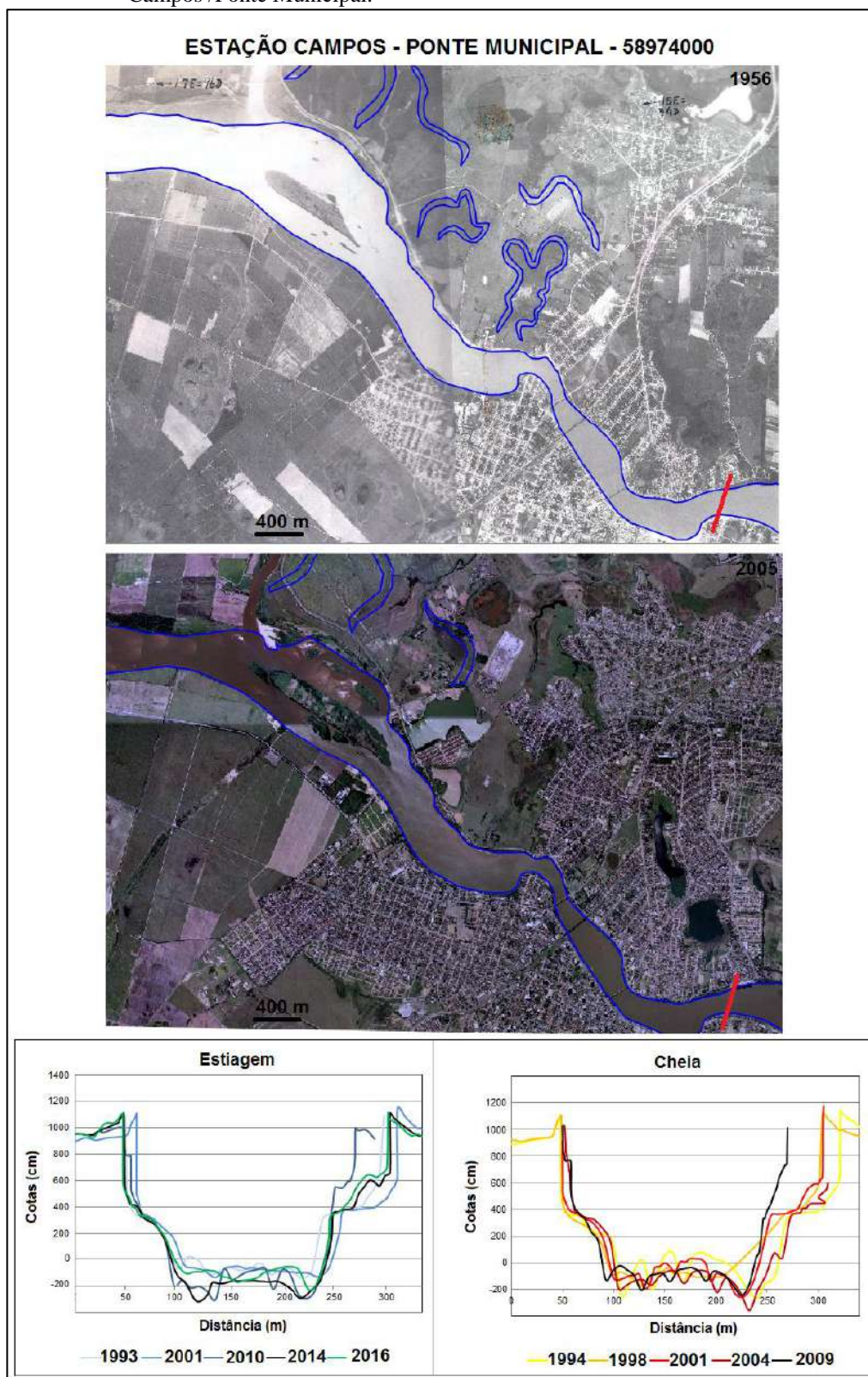
Figura 138 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica São Fidélis.



OBS.: Nas fotografias aéreas, o segmento vermelho refere-se à localização do perfil transversal.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 139 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Campos /Ponte Municipal.

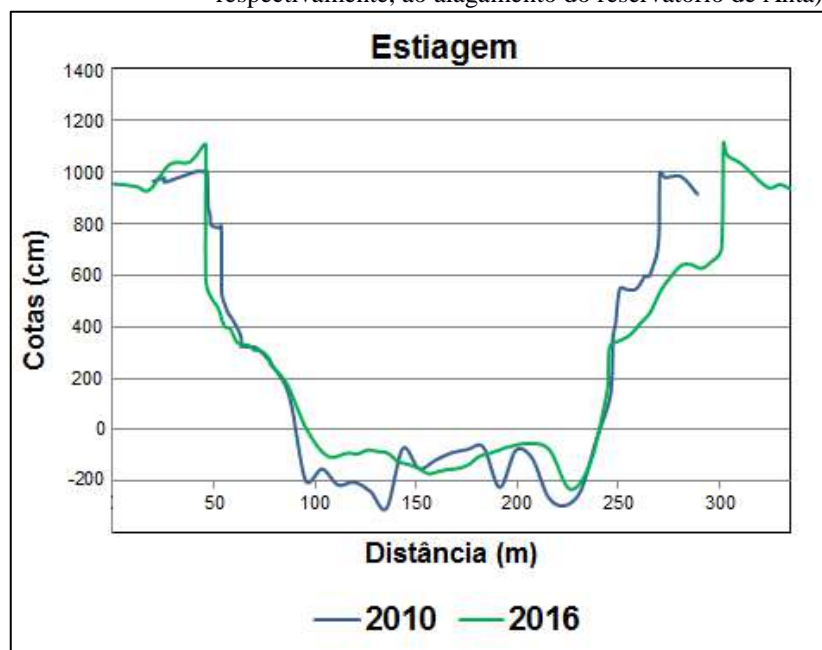


OBS.: Nas fotografias aéreas, o segmento vermelho refere-se à localização do perfil transversal.
Fonte: A autora, 2019.

De 2013 a 2014, o Sudeste brasileiro passou por severa estiagem e, em 2016, os índices pluviométricos voltaram a crescer, embora não tenham atingido os valores registrados em 2010 (Figura 119). Assim, em 2016, a vazão (Figura 122) e, conseqüentemente, a concentração de MPS da estação Campos/Ponte Municipal (Figura 124) não recuperaram os valores registrados em 2010. Soma-se a isso, o fato de que desde 2013, a barragem de Anta também vem contribuindo com a diminuição da concentração de MPS a sua jusante (Figura 97) e, provavelmente, de sedimentos de fundo. Uma hipótese que ajudaria a entender a ocorrência de processos deposicionais no fundo do canal na estação Campos/Ponte Municipal de 2010 a 2016 (Figura 140), seria a afluência, imediatamente a montante desta estação, das águas do rio Muriaé (Figura 23). A contribuição de sedimentos de fundo deste rio ao RPS pode ter ocasionado elevação e suavização do fundo do canal.

A inexistência de um número adequado de perfis transversais e de perfis anteriores à construção das demais barragens do RPS impediu a investigação mais profunda das mudanças morfológicas transversais do seu canal fluvial. Por meio dos perfis transversais disponíveis foi possível, entretanto, calcular os parâmetros sugeridos por Su et al. (2015) e avaliar seu comportamento em relação àqueles de outras estações (Tabela 15).

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).



Fonte: A autora, 2019.

Nas duas estações do curso inferior, as taxas de variação dos parâmetros ficaram inferiores a 8% para A, 2% para PM e 10% para a razão LA/PM, na estiagem. No período da cheia, essas taxas ficaram abaixo de 9% para A, 25% para PM e 31% para a razão LA/PM. Assim como ocorreu nas estações regularizadas dos cursos superior e médio inferior, nas estações deste curso a variabilidade dos parâmetros se mostrou relativamente pequena quando comparada à registrada na estação onde o fluxo não é regularizado (estação 1, Figura 23 e Tabela 3) e naquelas onde o fluxo é regularizado, mas atividades antrópicas ostensivas de extração de areia e agricultura irrigada alteram significativamente a vazão, mascarando a regularização (estações 3 e 4, Figura 23 e Tabela 6). O baixo percentual de variação dos parâmetros mencionados, indicam o quanto a regularização do fluxo fluvial do RPS inibe as alterações naturais do fluxo fluvial, e, conseqüentemente, poderão afetar a evolução natural da morfologia transversal de seu canal.

Tabela 15 – Parâmetros para avaliação de mudanças na morfologia transversal das duas estações fluviométricas do curso inferior.

ESTAÇÃO SÃO FIDÉLIS									
ESTIAGEM					CHEIA				
DATA	LA	A	PM	LA/PM	DATA	LA	A	PM	LA/PM
ABR/2001	427,7	627,1	1,5	291,7	MAR/2003	425,2	609,8	1,4	296,5
SET/2006	431,8	652,7	1,5	285,7	JAN/2006	435,9	628,2	1,4	302,5
MAI/2012	424,3	630,3	1,5	285,6	JAN/2008	428,4	590,7	1,4	310,7
					JAN/2011	414,7	607,0	1,5	283,3
%Δ		0,5	1,3	-2,1	%Δ		-0,5	2,1	-4,4
ESTAÇÃO CAMPOS - PONTE MUNICIPAL									
ESTIAGEM					CHEIA				
DATA	LA	A	PM	LA/PM	DATA	LA	A	PM	LA/PM
JUN/1993	207,0	679,5	3,3	63,1	JAN/1994	219,9	740,1	3,4	65,3
MAI/2001	182,8	619,8	3,4	53,9	MAR/1998	210,6	698,4	3,3	63,5
ABR/2010	183,9	804,6	4,4	42,0	DEZ/2001	175,1	622,4	3,6	49,3
JUN/2014	170,8	701,4	4,1	41,6	MAR/2004	209,1	844,2	4,0	51,8
JUL/2016	167,2	571,9	3,4	48,9	MAR/2009	182,7	755,1	4,1	44,2
%Δ		-7,7	0,9	-9,3	%Δ		8,1	24,6	-30,4

Legenda: LA – largura da água (em m); A – área da seção transversal (em m²); PM – profundidade média (em m); LA/PM – razão entre a largura da água e a profundidade média; %Δ – percentual de variação entre as datas extremas do período (estiagem/cheia).

Fonte: A autora, 2019.

4.4.6 Morfologia longitudinal

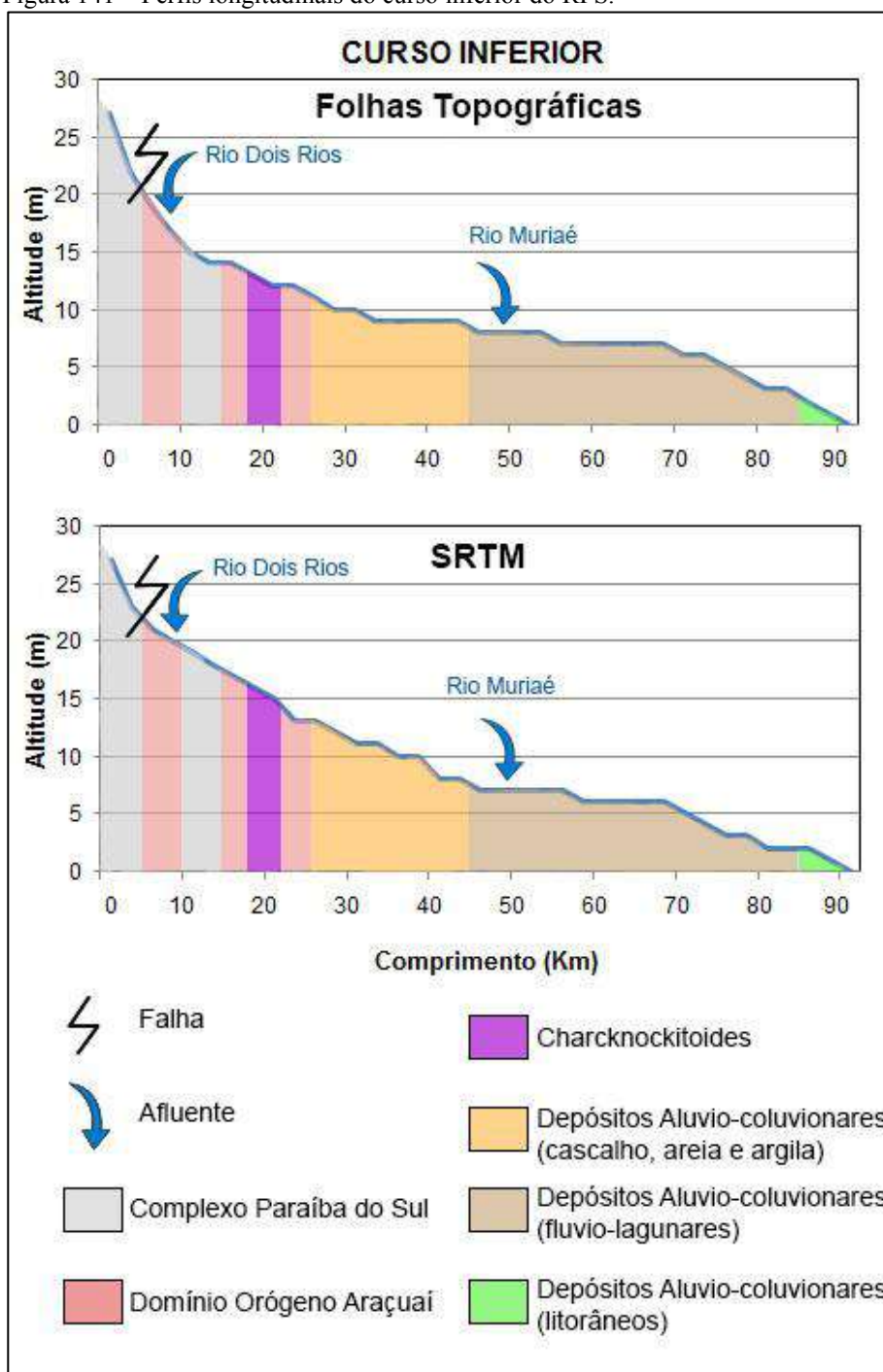
Apesar de o curso inferior ser o menor dos cursos do RPS, ele é geologicamente bem heterogêneo. Sua porção superior é caracterizada pelas rochas do Complexo Paraíba do Sul intercaladas com granitoides do Domínio Orógeno Araçuaí. Em direção a jusante esses granitoides se intercalam com charcknockitoides. Da porção mediana em diante, dominam os Depósitos Aluvio-coluvionares do Quaternário, que vão desde cascalhos, areias e argilas a depósitos fluvio-lagunares e, finalmente, depósitos litorâneos em sua porção final (Figura 141).

Na porção superior deste curso há uma falha, a jusante da qual o RPS recebe as águas do rio Dois Rios. Na porção central, o RPS conta também com a afluência das águas rio Muriaé. Observam-se vários *knickpoints* naturais nesse trecho, que não possui barragens ao longo de sua extensão (Figura 141).

No curso inferior, o valor da razão $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$, calculada a partir dos perfis longitudinais de 1950/60 e 2000, foi de 1,32 para ambas as datas, não tendo ocorrido variação com o tempo. Esse valor (abaixo de 2) corresponde a um trecho em equilíbrio ou ajustado (ETCHEBEHERE, 2000; MELO, FUJITA e SANTOS, 2009; FUJITA et al., 2011).

Visualmente se percebe que os dois perfis longitudinais do curso inferior apresentam algumas diferenças entre 1950/60 e 2000 (Figura 141), porém, a variação altimétrica deste curso (inferior a 30 m) é pequena, o que torna essas discrepâncias não muito significativas quando comparadas às discontinuidades observadas nos perfis dos cursos superior e médio inferior (Figuras 54 e 118, respectivamente).

Figura 141 – Perfis longitudinais do curso inferior do RPS.



Fonte: A autora, 2019. Elaborado a partir de folhas topográficas 1:50.000 do IBGE (décadas de 1950/60) e MDE do SRTM, 2000.

Legenda: MDE – Modelo digital de elevação; SRTM – *Shuttle Radar Topographic Mission*.

4.5 Resultados e discussões

Neste capítulo serão discutidos de maneira integrada os resultados das análises anteriormente apresentadas separadamente, por curso fluvial, de modo a fornecer uma visão sinóptica das alterações hidrológicas, sedimentológicas e morfológicas ocorridas em todo o curso fluvial do RPS.

4.5.1 Análise hidrológica e sedimentológica

Todas as séries temporais de vazões/cotas de estações localizadas a jusante de barragens com reservatório apresentaram tendências negativas nas últimas décadas (Figura 142). O oposto foi observado nas séries de chuvas do mesmo período, que apresentaram tendência ligeiramente crescente em todas as estações pluviométricas (Figura 142). Tendência hidrológica positiva só foi observada na série temporal de vazões da estação localizada aproximadamente 50 km a jusante da nascente (estação 1, Estrada do Cunha, Figura 23). Essa estação está situada a montante da primeira barragem existente, logo, ali o fluxo fluvial não é regularizado e suas oscilações ainda acompanham o comportamento das chuvas (Figura 142).

Marengo e Alves (2005) também observaram que, nos últimos cinquenta anos, as vazões/cotas do RPS têm registrado tendências negativas em vários postos fluviométricos do seu canal principal, e concluíram que o comportamento decrescente das séries fluviométricas não pareceu estar associado ao comportamento das chuvas na bacia, cuja tendência, no mesmo período, mostrou-se crescente. Os autores afirmaram, ainda, que as tendências hidrológicas negativas seriam consequência de influência antrópica, mas não de mudanças climáticas.

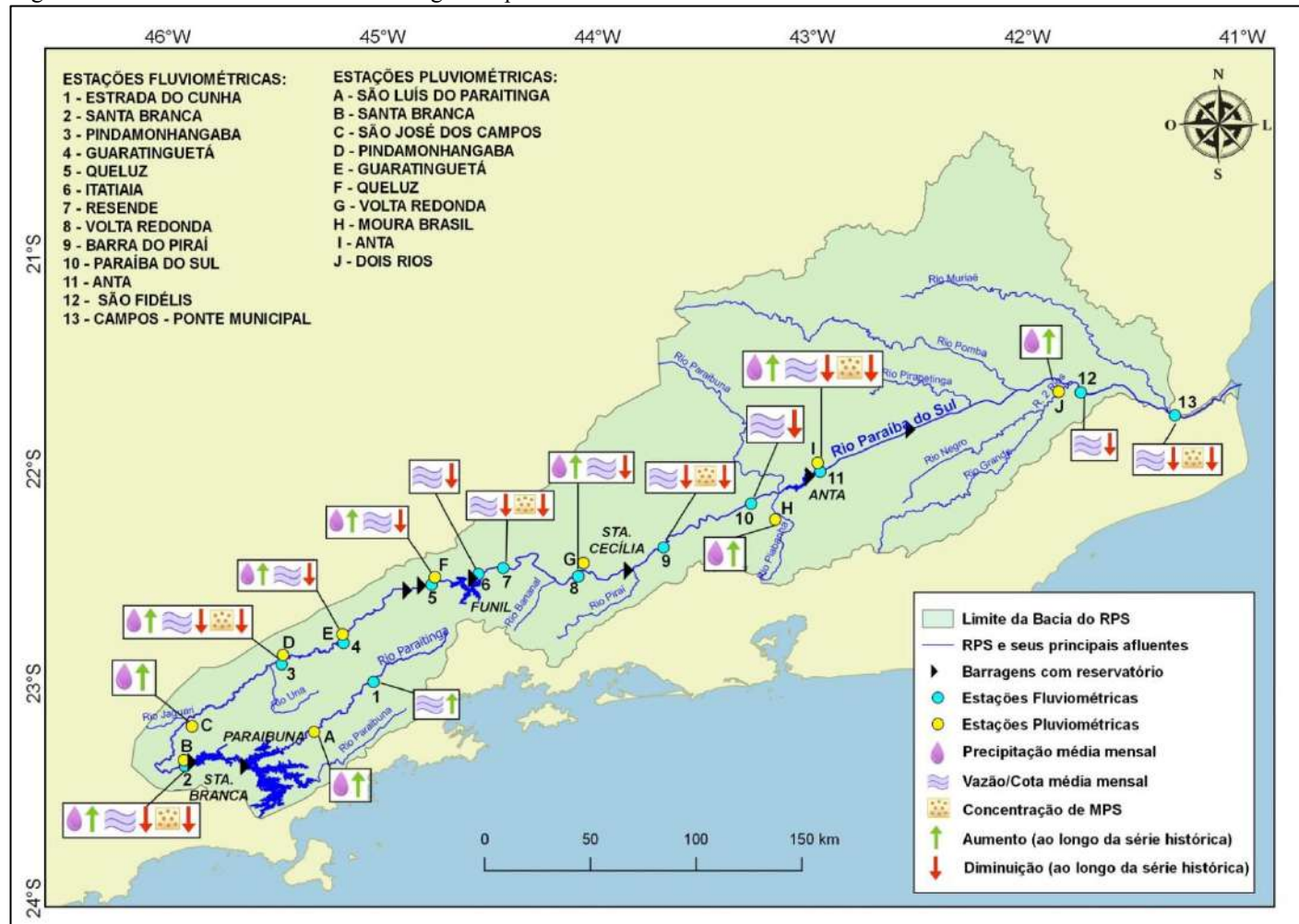
Não é tarefa simples determinar qual atividade antrópica seria a principal responsável pela diminuição dos valores das vazões/cotas do RPS e nem o grau de impacto de cada uma dessas atividades sobre seus parâmetros hidrosedimentológicos, já que o mesmo corta a região mais densamente povoada do país, onde coexistem atividades que visam o abastecimento de sua população e da RMRJ com atividades industriais e agropecuárias (também grandes

consumidoras de água). Porém, nas estações a jusante da transposição para o rio Guandu e das barragens com reservatório, logo após o ano de início de suas operações hidráulicas, o comportamento das vazões/cotas médias mensais foi alterado, mostrando como essas estruturas impactam de alguma maneira o fluxo fluvial. Por exemplo, alterações no padrão hidrológico das séries temporais a jusante da UEL Santa Cecília ocorreram após 1952, ano em que a transposição das águas do RPS se iniciou. Foram registradas algumas mudanças na assinatura hidrológica (como queda nos valores hidrológicos médios) das estações fluviométricas a jusante daquela UEL: Barra do Pirai (Figura 91) e Anta (Figura 93), no curso médio inferior, e Campos/Ponte Municipal (Figura 122), no curso inferior. Cabe lembrar que no período de 1952-1955, o Sudeste brasileiro foi acometido por intensa estiagem (MARENGO; ALVES, 2005). Assim, nessas estações, tanto os efeitos da seca como do desvio de dois terços das águas do RPS para o rio Guandu devem ser considerados ao avaliar a queda nos valores de vazões/cotas a partir de 1952.

Nas estações a montante da transposição (Estrada do Cunha, Santa Branca, Pindamonhangaba, Guaratinguetá, Queluz, Resende e Volta Redonda, respectivamente Figuras 31, 32, 59, 60, 87, 89 e 90), a queda dos parâmetros hidrológicos após 1952 deve ser atribuída somente à estiagem de 1952-1955, pois logo após o período seco, os parâmetros hidrológicos se recuperaram. Além disso, essas estações estão localizadas acima do ponto de desvio e em 1952 ainda não tinham sido construídas, a montante dessas estações, as barragens reguladoras (Santa Branca e Paraibuna) que represam grandes volumes de água para garantir que a transposição e os demais usos do RPS ocorram com segurança. Somente quando essas duas grandes barragens foram instaladas (1961 e 1977, respectivamente) e passaram a operar em consonância com as operações de transposição é que o fluxo fluvial nas estações a montante da transposição foi alterado.

Alterações no fluxo hidrológico também foram observadas em nove estações fluviométricas a jusante da barragem Santa Branca após 1961, quando seu reservatório entrou em operação. As séries hidrológicas que apresentaram algum tipo de mudança no comportamento das vazões/cotas médias mensais após aquele ano foram: Santa Branca (Figura 32), no curso superior, Pindamonhangaba (Figura 59) e Guaratinguetá (Figura 60), no curso médio superior, Queluz (Figura 87), Itatiaia (Figura 88), Resende (Figura 89), Volta Redonda (Figura 90), Barra do Pirai (Figura 91) e Anta (Figura 93), no curso médio inferior; e Campos/Ponte Municipal (Figura 122), no curso inferior.

Figura 142 – Tendências hidrosedimentológicas e pluviométricas do RPS nas últimas décadas.



OBS.: As séries temporais hidrosedimentológicas das estações da ANA apresentam intervalos diferentes (Quadro 3).

Fonte: A autora, 2019.

Em 1969, quando o reservatório da barragem de Funil entrou no circuito de regularização do fluxo do RPS, os dados hidrológicos das estações a sua jusante registraram alterações significativas em suas séries: Itatiaia (Figura 88), Resende (Figura 89), Volta Redonda (Figura 90), Barra do Piraí (Figura 91) e Anta (Figura 93), no curso médio inferior; e Campos/Ponte Municipal (Figura 122), no curso inferior. Foi registrada diminuição tanto da amplitude entre os valores extremos das vazões/cotas, como também do valor médio desses parâmetros. Importante lembrar que, para que as operações de regularização da vazão em Funil possam ser realizadas, é necessário que os reservatórios a montante (Santa Branca e Paraibuna, Figura 23) também executem operações de armazenamento e controle de fluxo, de modo a garantir a vazão mínima que chega à barragem de Funil. Por isso, a partir de 1969, para que Funil pudesse regularizar o fluxo a sua jusante, a barragem Santa Branca (existente desde 1961) passou a operar em consonância com aquela, armazenando e/ou liberando água de modo a garantir a segurança hídrica para os demais usos do RPS a sua jusante (COELHO, 2012). Assim, apesar de localizadas a montante de Funil, nas estações fluviométricas Santa Branca (Figura 32), Pindamonhangaba (Figura 59), Guaratinguetá (Figura 60) e Queluz (Figura 87), também ocorreram mais alterações hidrológicas a partir de 1969, quando Funil entrou em operação.

Após 1977, com a entrada em operação do reservatório da barragem Paraibuna, novas alterações nas séries hidrológicas foram registradas. Algumas estações a jusante dessa barragem apresentaram queda, outras, aumento dos valores de vazões/cotas médias mensais relativamente ao período anterior (1969 a 1977), porém, a maioria apresentou diminuição da amplitude entre os valores máximo e mínimo das vazões/cotas, como efeito da nova regularização a que passaram a ser submetidas; foi o caso das seguintes estações: Santa Branca (Figura 32), no curso superior, Pindamonhangaba (Figura 59) e Guaratinguetá (Figura 60), no curso médio superior, e Queluz (Figura 87), Itatiaia (Figura 88), Volta Redonda (Figura 90) e Barra do Piraí (Figura 91), no curso médio inferior.

Finalmente, a partir de 2013, ano em que o reservatório da barragem de Anta iniciou suas operações no trecho final do curso médio inferior (Figura 23), as séries temporais de vazões das estações a sua jusante também registraram mudanças na assinatura hidrológica. As séries temporais das estações Anta (Figura 93), no curso médio inferior, São Fidélis (Figura 121) e Campos/Ponte Municipal (Figura 122), no curso inferior, passaram a apresentar menor amplitude entre os valores extremos de vazões/cotas e também queda nos valores médios.

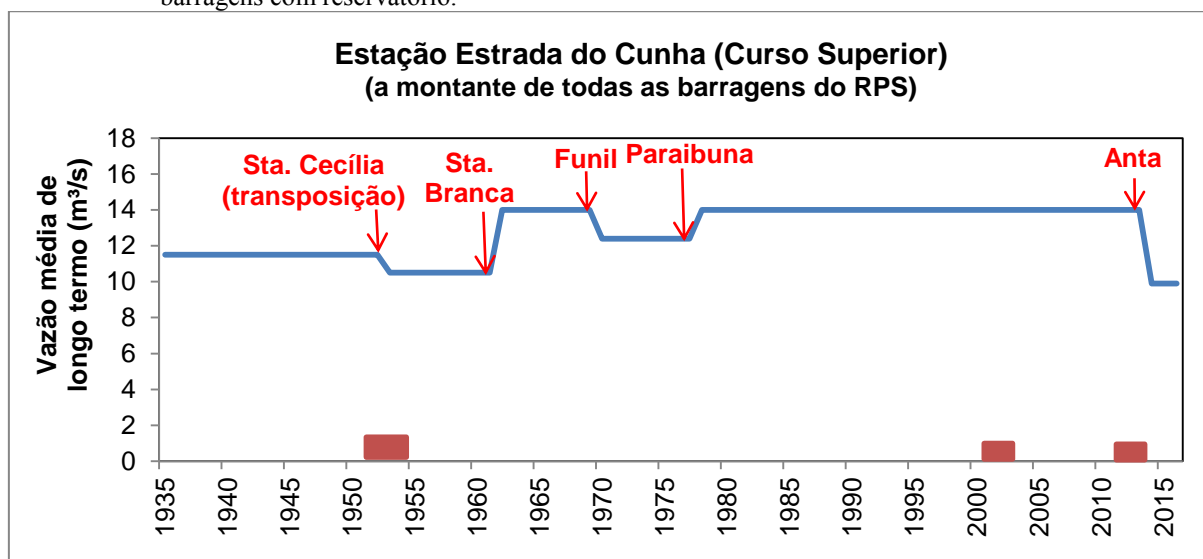
Um fator que intensificou a queda dos valores hidrológicos observado após 2013 nas estações Anta e Campos/Ponte Municipal foi a severa estiagem que assolou a Região Sudeste

brasileira de 2013 a 2014. Os anos de 1961, 1969 e 1977 – a partir dos quais as barragens Santa Branca, Funil e Paraibuna entraram em operação, alterando a assinatura hidrológica das séries temporais de várias estações – não coincidiram com períodos de estiagem severa, nem de fenômenos como El Niño e La Niña (INPE, 2018), que normalmente modificam as condições meteorológicas na Região Sudeste do Brasil. Isso reforça a hipótese de que, naqueles anos, as barragens e as operações hidráulicas por elas realizadas foram as responsáveis pelas alterações observadas nos parâmetros hidrológicos das estações analisadas.

Ainda para avaliar os impactos da regularização exercida pelas barragens com reservatório sobre o fluxo fluvial do RPS, foram elaborados gráficos de vazões/cotas médias anuais de longo termo do período anterior a 1952 (antes, portanto, do início da transposição e da instalação das demais barragens com reservatório no RPS), e dos períodos posteriores às datas de instalação das barragens com reservatório de duas estações fluviométricas: uma a montante de todas as barragens e outra a jusante de todas elas (estação 1, Estrada do Cunha e estação 11, Anta, respectivamente, Figura 23). Assim, pôde-se avaliar o impacto de cada uma dessas interferências sobre os parâmetros hidrológicos à medida que as barragens entraram no circuito de regularização.

Na estação a montante de todas as barragens (estação 1, Estrada do Cunha, Figura 23), somente após 1952 e 2013 a vazão média anual de longo termo diminuiu (9% e 14%, respectivamente) em relação à média anterior a 1952, quando ainda não havia barragens no RPS (Figura 143). Porém, não se pode atribuir essas quedas à instalação de Santa Cecília (transposição) e de Anta, pois essas interferências hidráulicas acontecem a jusante desta estação, a mais de 500 km de distância da mesma (Figura 23). A causa da diminuição da vazão deve estar relacionada à queda nos valores de precipitação, pois, no mesmo período em que as duas barragens foram instaladas, ocorreram grandes estiagens (de 1952-1955 e 2013-2014) no Sudeste do Brasil (Figura 143). Quanto às demais barragens, após serem instaladas, não diminuíram a média de longo termo da estação Estrada do Cunha (Figura 143). Ao contrário, esse parâmetro aumentou em relação à média de longo termo anterior a 1952: cerca de 22% após a instalação de Santa Branca, 18% após Funil e 22% após Paraibuna (Figura 143), corroborando a hipótese de que nessa estação, o comportamento hidrológico não foi comprometido pelas barragens, mas influenciado pelas chuvas, cuja tendência foi positiva (Figura 28).

Figura 143 – Vazão média de longo termo da estação Estrada do Cunha, calculada entre os anos de instalação de barragens com reservatório.



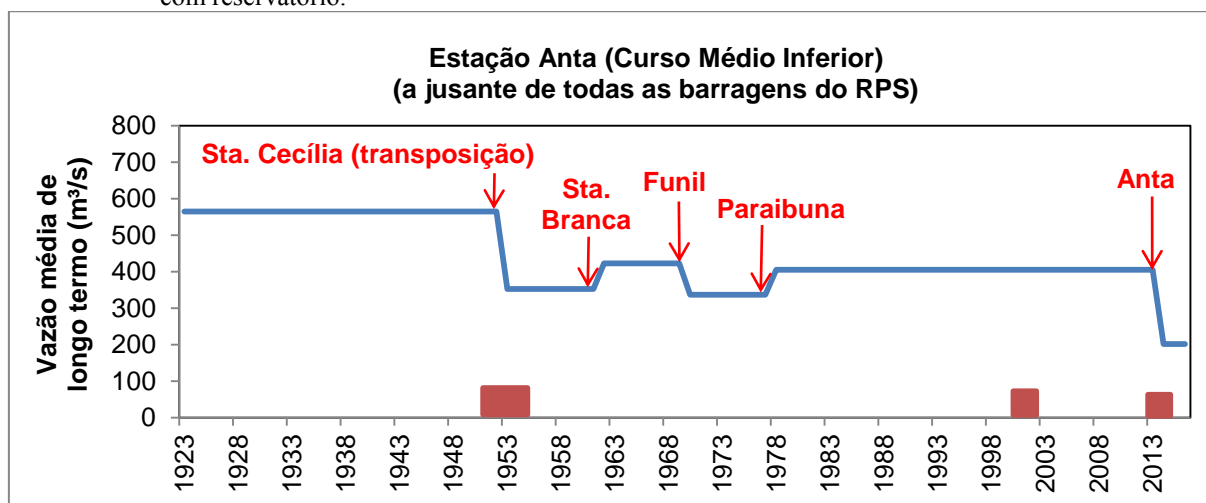
Legenda: As setas vermelhas indicam o ano de início da operação das barragens cujos nomes estão indicados próximos a essa setas; os retângulos em marrom representam os períodos de severas estiagens no Sudeste do Brasil.

Fonte: A autora, 2019.

Na estação localizada a jusante de todas as barragens (estação 11, Anta, Figura 23), após a instalação das barragens a vazão média de longo termo diminuiu em relação ao período anterior a 1952, quando ainda não havia interferências hidráulicas (Figura 144). Após a transposição (que ocorre neste curso, a montante da estação Anta), houve queda de quase 38% da vazão média em relação ao período anterior. Após a instalação de Santa Branca (1961), Funil (1969) e Paraibuna (1977), todas a montante dessa estação, as quedas foram de 25%, 37% e 28% em relação ao período anterior a 1952. Após 2013, com a entrada em operação da barragem de Anta (imediatamente a montante dessa estação), a queda foi de quase 65% em relação ao período anterior a 1952 (Figura 144). É importante lembrar que os períodos de estiagens severas de 1952-1955 e 2013-2014 coincidiram com o período de instalação das barragens Santa Cecília e Anta, respectivamente, o que provavelmente intensificou a diminuição dos parâmetros hidrológicos nesse curso (Figura 144).

Após a instalação de Santa Branca (1961) e Paraibuna (1977), houve quedas (de 25% e 28%, respectivamente) da vazão média de longo termo em relação ao período anterior a 1952; porém, em relação aos períodos imediatamente anteriores à instalação dessas barragens (1952-1961 e 1969-1977, respectivamente), foram registrados ligeiros aumentos (de 20%, em ambos os casos) da vazão média anual de longo termo (Figura 144), provavelmente decorrentes da regularização de vazão realizada por seus reservatórios quando entraram no circuito hidráulico do RPS.

Figura 144 – Vazão média de longo termo da estação Anta, calculada entre os anos de instalação de barragens com reservatório.



Legenda: As setas vermelhas indicam o ano de início da operação das barragens cujos nomes estão indicados próximos a essa setas; os retângulos em marrom representam os períodos de severas estiagens no Sudeste do Brasil.

Fonte: A autora, 2019.

As séries de concentração de MPS das estações fluviométricas da ANA utilizadas neste trabalho também mostraram tendência decrescente ao longo das décadas analisadas, assim como o comportamento das séries de cotas/vazões (Figura 142). Mesmo nas estações do curso médio inferior à jusante do trecho onde ocorre intensa erosão das encostas (Figuras 95 e 96), foi observada diminuição dos valores de concentração de MPS ao longo dos anos. Ali, a queda dos valores de concentração de MPS pode ser atribuída à barragem de Funil, a montante. Segundo Marengo e Alves (2005), o reservatório desta barragem vem apresentando intenso assoreamento nos últimos anos em função da retenção de sedimentos. Com isso, a quantidade de sedimentos que normalmente fluiria rio abaixo, vem diminuindo.

Nas estações fluviométricas Anta (estação 11, Figura 23) e Campos/Ponte Municipal (estação 13, Figura 23), que possuem dados de concentração de MPS anteriores à instalação da barragem de Anta (Figuras 97 e 124), os valores médios de concentração de MPS caíram após a instalação desta obra. Quando a barragem foi instalada, a Região Sudeste passava por um período de escassez de chuvas (estiagem de 2013-2014), o que também contribuiu com a diminuição dos parâmetros hidrossedimentológicos dessas estações. Porém, após o fim da estiagem, em nenhuma das estações houve recuperação dos valores de concentração de MPS para aqueles registrados antes da estiagem e da instalação da barragem (Figuras 97 e 124).

Os resultados da filtração das amostras coletadas mensalmente (de 2015 a 2017) nos pontos pré e pós-barragem de Anta, corroboraram a hipótese de que as barragens contribuem

com a diminuição de concentração de MPS a sua jusante. As amostras do ponto à montante da barragem apresentaram valores de concentração de MPS mais elevados que aquelas coletadas, na mesma data, no ponto a jusante (Quadro 7 e Figura 99). Além disso, ao longo de dois anos de amostragens, a série de concentração de MPS do ponto pré-barragem apresentou tendência ligeiramente positiva, enquanto a do ponto pós-barragem apresentou tendência negativa, corroborando a hipótese de retenção de MPS no reservatório da barragem de Anta (Figura 99).

4.5.2 Análise da morfologia de vista em planta

A partir dos polígonos oriundos do mapeamento fluvial realizado sobre as fotografias aéreas de 1950/60 e 2004-06, foram calculados alguns parâmetros morfométricos dos quatro cursos do RPS para investigar sua variabilidade no intervalo temporal entre as fotos.

Ao longo de cinco décadas, os menores percentuais de variação da largura média ($\% \Delta \bar{W}$) e da área alagada do canal fluvial ($\% \Delta A$) ocorreram no curso inferior (-4,1 e - 2,6, respectivamente), enquanto os maiores percentuais, no curso médio superior (-73,6 e - 47,2, respectivamente, Tabela 16).

Apesar do primeiro e do terceiro maiores reservatórios do RPS (Paraibuna e Santa Branca) estarem localizados no curso superior (Figura 20), o $\% \Delta \bar{W}$ deste curso foi relativamente menor que o dos cursos médio superior e médio inferior (Tabela 16). Próximo à nascente, o curso superior ocupa uma região ainda preservada e, até sua porção central, o rio corta áreas pouco urbanizadas de municípios de pequeno porte. A partir do reservatório de Paraibuna, a paisagem do curso superior apresenta-se mais alterada, e sua porção mais distal (de 45 km de extensão), a jusante dos seus dois reservatórios, está submetida aos impactos da retenção de grandes volumes de água a montante. Em face da existência de segmentos com níveis de interferência antrópica tão distintos, fez-se necessário o cálculo do $\% \Delta \bar{W}$ em dois segmentos deste curso: a montante e a jusante de seus reservatórios, de modo que o impacto do reservatório de Paraibuna (instalado após a década de 1950/60) sobre esse parâmetro pudesse ser avaliado.

Apesar da tendência positiva das séries pluviométricas na BRPS (Figura 142), do comportamento crescente da série de vazões a estação mais próxima à nascente (Figuras 31 e 142) e do aumento da largura média do canal em algumas áreas a montante do reservatório de

Paraibuna (Figuras 46 e 47), nos dois segmentos do curso superior em que o $\% \Delta \bar{W}$, foi calculado, houve, de 1950/60 a 2004-06, diminuição da largura média do canal: aproximadamente 4% a montante dos reservatórios e 12% a sua jusante.

Tabela 16 – Variabilidade de alguns parâmetros do RPS, calculada a partir dos polígonos de seus cursos fluviais.

Curso do RPS	$\% \Delta \bar{W}$	$\% \Delta A$	$\% \Delta \text{Ilhas}$	Correção geométrica	Data das Fotos	$\xi \bar{w}$ do canal (m)
Superior	-8,1	-21,7	-25	Georreferenciamento	1965/1966	25,5
				Ortorretificação	2004	9,5
Médio Superior	-73,6	-47,2	-58	Georreferenciamento	1966	29,2
				Ortorretificação	2004	14,5
Médio Inferior	-17,5	-21,4	19	Georreferenciamento	1956/1965/1966	16,5
				Ortorretificação	2005/2006	9,5
Inferior	-4,1	-2,6	30	Georreferenciamento	1956	20,8
				Ortorretificação	2005/2006	10,8

Legenda: $\% \Delta \bar{W}$, $\% \Delta A$ e $\% \Delta \text{Ilhas}$ – Percentual de variação da largura média (Equação 9), da área alagada e da área ocupada por ilhas do canal fluvial; $\xi \bar{w}$ – Erro residual do cálculo da largura média do canal fluvial para os diferentes insumos utilizados na vetorização dos cursos fluviais.

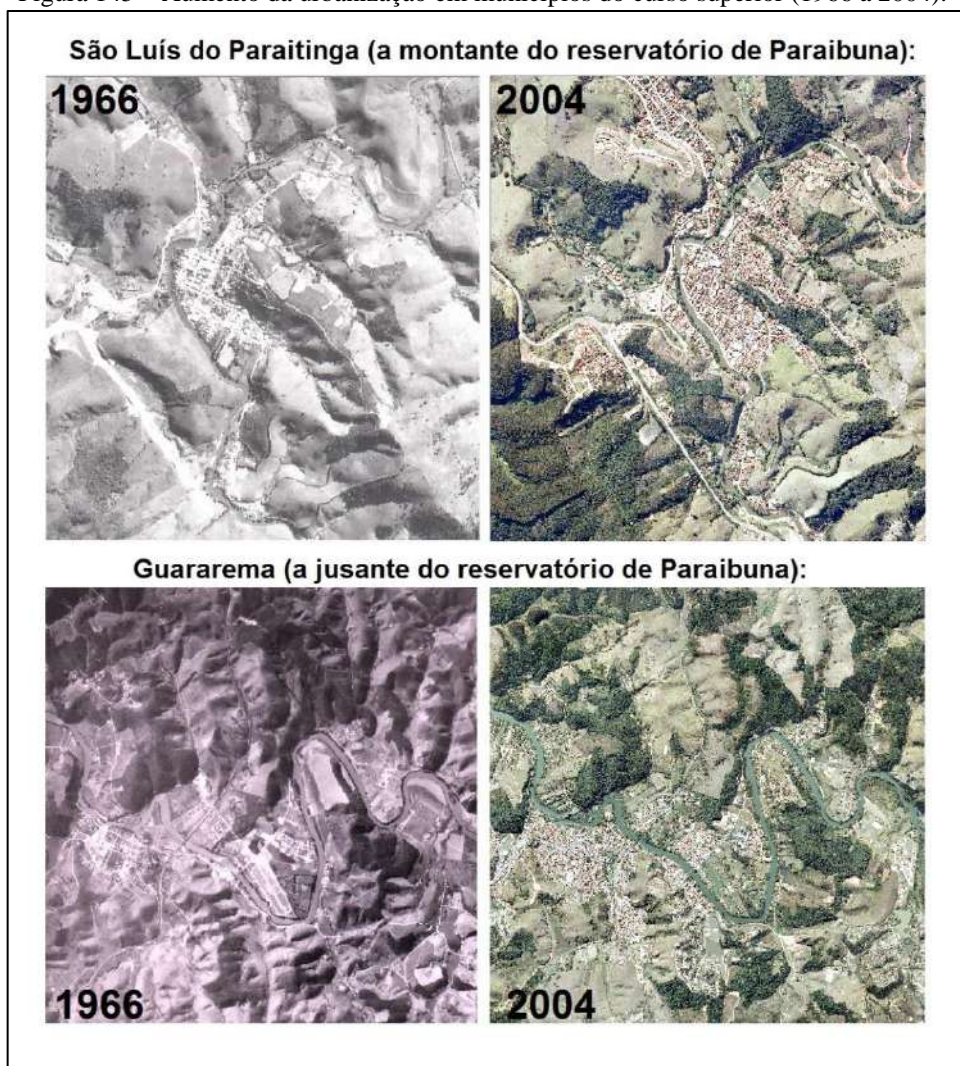
Fonte: A autora, 2019.

No segmento do curso superior a montante do reservatório de Paraibuna, a diminuição da largura média do canal pode estar diretamente relacionada ao aumento da urbanização de alguns municípios do entorno do RPS (como São Luís do Paraitinga, Figura 145) e, conseqüentemente, do consumo de água do RPS para abastecimento humano e demais atividades, principalmente agrícolas. Embora de 1950/60 a 2004/06 a urbanização também tenha aumentado nos municípios da porção final do curso superior (Figura 145), a alteração mais significativa neste segmento foi o alagamento de uma área superior a 200 km² pelas águas do reservatório de Paraibuna (Figuras 36 e 37). A análise hidrológica mostrou que, após a instalação dessa barragem (1977) houve, a sua jusante, queda da vazão média em relação ao período anterior a 1952 (Figura 32). Isso reforça a hipótese de que, no curso superior, o alagamento do reservatório de Paraibuna foi o principal responsável pela diminuição da largura média do canal no segmento a sua jusante.

Quanto às ilhas do curso superior, a área ocupada pelas mesmas diminuiu 25% (Tabela 16) ao longo das décadas investigadas. A análise das fotografias aéreas mostrou que nos trechos do canal imediatamente a montante do reservatório de Paraibuna (Figuras 46 e 47) ocorreu aumento do volume de água no canal fluvial e, com isso, o afogamento de ilhas. Importante ressaltar que, embora a diminuição do tamanho das ilhas tenha sido uma tendência observada no curso superior, a jusante dos reservatórios de Santa Branca e Paraibuna (Figuras 50 e 51), houve surgimento de novas ilhas e aumento da área emersa das ilhas já existentes na

década de 1950/60, em função do represamento de água ocorrido no reservatório de Paraibuna.

Figura 145 – Aumento da urbanização em municípios do curso superior (1966 a 2004).



Fonte: A autora, 2019.

Apesar da inexistência de barragens com reservatório no curso médio superior (Figura 20), este curso apresentou os maiores percentuais de variabilidade da largura média e da área alagada do canal entre 1950/60 e 2004-06 (Tabela 16). Por se tratar de um trecho do RPS caracterizado por extensas planícies aluviais, a dinâmica morfológica natural do canal é esperada. Além disso, a análise hidrológica apontou diminuição das cotas médias após os anos de instalação das barragens Santa Branca e Paraibuna, no curso a montante (Figuras 59 e 60). Ao impactar o volume de água rio abaixo, essas barragens contribuíram com o encolhimento do canal no curso médio superior, localizado a jusante das mesmas. Atividades consumidoras de grandes volumes de água do RPS, como a rizicultura irrigada e extração de areia (cujas áreas mapeadas aumentaram 136% de 1950/60 a 2004-06), são ostensivas no curso

médio superior (Figuras 75 a 77), diminuindo também o fluxo fluvial e, conseqüentemente, a largura do canal. Segundo Kondolf (1997), atividades mineradoras, quando realizadas em trechos localizados a jusante de barragens, produzem impacto significativo na morfologia do canal, ocasionando déficit de sedimentos rio abaixo. Assim, a mineração ostensiva de areia registrada no curso médio superior explicaria a diminuição acentuada (58%) da área ocupada por suas ilhas (Tabela 16).

Quanto ao curso médio inferior, apesar de a transposição das águas do RPS para abastecer o rio Guandu ocorrer neste trecho e da presença de duas barragens com reservatório (Funil e Anta, Figura 20), os percentuais de diminuição da largura média e da área alagada do canal não foram tão elevados quanto no curso médio superior (Tabela 16), onde, além da regularização do fluxo realizada pelas barragens Paraibuna e Santa Branca, existem atividades antrópicas consumidoras de grandes volumes de água. Apesar de relativamente menores, os percentuais de variação ainda foram significativos (Tabela 16). Cabe ressaltar que, neste curso, o RPS corta uma região de intenso controle estrutural, onde as mudanças morfológicas não respondem com a mesma intensidade que aquelas das planícies aluviais do curso a sua montante. Mesmo assim, ao longo de todo o curso médio inferior, foram observadas áreas onde o canal fluvial apresentou diminuição da largura média superior a 70 m: a jusante do reservatório de Funil (Figura 108), a jusante da transposição (Figura 109) e a jusante do reservatório de Anta (Figura 110). O contrário – aumento da largura média do canal – só foi observado a montante das barragens de Funil e Anta (Figuras 106 e 110, respectivamente), mostrando como as estruturas e operações hidráulicas interferem na morfologia fluvial.

A análise hidrológica do curso médio inferior (Figuras 91, 93 e 144) apontou queda nos valores de vazão média de longo termo após a transposição e após a instalação de suas barragens com reservatório, corroborando a hipótese de que, ao impactarem o fluxo fluvial que chega neste curso, essas obras também contribuiriam com as mudanças morfológicas de seu canal. O aumento de 19% da área ocupada pelas ilhas no curso médio inferior (Tabela 16) pode ser compreendido também como resultado da diminuição do volume de água do canal do RPS ao longo do tempo, levando a uma maior exposição da superfície das ilhas.

Finalmente, no curso inferior do RPS, o canal apresentou os menores percentuais de diminuição da largura média e área alagada do canal (Tabela 16). Embora a análise hidrológica tenha mostrado que o fluxo fluvial chega enfraquecido neste curso, com vazão reduzida graças à transposição e demais interferências hidráulicas realizadas nos cursos a montante (Figura 122), ali, o RPS conta com a contribuição das águas do rio Dois Rios (resultado da confluência dos rios Negro e Grande, Figura 20), na margem direita, e do rio

Muriaé, na margem esquerda. Em um curso cuja extensão equivale a menos de um quinto daquela do curso anterior, essa contribuição hidrológica é importante, e provavelmente ajudou a amenizar, sobre seu canal fluvial, os impactos das interferências hidráulicas realizadas a montante. Porém, não impediu a ocorrência de algumas mudanças significativas semelhantes às observadas no curso médio inferior, como a diminuição da largura média do canal superior a 70 m em algumas áreas (Figura 130) e o aumento da área emersa das ilhas deste curso (Tabela 16).

O cálculo dos índices de sinuosidade Mueller (1968) possibilitou novas inferências a respeito dos cursos fluviais do RPS. Nos cursos superior e médio inferior, a influência da topografia sobre a forma do canal é marcante, o que foi confirmado pelos elevados percentuais do Índice de Sinuosidade Topográfica (IST) em relação à componente hidráulica (ISH), em ambos os cursos (Tabela 17). Segundo Mueller (1968), rios sinuosos em estágios erosionais iniciais, sem ou com pequenas planícies deposicionais e largura do canal semelhante à do vale fluvial, normalmente apresentam IST mais elevado que o ISH. Porém, quando há diminuição no percentual do IST (e conseqüente aumento do ISH), como foi observado no curso superior entre 1950/60 e 2004-06 (Tabela 17), aquele autor sugere a ocorrência de uma mudança no estágio erosional do canal.

Deve-se tomar cuidado para não confundir estágio com idade; um vale fluvial pode ser muito jovem ou muito velho e ainda ser classificado como no estágio inicial do ciclo; e um rio poderá permanecer no estágio juvenil por centenas de milhares de anos desde que possua gradiente capaz de manter a velocidade de seu fluxo elevada, impedindo, assim, a formação de planícies de inundação extensas (MUELLER, 1968). No curso superior, mesmo com o IST dominando a sinuosidade, um ligeiro aumento da componente hidráulica (ISH) ocorreu entre 1950/60 e 2004-06 (Tabela 17), o que pode estar relacionado ao desenvolvimento de planícies aluviais em alguns trechos do mesmo (Figura 41 e Apêndice A), a montante da influência das barragens.

Já no curso médio inferior, onde o canal encontra-se “encaixado” graças a um intenso controle estrutural, não houve desenvolvimento de planícies aluviais entre 1950/60 e 2004-06, e o IST (que neste curso representou 100% da sinuosidade) não se alterou ao longo das décadas (Tabela 17).

Segundo Mueller (1968), em estágios erosionais mais avançados, em que extensas planícies aluviais estão presentes, a componente hidráulica da sinuosidade (ISH) domina sobre a topográfica (IST). No RPS, isso foi observado nos cursos médio superior e inferior (Tabela 17). Nas várzeas do curso médio superior, apesar de dominante, o ISH apresentou

ligeira queda ao longo das décadas (Tabela 17). Apesar de pequena, essa diminuição (acompanhada pelo aumento da componente topográfica) pode estar relacionada ao aumento das intervenções antrópicas (desvios e canalizações para irrigação, exploração de areia etc.) sobre os processos naturais de avulsão do canal fluvial das planícies alúvias paulistas, o que, segundo Mueller (1968), pode levar a um rejuvenescimento do estágio erosional do canal.

Tabela 17 – Parâmetros morfométricos dos cursos fluviais do RPS (1950/60 e 2004-06).

Curso	Data da fotografia	ISH (%)	IST (%)	IE
Superior	1965/1966	3,3	96,7	–
	2004	6,6	93,4	–
		98%	–3%	
Médio Superior	1966	79,4	20,6	–
	2004	74,6	25,4	–
		–6	23%	
Médio Inferior	1956/1965/1966	0	100	–
	2005/2006	0	100	–
		0%	0%	
Inferior	1956	60,6	39,4	3,1
	2005/2006	58,3	41,7	3,4
		–4%	6%	12%

Legenda: ISH – Índice de Sinuosidade Hidráulica (Equação 10); IST – Índice de Sinuosidade Topográfica (Equação 11); IE – Índice de Entrelaçamento (Equação 14).

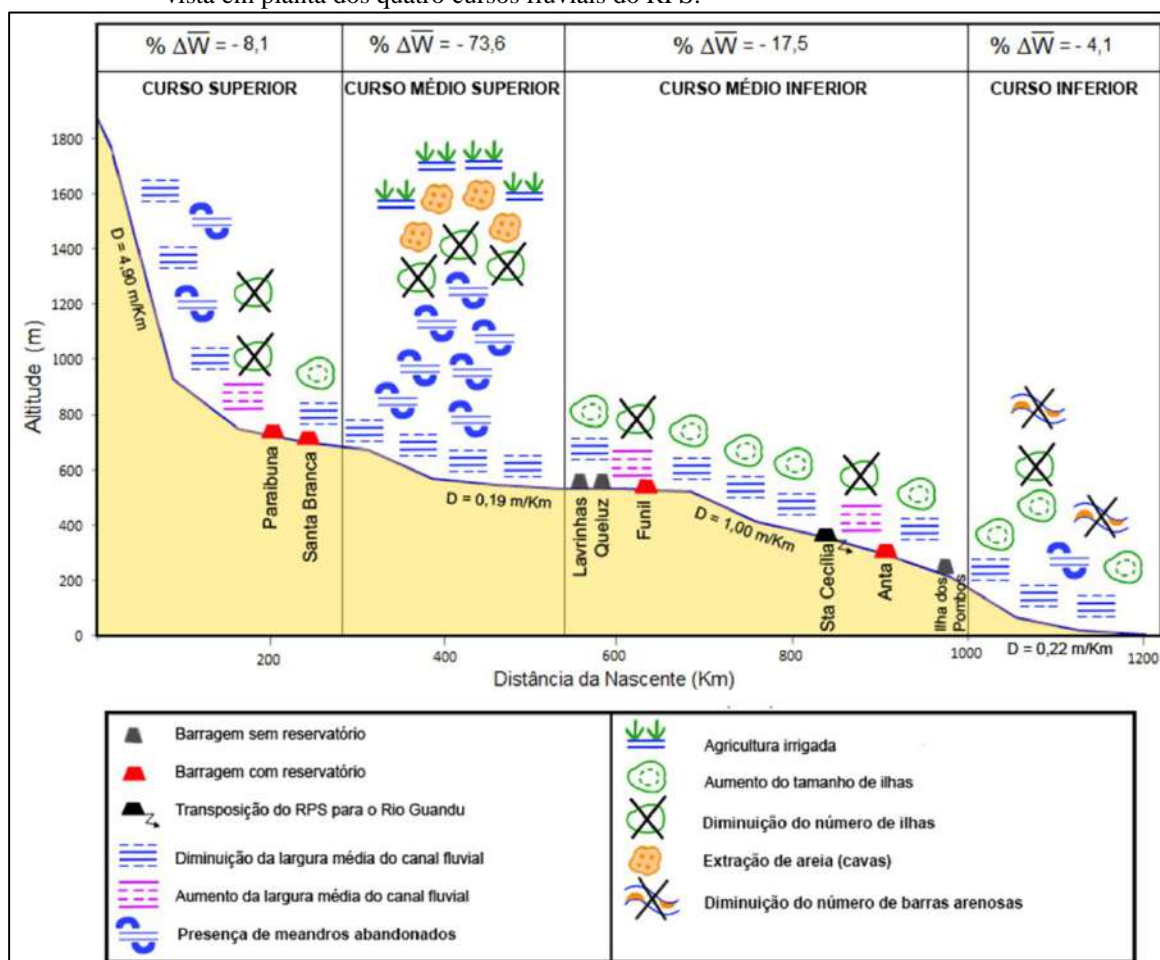
Fonte: A autora, 2019.

Apesar da componente hidráulica da sinuosidade ser maior que a componente topográfica no curso inferior, este curso apresentou a menor diferença entre os valores do ISH e do IST (Tabela 17), mostrando um ligeiro rejuvenescimento dos processos erosivos do canal (aumento do IST). Em função do padrão morfológico entrelaçado predominante na maior parte deste curso, somente nele foi avaliada a variabilidade do Índice de Entrelaçamento (IE) de Brice. Em cinco décadas, houve um aumento de 12% no IE (Tabela 17), o que já era esperado em função do aumento da área ocupada por ilhas (Tabela 16) subsequente à diminuição do fluxo fluvial após as intervenções hidráulicas realizadas nos cursos a montante.

Por meio da análise da morfologia de vista em planta do RPS foi verificado que o impacto das barragens com reservatório ocorreu em todos os seus cursos, mesmo naqueles onde essas estruturas não estão presentes, mas o fluxo está submetido à influência das barragens de outro curso, a montante. Como os quatro cursos são bastante distintos entre si, a

resposta morfológica aos impactos provocados pelas barragens nem sempre é a mesma (Figura 146). Em alguns cursos, por exemplo, a área do canal ocupada pelas ilhas, aumentou (cursos médio inferior e inferior), enquanto em outros, diminuiu (cursos superior e médio superior). No entanto, uma mudança foi comum a todos os cursos: a diminuição da largura média do canal fluvial (Figura 146).

Figura 146 – Principais interferências antrópicas e alterações morfológicas observadas na morfologia de vista em planta dos quatro cursos fluviais do RPS.



Legenda: $\% \Delta \bar{W}$ – percentual de variação da largura média (Equação 9); D – declividade do curso fluvial.

Fonte: Elaborado pela autora, 2019 e ilustrado digitalmente por MARINI, 2017c.

O estreitamento do canal fluvial é uma tendência relatada em vários estudos de morfologia de sistemas fluviais regularizados ao redor do mundo (CLERICI et al., 2015; SCORPIO et al., 2015). Um trecho regularizado do antigo Reno, entre a França e Alemanha, por exemplo, sofreu, em um período de 40 anos, redução de 26% na largura média do canal (ARNAUD e al., 2015); o rio Platte (Nebraska, EUA), teve a largura média de seu canal reduzida em 80-90% no período de um século (WILLIAMS, 1978); já a porção inferior do rio Drac, na França, sofreu uma redução drástica de 70% na área de seu canal graças à remoção

dos picos de vazão, subsequente à regularização realizada pela barragem ali instalada (PEIRY; NOUGUIER, 1994).

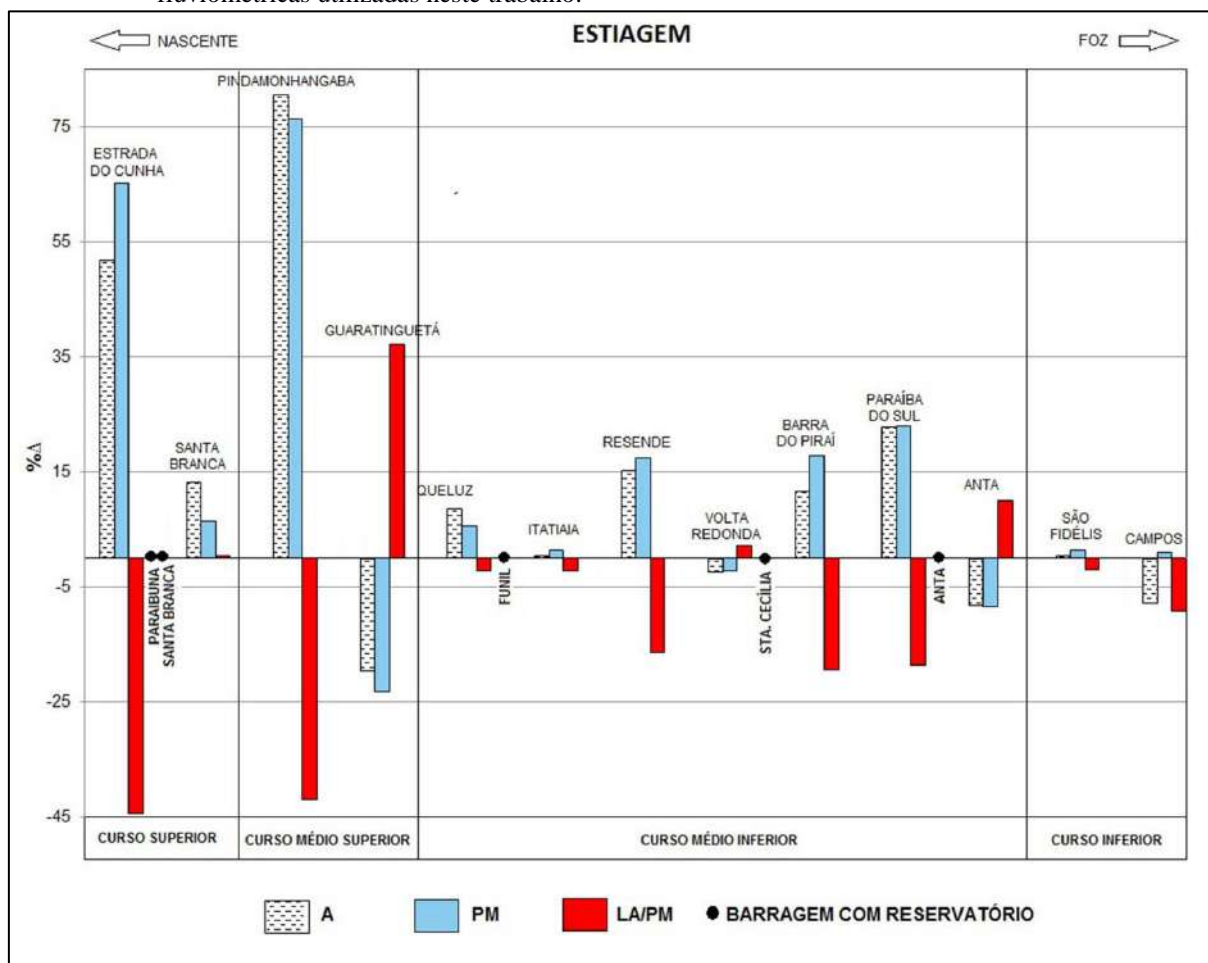
No RPS, a diminuição da largura média foi observada tanto imediatamente a jusante das barragens com reservatório como em porções relativamente distantes desses empreendimentos (Figura 146), também submetidas à diminuição da disponibilidade hídrica ao longo das décadas. O contrário – aumento da largura média do canal fluvial – não foi um parâmetro dominante em nenhum curso, mas ocorreu de maneira sistemática nas porções imediatamente a montante das barragens com grandes reservatórios (Figura 146), mostrando claramente a influência do acúmulo de água desses empreendimentos sobre a morfologia do canal.

4.5.3 Análise da morfologia transversal

Como a maioria das estações fluviométricas não possui dados para geração de perfis transversais anteriores à data de instalação das barragens com reservatório, não foi possível fazer uma análise do impacto direto dessas obras sobre a morfologia transversal do canal do RPS. A partir dos perfis transversais das épocas da estiagem e da cheia das treze estações utilizadas neste trabalho, foram calculados os parâmetros que, segundo Su et al. (2015), indiretamente permitem avaliar o impacto que a regularização de barragens exerce sobre o canal fluvial: área da seção transversal (A), profundidade média da água (PM) e a razão LA/PM , na qual LA corresponde à largura da água. Em canais fluviais onde não há controle de vazão, esses parâmetros normalmente variam bastante, enquanto naqueles regularizados, a taxa de variação dos mesmos é relativamente menor.

O percentual de variação ($\% \Delta$) desses parâmetros foi mais expressivo – em ambas as épocas do ano – nas estações Estrada do Cunha, Pindamonhangaba e Guaratinguetá (Figuras 147 e 148). A estação Estrada do Cunha (estação 1, Figura 23), localizada a montante das barragens do RPS, não sofre os efeitos da regularização da vazão proveniente das operações hidráulicas das barragens de Paraibuna e Santa Branca, a mais de 80 km rio abaixo. Seus parâmetros mostraram – tanto na estiagem como na cheia – grande $\% \Delta$ relativamente às estações dos cursos médio inferior e inferior, a jusante de barragens e, portanto, onde o fluxo é regularizado (Figuras 147 e 148).

Figura 147 – Percentual de variação dos parâmetros de Su et al. (2015) para a época da estiagem das estações fluviométricas utilizadas neste trabalho.

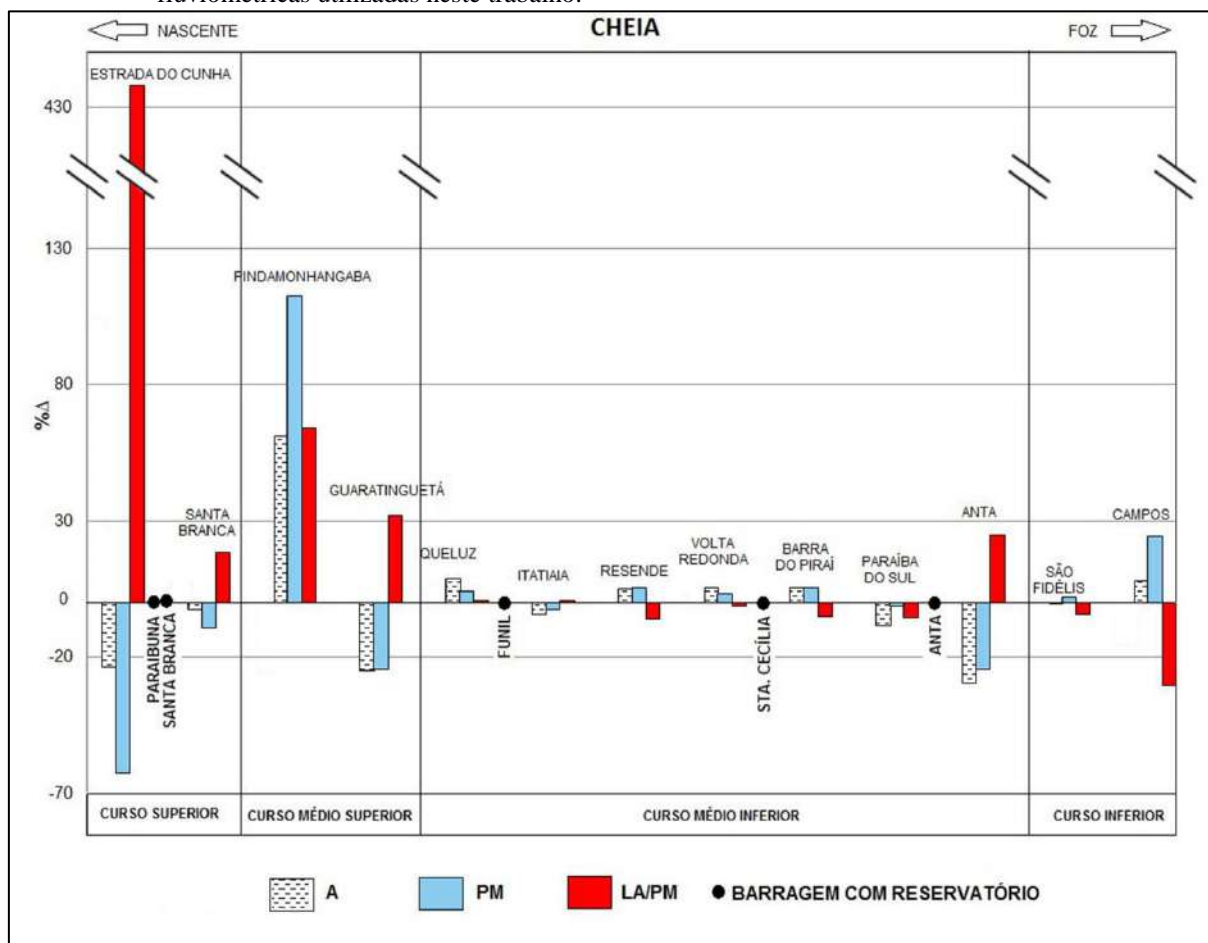


Legenda: %Δ - Percentual de variação; A – Área da seção transversal; PM – Profundidade média da água; LA/PM – Razão entre a largura da água e a profundidade média.

Fonte: A autora, 2019.

As estações Pindamonhangaba e Guaratinguetá (estações 3 e 4, respectivamente, Figura 23), apesar de localizadas após os grandes reservatórios de Paraibuna e Santa Branca, estão situadas nas planícies aluviais do curso médio superior, onde o consumo de grandes volumes de água nas atividades mineradoras e agrícolas altera os parâmetros hidrológicos ao longo do ano, mascarando os efeitos da regularização de vazão operada a montante. Assim, em ambas as estações, o %Δ de A, PM e LA/PM foram significativos nas duas épocas do ano (Figuras 147 e 148).

Figura 148 – Percentual de variação dos parâmetros de Su et al. (2015) para a época da cheia das estações fluviométricas utilizadas neste trabalho.



Legenda: %Δ - Percentual de variação; A – Área da seção transversal; PM – Profundidade média da água; LA/PM – Razão entre a largura da água e a profundidade média.

OBS.: No eixo vertical foi introduzida uma quebra na escala para que o parâmetro LA/PM da estação Estrada do Cunha pudesse ser representado junto aos demais, cujos valores (bem menores) não teriam representatividade visual caso tivessem sido representados na mesma escala.

Fonte: A autora, 2019.

Os parâmetros calculados dos perfis transversais das estações fluviométricas em que a regularização de vazão pelas barragens é o principal processo atuante sobre o fluxo fluvial exibiram variabilidade relativamente menor que aqueles da estação onde o fluxo não é regularizado (Estrada do Cunha) e que aqueles das estações onde o fluxo regularizado sofre impactos de outras atividades consumidoras de água (Pindamonhangaba e Guaratinguetá). Segundo Su et al., (2015), a regularização do fluxo, ao inibir a variabilidade desses parâmetros, afeta a dinâmica natural do canal e, conseqüentemente, sua morfologia transversal. Os resultados deste trabalho mostraram também, que outras atividades antrópicas (extração de areia e rizicultura irrigada) presentes no canal do RPS podem também alterar o comportamento desses parâmetros, uma vez que aumentaram sua variabilidade em um trecho do canal onde o fluxo é regularizado e grandes oscilações não eram esperadas.

4.5.4 Análise da morfologia longitudinal

O grau de equilíbrio de cada curso fluvial do RPS foi avaliado por meio do cálculo da razão $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$ (Tabela 18) a partir de seus perfis longitudinais de 1950/60 e 2000 (elaborados a partir de cartas topográficas e do DEM do SRTM, respectivamente).

Tabela 18 - Parâmetros calculados a partir dos perfis longitudinais de 1950/60 e 2000 dos cursos fluviais do RPS.

Curso	1950/60s			2000			%
	RDE_{trecho}	RDE_{total}	$RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$	RDE_{total}	RDE_{total}	$RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$	
Superior	1243	262	4,74	1261	262	4,81	1,4
Médio Superior	151	262	0,57	144	262	0,54	-5,2
Médio Inferior	1005	262	3,83	1015	262	3,87	1,0
Inferior	347	262	1,32	347	262	1,32	0

Legenda: RDE_{trecho} – Razão Declividade x Extensão por trecho (Equação 15); RDE_{total} – Razão Declividade X Extensão total do rio (Equação 16); % - percentual de variação da razão entre a razão $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$ de 1950/60 a 2000.

Fonte: A autora, 2019.

Valores de $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$ abaixo de 2 (que indicam trechos fluviais em equilíbrio ou ajustados) foram obtidos nos cursos médio superior e inferior (Figuras 81 e 141, respectivamente e Tabela 18), em ambas as datas (1950/60 e 2000). Nesses cursos não há barragens e, de 1950/60 a 2000, a razão $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$ mostrou ligeira diminuição (~ 5%) no curso médio superior e não se alterou no curso inferior (Tabela 18). O contrário, valores de $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$ acima de 2 (indicativos de perfis em desequilíbrio), foram obtidos nos cursos superior e médio inferior (Figuras 54 e 118, respectivamente, e Tabela 18). Em ambos os cursos, a razão $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$ aumentou um pouco de 1950/60 a 2000 (Tabela 18).

Um fato que diferencia os perfis longitudinais dos cursos superior e médio inferior de 1950/60 daqueles de 2000, é a presença, somente nos perfis mais recentes, de duas barragens com grandes reservatórios (Paraibuna, no curso superior, e Funil, no médio inferior). Os perfis longitudinais desses cursos não evoluíram para uma silhueta mais suave com o tempo, mas apresentaram aumento de quebras ou degraus, com a introdução de *knickpoints* artificiais onde as barragens foram instaladas (Figuras 54 e 118). Em ambos os cursos, a razão $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$ aumentou ligeiramente de 1950/60 a 2000 (Tabela 18).

Foram selecionados dois trechos nos perfis longitudinais dos cursos superior e médio inferior, no entorno do local onde foram instaladas as barragens de Paraibuna e Funil, respectivamente, para que a razão RDE_{trecho}/RDE_{total} pudesse ser calculada tanto a partir do perfil de 1950/60 (antes da instalação dessas obras) como do perfil de 2000 (após a instalação das mesmas), a fim de verificar se esse parâmetro sofreu alterações após a construção das barragens. Esses trechos (de 90 km de extensão e identificados como Perfis Auxiliares nas Figuras 54 e 118) abrangem toda a área dos reservatórios das barragens de Paraibuna e Funil, e um trecho de extensão semelhante a jusante dos mesmos. No curso superior, com a instalação da barragem Paraibuna, a razão RDE_{trecho}/RDE_{total} variou de 0,82 a 1,52 (aumento de ~ 85%), e no curso médio inferior, com a instalação de Funil, a razão aumentou de 1,86 a 2,13 (~ 15%), indicando a tendência de mudança de um perfil equilibrado para um perfil desajustado em ambas as situações (Tabela 19).

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.

Curso Superior	RDE_{trecho}	RDE_{total}	RDE_{trecho}/RDE_{total}	%
Pré-Paraibuna	216	262	0,82	85,4
Pós-Paraibuna	397	262	1,52	
Curso Médio Inferior	RDE_{trecho}	RDE_{total}	RDE_{trecho}/RDE_{total}	%
Pré-Funil	487	262	1,86	14,5
Pós-Funil	559	262	2,13	

Legenda: RDE_{trecho} – Razão Declividade x Extensão por trecho (Equação 15);
 RDE_{total} – Razão Declividade X Extensão total do rio (Equação 16);
 % - percentual de variação da razão entre a razão RDE_{trecho}/RDE_{total} de 1950/60 a 2000.

Fonte: A autora, 2019.

De acordo com Williams and Wolman (1984), em rios com barragens, as seções do canal fluvial em que ocorrem as maiores taxas de degradação são aquelas próximas a essas estruturas, diminuindo progressivamente à medida que a distância das mesmas aumenta. Segundo esses autores, os níveis de degradação a jusante de barragens se distribuem irregularmente e, por essa razão, a evolução para um perfil longitudinal suave é rara nos trechos fluviais onde existem essas estruturas.

O cálculo da razão RDE_{trecho}/RDE_{total} anterior e posterior à instalação das barragens Paraibuna e Funil foi importante para investigar a relação dessas obras com o aumento do desequilíbrio do perfil longitudinal. Ao criarem *knickpoints* artificiais nos cursos superior e médio inferior do RPS, elas aumentaram a razão RDE_{trecho}/RDE_{total} e, com isso, a tendência para um perfil desequilibrado, dificultando o desenvolvimento para uma silhueta mais suave.