

5 ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO DA PORÇÃO FINAL DO CANAL E DA PLUMA COSTEIRA DO RIO PARAÍBA DO SUL NO PERÍODO DA ESTIAGEM

A partir da década de 1970, com o advento tecnológico dos satélites voltados para o levantamento dos recursos terrestres, tornou-se mais acessível o monitoramento de fenômenos naturais e de interferências antrópicas na paisagem graças à repetitividade dos satélites e ao baixo custo das imagens orbitais em comparação a outros insumos, como fotografias aéreas.

Quanto às intervenções hidráulicas no Rio Paraíba do Sul (RPS), a maioria de suas barragens com reservatório foi construída anteriormente ao advento dos satélites (Quadro 2), com exceção da barragem de Anta (a mais próxima da foz), cujo reservatório foi alagado em 2013. Assim, a existência de séries históricas de imagens orbitais anteriores e posteriores à instalação dessa barragem permite a investigação de mudanças tanto nas características do canal fluvial como nos aspectos relacionados à cor da água do canal e de sua pluma costeira.

Em complementação às pesquisas para avaliar os impactos das barragens sobre os parâmetros hidrológicos e morfológicos do canal do RPS, foi desenvolvido, ao longo dos dois últimos anos deste trabalho de doutorado, um estudo de caso para estimar a concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) da porção final do canal do RPS e de sua pluma costeira com o intuito de avaliar se a barragem de Anta vem impactando esse parâmetro desde que seu reservatório foi alagado.

5.1 Objetivos

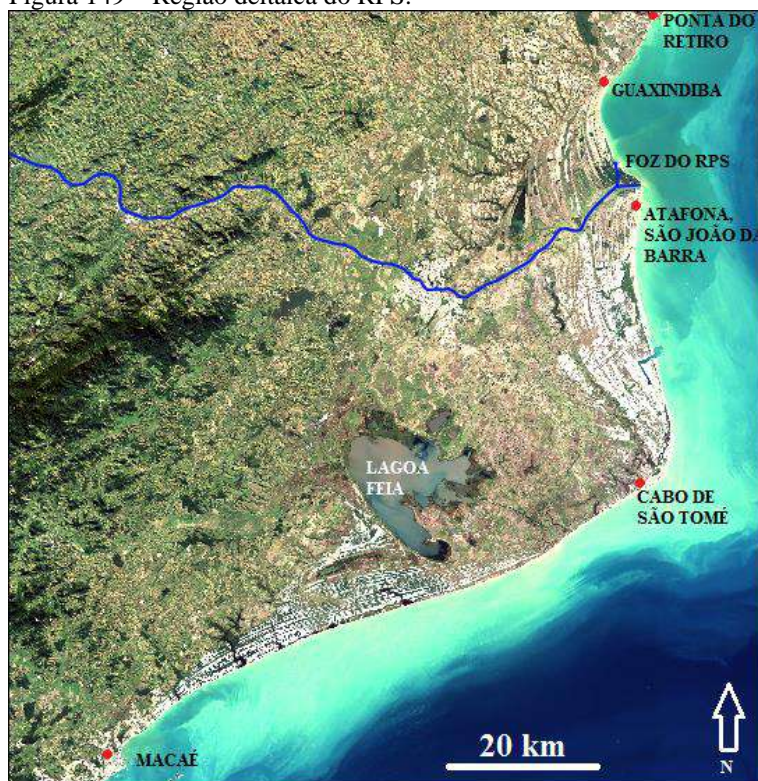
O objetivo do estudo de caso foi estimar quantitativamente, por meio de técnicas de sensoriamento remoto da cor da água, a concentração de MPS da porção final do canal e da pluma sedimentar na foz do RPS em anos anteriores e posteriores à instalação da barragem de Anta, de modo a verificar se esta obra afetou a quantidade de MPS que chega ao Atlântico. Este empreendimento foi construído a cerca de 200 km a montante da desembocadura, sendo a barragem com reservatório mais próxima da foz do RPS (Figura 20).

5.2 Área de estudo

A região deltaica do RPS situa-se na porção emersa da Bacia de Campos, estendendo-se no litoral fluminense desde a localidade de Guaxindiba, no município de São Francisco de Itabapoana até o município de Macaé (Figura 149). Sua foz se localiza entre os municípios fluminenses São Francisco de Itabapoana, ao norte, e São João da Barra, ao sul (Figura 4). Na planície deltaica do RPS são reconhecidos dois tipos de depósitos: sedimentos terciários da Formação Barreiras, nas proximidades do limite entre os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo; sedimentos quaternários depositados na porção compreendida entre o município fluminense de Campos dos Goytacazes e o Cabo de São Tomé, na denominada Baixada Campista.

Segundo Silva (1987), a ação conjunta do condicionamento estrutural, do aporte sedimentar, da energia exercida pelas forçantes oceanográficas e das variações do nível do mar resultou no padrão morfosedimentar e estratigráfico do complexo deltaico do RPS: progradante entre a localidade de Guaxindiba e o Cabo de São Tomé, e retrogradante ao norte de Guaxindiba e ao sul do Cabo de São Tomé (Figura 150).

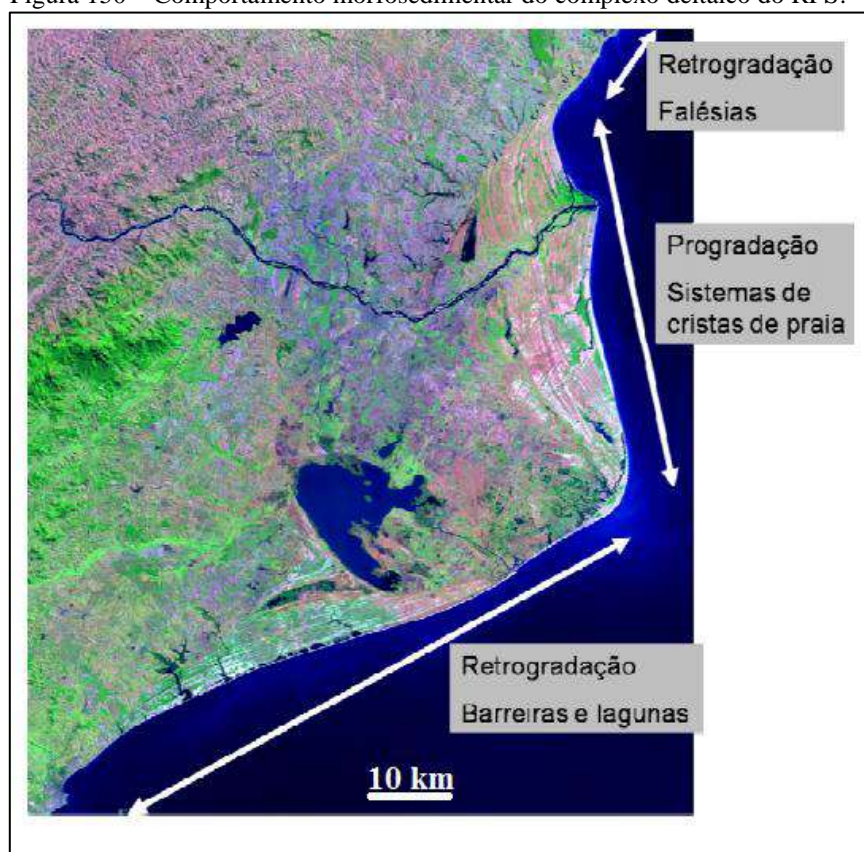
Figura 149 – Região deltaica do RPS.



Legenda: O canal fluvial principal do RPS foi traçado em azul.

Fonte: Imagem Landsat 8 de 16-06-2016 de USGS, 2018.

Figura 150 – Comportamento morfosedimentar do complexo deltaico do RPS.

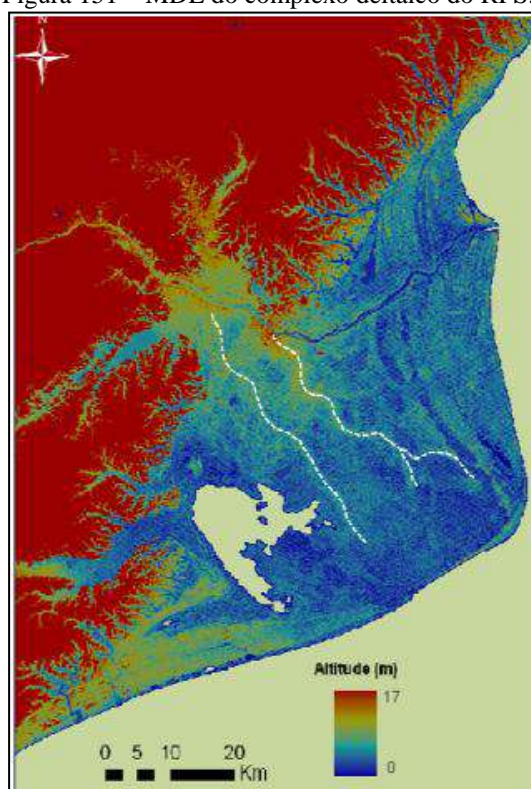


Fonte: Adaptado de SILVA, 1987.

Na região deltaica do RPS há evidências morfológicas e estratigráficas de fases progradantes e retrogradantes associadas ao abandono e retrabalhamento de antigas frentes deltaicas (SILVA, 1987). Ao longo do Quaternário, variações do nível do mar exerceram papel fundamental no desenvolvimento de planícies costeiras, tendo ocorrido, no litoral leste brasileiro, três episódios transgressivos nesse período: transgressão mais antiga, penúltima transgressão e última transgressão (MARTIN et al. 1980).

A evolução e a geomorfologia do complexo deltaico vêm sendo estudadas por Lamego e outros autores desde a década de 1940 (SILVA, 1987). Os estudos reconhecem que, ao longo de suas fases evolutivas, o delta do RPS ocupou diferentes posições. Assim, a direção principal de desenvolvimento dos depósitos fluviais situa-se ao longo do eixo entre Campos dos Goytacazes e o Cabo de São Tomé (SILVA, 1987). A presença de paleocanais, visíveis em modelos digitais de elevação, evidencia a migração da antiga posição do canal fluvial da direção sudeste para a atual posição, a nordeste (Figura 151).

Figura 151 – MDE do complexo deltaico do RPS.



Legenda: MDE – modelo digital de elevação; as linhas tracejadas na cor branca representam as paleoposições do canal do RPS, na direção do Cabo de São Tomé.

Fonte: SILVA, 1987.

A porção mais setentrional do complexo deltaico do RPS é caracterizada pela presença de falésias esculpidas nos depósitos da Formação Barreiras, algumas ainda ativas (Figura 152). Ao atingir o flanco norte da planície do Paraíba do Sul, cristas de praia passam a preceder as falésias. Essas cristas predominam em ambos os lados da desembocadura do RPS e são facilmente identificadas como feições lineares nas imagens de satélite, evidenciando a evolução de paleopraias (Figuras 149 e 150). As cristas de praia do flanco norte são sequências de idade holocênica e estão associadas à atual desembocadura do rio; as do flanco sul – pleistocênicas – se estendem até Macaé, e são precedidas por um estreito cordão litorâneo holocênico (MUEHE, 2006). Um conjunto de pequenas lagunas se localiza na retaguarda desse cordão litorâneo atual, cuja migração em direção à planície pleistocênica gera o truncamento das margens lagunares em contato com o reverso desse cordão (DIAS; SILVA, 1984). A porção ao norte da desembocadura fluvial foi submetida a períodos alternados de crescimento de cristas de praia e formação de

lagunas, enquanto na porção sul predominou a alternância de recuos e avanços da linha de costa, evidenciados através do truncamento das cristas de praia (SILVA, 1987).

Figura 152 – Falésia ativa da Formação Barreiras nas proximidades do farol da Ponta do Retiro, no município de São Francisco de Itabapoana (RJ).



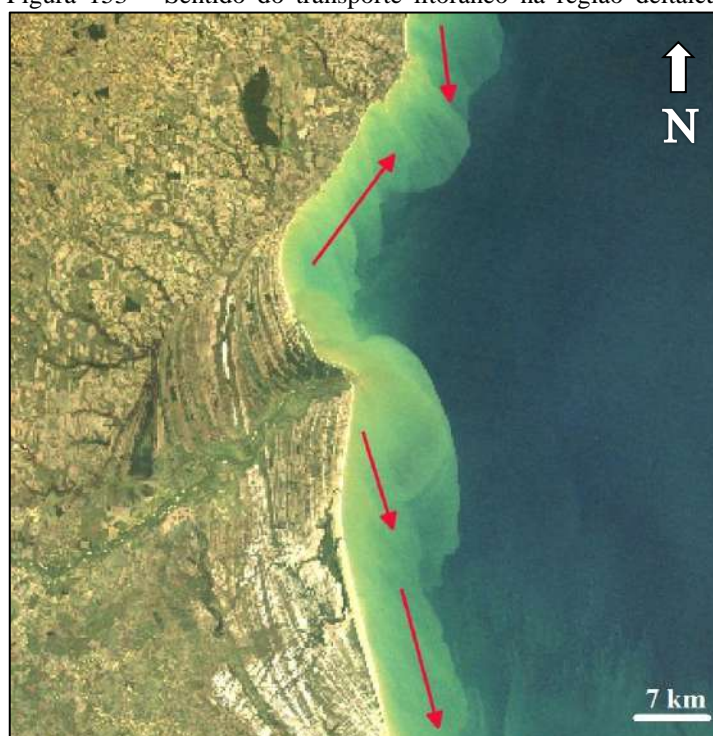
OBS.: A localização do farol foi alterada algumas vezes em função da erosão marinha intensa e consequente recuo da linha de costa.

Fonte: A autora, 2016 (fotografia tirada durante trabalho de campo).

Quanto à dinâmica dos processos costeiros, a região deltaica caracteriza-se por ser dominada por ondas que são, em sua maioria, formadas por ventos locais, predominantes dos quadrantes NE e E, e, com menor frequência, por ondas geradas por ventos de SE e SO, decorrentes de frentes frias (BASTOS; SILVA, 2000).

Segundo Cassar e Neves (1993), apesar da predominância de ondas de NE – que produzem no hemisfério sul correntes litorâneas no sentido S – o sentido do transporte litorâneo na porção superior à foz do RPS é voltado para o norte, enquanto na porção inferior da desembocadura, a deriva litorânea predominante flui no sentido esperado, transportando os sedimentos para o sul (Figura 153).

Figura 153 – Sentido do transporte litorâneo na região deltaica.



Legenda: As setas vermelhas indicam o sentido das correntes litorâneas.

Fonte: Composição colorida RGS/Landsat5-TM de 03/09/2004 de USGS, 2018.

A mudança no padrão esperado da deriva litorânea ao norte da foz do RPS – e, conseqüentemente, do transporte sedimentar – é provavelmente controlada pelos seguintes mecanismos: a configuração assimétrica da desembocadura do rio (cujo canal principal se bifurca em duas partes); a ocorrência, na foz, de mudanças geomorfológicas consideráveis relacionadas com a formação, migração e desaparecimento de barreiras/pontais arenosos decorrentes de eventos deposicionais e erosionais associados à variação anual da descarga fluvial e à influência das forçantes oceanográficas; e a própria batimetria da desembocadura, que em função da presença de depósitos arenosos submersos, ocasiona mudanças na frequência relativa da direção das ondas incidentes, provocando a inversão da direção residual do transporte longitudinal (Figura 154).

A pluma sedimentar na foz do RPS (Figura 153) se desenvolve no sentido N-S, mas alcança significativa expressão *offshore*, tendo a extensão máxima de sua frente de sedimentos na direção SE, podendo atingir quase 30 km de distância do ponto central de sua foz (ESCH; NETO, 2013).

Figura 154 – Presença de bancos arenosos no entorno da desembocadura do RPS.



Legenda: As setas amarelas indicam onde ocorre a quebra das ondas.

Fonte: Imagem de 16-02-2015 da série histórica do *Google Earth*, GOOGLE INC., 2017.

5.3 Fundamentação teórica

Em águas costeiras, a origem do MPS das plumas sedimentares está relacionada à descarga fluvial e à ressuspensão ou erosão do fundo (MILLER; McKEE, 2004). A concentração e a distribuição do MPS são espacial e temporalmente dinâmicas e estão sujeitas à ação das forçantes atmosféricas, astronômicas e oceanográficas (OLIVEIRA, 2009).

O monitoramento das plumas sedimentares costeiras permite a identificação de padrões de dispersão e exportação de material carregado pelo fluxo fluvial até o oceano; o estudo desse material – cujas variáveis biogeoquímicas caracterizam as oscilações e o estado de equilíbrio de sistemas fluviais e costeiros – é de grande importância para subsidiar projetos de preservação, recuperação e gestão das áreas costeiras (OLIVEIRA, 2009).

Graças à repetitividade, à evolução espectral e espacial dos sensores orbitais ópticos e à visão sinóptica que os satélites oferecem da área analisada – somados ao baixo custo de aquisição das cenas – a investigação da dinâmica de plumas sedimentares costeiras tornou-se mais acessível nos últimos anos. Foi por meio dessa tecnologia que o estudo de caso para avaliar a concentração de MPS da porção final do canal do RPS e de sua pluma sedimentar costeira foi realizado.

A seguir, serão descritos os principais processos dinâmicos das plumas sedimentares costeiras e uma breve exposição sobre os conceitos do sensoriamento remoto da cor da água, com ênfase, principalmente, no comportamento espectral das águas costeiras, que servirão de embasamento teórico para justificar os insumos e as metodologias adotadas neste estudo.

5.3.1 A pluma sedimentar costeira e seus processos dinâmicos

As plumas sedimentares costeiras – também chamadas plumas de turbidez – se desenvolvem a partir da foz dos rios sobre a plataforma continental. Sua extensão, forma e dinâmica são determinados pela interação entre vários fatores: intensidade e frequência do aporte fluvial, variabilidade de ventos, marés, ondas, batimetria, correntes litorâneas e oceânicas e ao transporte de Ekman, gerado pela força de Coriolis associada ao cisalhamento dos ventos (WRIGHT, 1977).

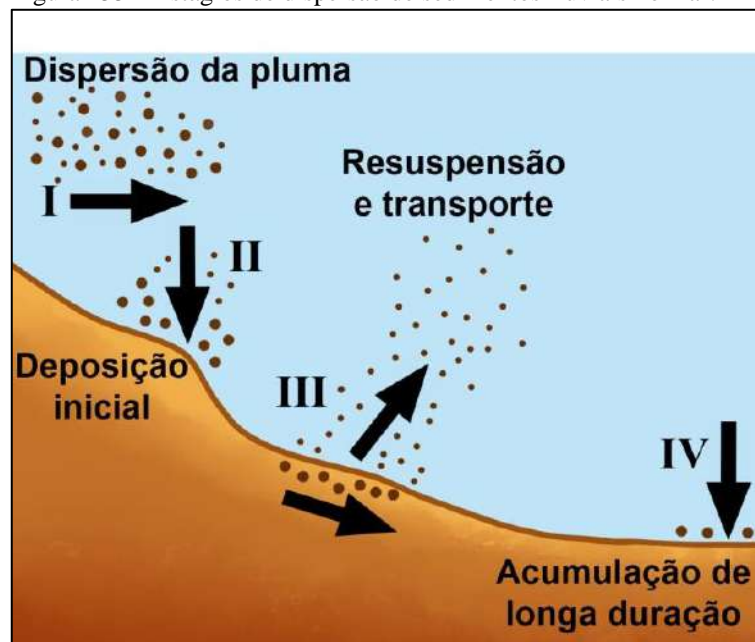
Segundo Wright e Nittrouer (1995), o transporte do MPS nas plumas acontece em quatro estágios (Figura 155):

- a) processos de dispersão da pluma (Estágio I) ocorre logo que o fluxo fluvial deixa o canal e, ainda flutuando sobre a água do mar, se espalha ao longo da costa e em direção *offshore*; nesse estágio, a pluma sofre advecção e mistura por meio de processos físico-oceanográficos. Sua flutuabilidade é uma das principais forçantes que determinam a distância máxima da foz do rio que o MPS poderá atingir antes que a deposição inicial se inicie. A maioria das plumas fluviais possui flutuabilidade positiva, uma vez que a concentração de MPS das mesmas raramente é grande o bastante para superar a diferença de densidade ocasionada pelo gradiente de salinidade entre as águas fluvial e marinha;
- b) deposição inicial (Estágio II) – como o próprio nome sugere, compreende a fase inicial de deposição de sedimentos no fundo e está relacionada ao processo seletivo em função da velocidade de deposição das partículas. Sedimentos arenosos se depositam mais rapidamente; já os sedimentos finos (silte e argila), embora possuam pequeno tamanho, apresentam grande área superficial, o que facilita os processos de adsorção, agregação e floculação, contribuindo para aumentar a velocidade de deposição dessas partículas

próximo à foz. De modo geral, o padrão de distribuição dos sedimentos deltaicos normalmente indica granodecrescência da foz em direção à plataforma. A deposição mais rápida ocorre imediatamente após a desembocadura de rios com canais pouco profundos que transportam sedimentos arenosos, onde a taxa de deposição inicial após o fluxo fluvial entrar no ambiente costeiro depende em grande parte dos processos de dispersão e da desaceleração do fluxo fluvial causada pela fricção no fundo; isso, porém, não é muito comum em grandes rios;

- c) resuspensão e transporte (Estágio III) – a combinação de turbulência causada pela ação de ondas, correntes litorâneas e correntes de maré provoca, no fundo, grande cisalhamento, que leva à resuspensão de sedimentos depositados em regiões mais afastadas da desembocadura dos rios. Esse processo é bastante evidente quando há bancos arenosos situados próximo à foz. Nesse estágio, os sedimentos podem ser redistribuídos ao longo da costa, normalmente suavizando a topografia submarina e a própria linha de costa. Quando as condições energéticas da região da plataforma continental interna permanecem intensas ao longo de todo o ano ou quando elas coincidem com os períodos de máxima descarga fluvial (cheias fluviais), o Estágio III pode acontecer simultaneamente ao Estágio II;
- d) acumulação de longa duração (Estágio IV) – os estágios III e IV são conectados pela camada superficial de mistura, que é a região do assoalho oceânico em que as partículas ainda interagem com os processos físicos, biológicos e oceanográficos. Ali, ondas e correntes atuam causando erosão, transporte e redeposição de partículas; processos de bioturbação e retrabalhamento pela ação de organismos também são frequentes na camada superficial de mistura. O que determinará a taxa de acumulação de sedimentos com o tempo será o balanço entre os processos erosivos e deposicionais. Normalmente, a espessura da camada superficial de mistura é de 10 cm, podendo se estender até 1 m quando ocorrem processos físicos mais intensos ou devido à presença de organismos que habitam camadas mais profundas. Por fim, o assoalho marinho representaria o processo deposicional de longa duração (escala temporal de 10^3 anos) do material originalmente em suspensão na pluma costeira (WRIGHT; NITTROUER, 1995).

Figura 155 – Estágios de dispersão de sedimentos fluviais no mar.



Fonte: Adaptado de WRIGHT; NITTROUER, 1995.

5.3.2 Sensoriamento remoto da cor da água

O desenvolvimento de sensores multiespectrais voltados para o estudo da cor da água possibilitou o estudo de plumas sedimentares como parâmetro para avaliação da dinâmica de sólidos em suspensão no canal e na foz de vários rios, inclusive no delta do RPS (TEODORO; VELOSO-GOMES, 2007; ESCH; SARTORI NETO, 2013; VALÉRIO; KAMPEL, 2013).

A água (doce ou salina) representa uma mistura de substâncias dissolvidas ou particuladas que possuem propriedades ópticas diversas, interagindo com a luz de maneira diferente graças à sua concentração e natureza. Na coluna d'água, essas substâncias são as responsáveis pela modificação de sua cor, pois absorvem e espalham a radiação incidente sobre elas de diferentes maneiras. Isso torna a cor da água uma fonte de informações sobre algumas propriedades químicas, físicas e biológicas de lagos, rios e oceanos (KAMPEL; NOVO, 2009). Entretanto, é importante distinguir as substâncias que podem estar presentes na água e compreender como as mesmas contribuem com o processo de absorção e dispersão da radiação eletromagnética sobre elas incidente antes de utilizar o sensoriamento da cor da água para investigação de algum fenômeno das regiões costeiras e oceânicas.

Morel e Prieur (1977) classificaram as águas dos oceanos em dois tipos: águas do Caso 1 e águas do Caso 2. As primeiras geralmente se referem às águas do oceano aberto, onde predominam as concentrações de fitoplâncton e de material orgânico dissolvido (MOD, também conhecido como substâncias amarelas); as águas do Caso 2, normalmente costeiras, além do fitoplâncton e do MOD, são caracterizadas principalmente pela presença de substâncias inorgânicas (denominadas neste trabalho de Material Particulado em Suspensão ou MPS).

A radiação emergente dos dois tipos de água é bastante distinta e, por meio do sensoriamento remoto da cor da água, é possível analisar as variações na magnitude e qualidade espectral dessas radiações para derivar informações quantitativas sobre o tipo de substâncias presentes na água e suas concentrações (KAMPEL; NOVO, 2009).

O sensoriamento remoto da cor da água envolve o uso de sensores passivos com visada estreita capazes de monitorar o fluxo radiométrico que chega aos detectores em diferentes comprimentos de onda (λ) nas faixas do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. A cor intrínseca de um corpo d'água é definida pelas variações espectrais de sua reflectância (R) na superfície (KAMPEL; NOVO, 2009). Em qualquer profundidade (z), R é definida como:

$$R(\lambda, z) = E_u(\lambda, z)/E_d(\lambda, z) \quad (17)$$

onde:

$E_u(\lambda, z)$ – é a irradiância ascendente (fluxo por unidade de área superficial), no comprimento de onda λ e profundidade z .

$E_d(\lambda, z)$ – é a irradiância descendente (fluxo por unidade de área superficial), no comprimento de onda λ e profundidade z .

E_u é a medida de toda luz que deixa um corpo d'água, mas os sensores remotos com campos de visada limitados não conseguem detectar todo o sinal que deixa a superfície da água, o que restringe o sinal captado a uma pequena fração do original. Dessa forma, uma descrição do campo luminoso estaria incompleta se não incluísse nenhuma informação de como os fluxos variam em função das direções. A radiância (L) fornece essa descrição, uma vez que mede o fluxo eletromagnético por unidade de área e por unidade de ângulo sólido.

Sendo $L(\lambda, z, \Theta, \phi)$ a radiância na direção definida pelo ângulo zenital e ângulo azimutal, então as várias irradiâncias de interesse podem ser obtidas pela integração de L nos ângulos apropriados. No sensoriamento remoto da cor da água é muito comum o uso da reflectância de sensoriamento remoto (R_{RS}), que é fortemente correlacionada a $R(\lambda, z)$, mas usa a radiância ascendente no lugar de $E_u(\lambda, z)$, e é definida como:

$$R_{RS}(\Theta, \phi, \lambda, 0) = L(\Theta, \phi, \lambda, 0) / E_d(\lambda, 0) \quad (18)$$

onde Θ e ϕ em L indicam que a radiância que deixa o corpo d'água pode variar com o ângulo de visada. A R_{RS} trata da radiância na superfície da água, onde $z=0$ e sua unidade é sr^{-1} .

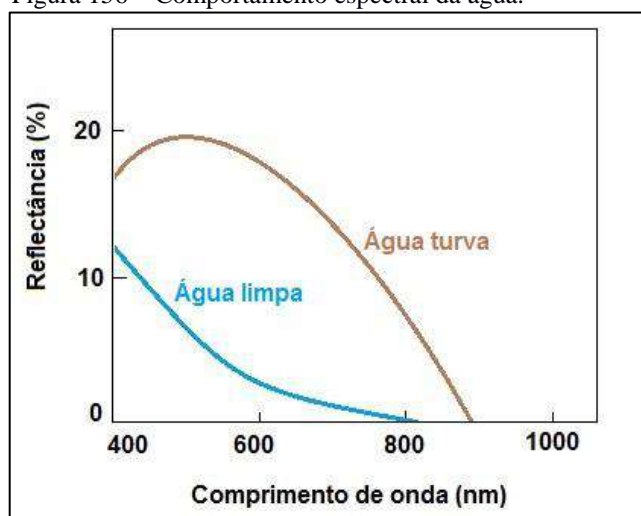
É importante observar que a R_{RS} refere-se ao sinal imediatamente abaixo da superfície da água e não ao que chega aos sensores orbitais, que captam a radiação atenuada graças aos efeitos atmosféricos. Assim, esses efeitos devem ser considerados e corrigidos das imagens de satélite para que a R_{RS} possa ser correlacionada às substâncias opticamente ativas presentes na água.

5.3.3 O comportamento espectral das águas costeiras

Com a descarga de sedimentos nas regiões costeiras, a cor da água torna-se amarelo-amarronzada, podendo atingir o vermelho em algumas circunstâncias. No caso das águas costeiras, a concentração de MPS tem uma contribuição maioritária e decisiva nas propriedades espectrais da água, alterando significativamente sua reflectância (TEODORO; VELOSO-GOMES, 2007). Isso acontece porque o comportamento espectral da água turva é distinto do da água pura graças à interação entre a radiação eletromagnética e o MPS presente na água, que provoca, sobretudo, o retroespalhamento da luz incidente (Figura 156).

Como resultado, altos valores de reflectância são detectados pelos sensores ópticos na região do espectro visível em torno de 550 nm, deslocando-se para valores maiores conforme a concentração de MPS aumenta, o que torna a porção da faixa visível do espectro eletromagnético correspondente ao vermelho a mais adequada para estudos da quantificação de sedimentos das plumas costeiras (GOULD; ARNONE, 2003). De fato, o uso de sensoriamento remoto para mapear a concentração de MPS vem se tornando frequente em diferentes tipos de águas, e normalmente a reflectância da porção correspondente ao vermelho do espectro eletromagnético visível (entre 600-700 nm, aproximadamente) é a selecionada para a correlação com os parâmetros dos sedimentos da coluna d'água (MILLER; McKEE, 2004).

Figura 156 – Comportamento espectral da água.



Fonte: Adaptado de FLORENZANO, 2002.

É possível desenvolver modelos matemáticos para estimar a concentração de MPS das águas costeiras a partir da reflectância ou radiância de imagens orbitais. Esses modelos variam de meramente empíricos até os mais sofisticados, como os de transferência radioativa (OLIVEIRA, 2009). Segundo Teodoro e Veloso-Gomes (2007), independente do modelo gerado, os diferentes estudos existentes mostram que é impossível gerar um único algoritmo para estimar a concentração de MPS com validade global devido à influência, na reflectância, das características regionais, que dependem não somente das propriedades ópticas do local, mas também das características dos sedimentos. Assim, o ideal seria a elaboração de algoritmos distintos para cada região a ser estudada e para cada época do ano, caso a região esteja sujeita a algum tipo de sazonalidade. A escolha do tipo de modelo a ser desenvolvido dependerá das informações disponíveis para sua implementação.

5.4 Material e métodos

Para alcançar os objetivos deste estudo de caso foram realizadas amostragens de água superficial na porção final do canal e na pluma sedimentar do RPS para determinação da concentração de MPS e posterior correlação com a reflectância da imagem de satélite da data da coleta. Dessa correlação gerou-se um modelo matemático para que fosse possível estimar a concentração de MPS da porção final do canal e da pluma sedimentar do RPS a partir de

imagens de outras datas, anteriores e posteriores à instalação da barragem de Anta. Com isso, tornou-se possível avaliar a ocorrência de mudanças na concentração de MPS após a instalação dessa obra. Os materiais utilizados e procedimentos adotados estão descritos a seguir.

5.4.1 As imagens ópticas utilizadas

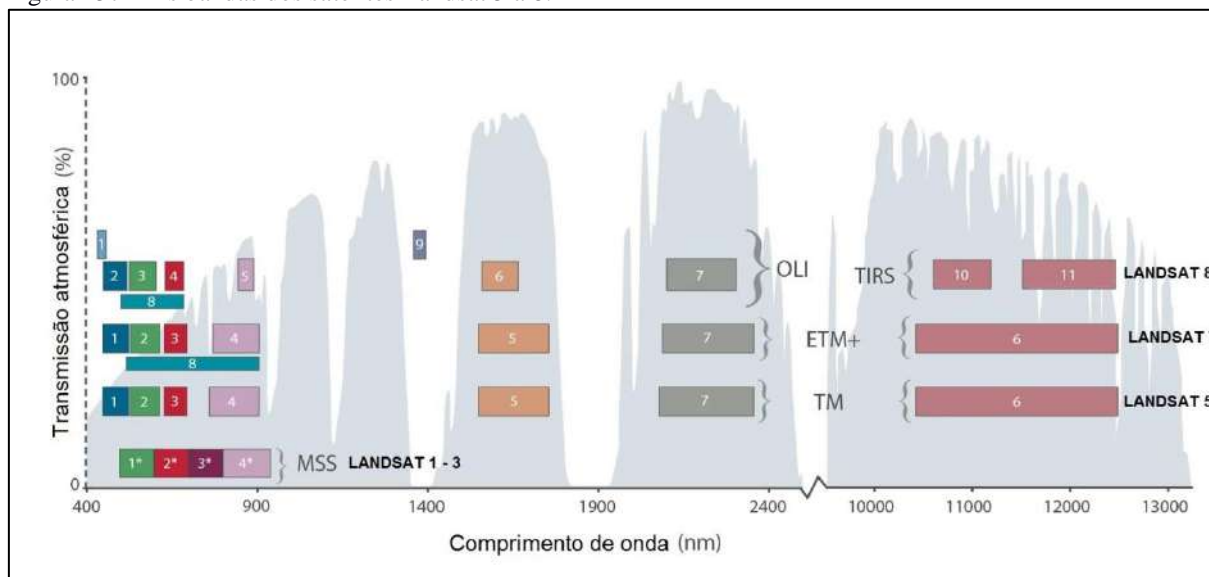
As imagens orbitais são atualmente consideradas importantes ferramentas para estudos quantitativos dos componentes presentes nas águas costeiras, e a escolha do sensor adequado à área a ser investigada vai influenciar na qualidade dos resultados obtidos.

Atualmente, existem vários sensores ópticos adequados para estudos da cor da água que fornecem imagens com diferentes resoluções espectral, espacial, radiométrica e temporal. Dentre eles podem ser citados o *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) dos satélites Terra e Aqua, o *Ocean and Land Color Instrument* (OLCI) dos satélites Sentinel 3A e 3B e o *Ocean Color Monitor* (OCM) do satélite Oceansat-2 (IOCCG, 2018). Embora esses sensores possuam elevada resolução espectral e temporal, a resolução espacial dos mesmos (cujo melhor caso é de 250 m) pode resultar inadequada para estudos das plumas sedimentares de rios de pequeno e médio porte (ZOFFOLI, KAMPEL; FONSECA, 2011). Assim, uma alternativa que vem sendo muito adotada para estudar os parâmetros da cor da água de rios de pequeno e médio porte, reservatórios e plumas costeiras em escalas maiores são os sensores dos satélites da série Landsat (SILVA; NOVO; KRUG, 1996; ZOFFOLI, KAMPEL; FONSECA, 2011; ESCH; NETO, 2013; REIS et al., 2003).

O primeiro satélite da série Landsat foi lançado em 1972, mas somente a partir de 1984, com o aperfeiçoamento do sensor *Thematic Mapper* (TM), no Landsat 5 (com três bandas no visível, uma no infravermelho próximo, duas no médio e uma no termal) suas imagens tornaram-se também adequadas à análise da cor da água, utilizando-se, no caso dos estudos voltados para a quantificação de MPS, principalmente a banda correspondente ao vermelho da faixa do visível do espectro eletromagnético.

Atualmente, dos satélites da série Landsat (Figura 157), além da banda do vermelho (banda 3) do sensor TM do Landsat 5, podem ser utilizadas para esta finalidade as bandas correspondentes ao vermelho dos sensores ETM+ do Landsat 7 (banda 3) e *Operational Land Imager* (OLI) do Landsat 8 (banda 4).

Figura 157 – As bandas dos satélites Landsat 5 a 8.



Fonte: Adaptado de USGS, 2018[a].

O sensor *Multispectral Scanner* (MSS), existente nas plataformas anteriores do Landsat, também possuía uma banda na faixa do visível correspondente ao vermelho (banda 2), mas com largura maior (resultando em resolução espectral inferior à do sensor TM); esse sensor também apresentava resolução espacial mais baixa, de 80 m. Além da largura da faixa espectral da banda correspondente ao vermelho ser menor nos sensores TM, ETM+ e OLI (no que resulta em uma melhor resolução espectral e, conseqüentemente, maior diferenciação de alvos), sua resolução espacial é 30 m (melhor que a do MSS). Com resoluções espectral e espacial adequadas, e com cobertura de 185 x 185 km por cena, os sensores TM, ETM+ e OLI apresentam condições mais adequadas ao estudo quantitativo de MPS da maioria das plumas sedimentares de rios de pequeno e médio porte.

Outro ponto positivo oferecido pelos sensores da série Landsat é a disponibilidade de aquisição gratuita de imagens de seu acervo histórico de mais de três décadas, o que possibilita estudar o comportamento de fenômenos naturais e as interferências antrópicas sobre os mesmos ao longo de vários anos. Além de todas as vantagens apresentadas, como o Landsat 8 ainda encontra-se em órbita atualmente, haveria a possibilidade de programar um levantamento de campo para amostragens de água na foz do RPS (para determinação da concentração de MPS *in situ*) que coincidissem com o momento de sua passagem. E, por meio da correlação entre as informações coletadas em campo com a imagem de satélite do mesmo

dia do levantamento poderia ser desenvolvido um modelo matemático para estimar a concentração de MPS de imagens Landsat de outras datas.

A banda do Landsat 8 selecionada para o desenvolvimento do modelo empírico foi a da faixa espectral correspondente ao vermelho (adequada para estudos da concentração de MPS). Essa faixa corresponde à banda 4 no sensor OLI do Landsat 8 (Figura 157). Após implementado, o modelo seria também aplicado a cenas de outras datas, anteriores ao alagamento do reservatório da barragem de Anta (2013). Para isso, foram selecionadas cenas do sensor TM do Landsat 5 (que datam da década de 1980 a 2011). A faixa espectral correspondente ao vermelho neste sensor é a banda 3 (Figura 157). A diferença entre a largura das bandas dos dois sensores é pequena: na banda 3 (do TM) a largura da faixa espectral vai de 0,630 a 0,680 nm e na banda 4 (do OLI), de 0,630 a 0,690 nm. Porém, as imagens dos dois sensores possuem resoluções radiométricas distintas (8 bits para o TM e 16 bits para o OLI, nas imagens de nível 1), razão pela qual as técnicas de correção atmosférica e radiométrica adotadas (a seguir expostas) foram aplicadas separadamente sobre as imagens de cada um dos sensores, com os parâmetros específicos de cada uma, possibilitando, com isso, a comparabilidade posterior entre os dados de reflectância gerados a partir de cada cena, convertidos para concentração de MPS após a aplicação do modelo matemático.

No ano de 2012, o Landsat 5 já havia sido desativado e o Landsat 8 ainda não havia sido lançado, o que ocorreria em 2013. Naquele ano, estava em órbita o Landsat 7, cujo sensor ETM+ vinha apresentando falhas em seu *scanner* de bordo desde 2003, acarretando a necessidade de correções radiométricas para preencher as lacunas de dados nas imagens geradas. Como a correção desse erro envolveria a utilização de dados advindos de outras cenas de datas diferentes para preencher as partes sem informações, isso alteraria as características da cena original (indo de encontro ao objetivo inicial, que seria a utilização de imagens de uma data específica para estimar quantitativamente o MPS). Em face disso, optou-se pela não utilização das imagens do sensor ETM+, razão pela qual não foram utilizadas imagens de 2012. Na série histórica de 34 anos de imagens TM e OLI, além do ano de 2012, não foram utilizadas imagens dos anos de 1985, 1993, 1999, 2002, 2003, 2009 e 2010 devido à elevada nebulosidade sobre a área de interesse em todas as cenas do período da estiagem daqueles anos.

Além da detecção de nuvens, outro inconveniente das imagens da série Landsat é sua baixa resolução temporal em relação à de outros sensores voltados especificamente para estudos do oceano; enquanto aqueles possuem revisita de 1 a 2 dias (como o MODIS, por exemplo), os sensores da série Landsat possuem intervalo de imageamento de 16 dias, o que

reduz bastante as chances de coincidirem as datas dos levantamentos de campo pretéritos para amostragens de água para determinação de MPS com as datas das imagens de seu acervo e, ainda, que essas imagens possuam pequena ou nenhuma cobertura de nuvens. O intervalo relativamente grande entre as revisitas também dificulta o planejamento de futuros trabalhos de campo para que as amostragens diretas coincidam com a passagem do satélite. Mesmo diante dessa dificuldade, graças às demais vantagens oferecidas pelos sensores dos satélites da série Landsat anteriormente citadas, optou-se pela utilização de suas imagens neste estudo de caso.

5.4.1.1 Os tratamentos aplicados às imagens

Os dados de sensores orbitais são representados em uma matriz de números digitais e encontram-se em um intervalo numérico, números de cinza ou NC. Para as imagens TM/Landsat 5, de 8 bits, os NC variam de 0 a 255; para as imagens OLI/Landsat 8, de 12 bits, variam de 0 a 4095 e, nos produtos nível 1, escalonados para 16 bits, de 0 a 65535.

Os NC são usados apenas por conveniência no processamento dos dados, pois eles não representam quantitativamente valores físicos reais (reflectância, radiância) e a conversão dos mesmos para reflectância ou radiância é sempre desejável quando diferentes sensores são utilizados para análise, quando se quer correlacionar com dados biofísicos ou para geração de mosaicos e séries temporais.

As imagens Landsat usadas neste trabalho foram adquiridas no formato *geotiff*, já corrigidas geometricamente (nível 1). Foram então submetidas à correção radiométrica para transformar os NC em valores de reflectância no topo da atmosfera (ρ_{λ}'). Valores de ρ_{λ}' tendem a reduzir as diferenças entrem os NC obtidos a partir de diferentes ângulos de incidência de iluminação e ajustes nos sensores, uma vez que incorporam informações relativas aos ângulos de elevação e zenital solar (REIS et al., 2003). Para isso, foram utilizados coeficientes de escalonamento informados nos metadados (arquivo MTL), que vêm junto com os arquivos das imagens (USGS, 2018[b]):

$$\rho_{\lambda}' = M_p Q_{cal} + A_p \quad (19)$$

onde:

ρ_{λ}' é a reflectância no topo da atmosfera (sem a correção para o ângulo solar);

M_p é o fator de escalonamento multiplicativo de uma banda específica (metadados);

A_p é o fator de escalonamento aditivo de uma banda específica (metadados);

Q_{cal} são os NC calibrados.

E, para obter-se a reflectância no topo da atmosfera com ângulo solar calibrado (ρ_λ):

$$\rho_\lambda = \rho'_\lambda / \cos(\Theta_{SZ}) \quad \text{ou} \quad \rho_\lambda = \rho'_\lambda / \sin(\Theta_{SE}) \quad (20) \text{ e } (21)$$

onde:

ρ_λ é a reflectância no topo da atmosfera (corrigida do ângulo solar);

Θ_{SZ} é o ângulo zenital solar local;

Θ_{SE} é o ângulo de elevação solar local.

Para a correção atmosférica aplicou-se a técnica *dark spectrum fitting* (Vanhellemont; Ruddick, 2018), baseada em informações de cada cena individualmente, sem necessidade de medidas externas. As interferências atmosféricas são computadas por meio dos alvos escuros das diferentes bandas do Landsat 8. De cada banda, o objeto mais escuro é determinado e a partir dele é construído o espectro escuro (*dark spectrum*), espécie de gabarito usado para eliminar os efeitos atmosféricos dos demais *pixels*. Essa correção utiliza também especificamente a banda do infravermelho médio (*short-wave infrared* ou SWIR) do Landsat para correção dos efeitos atmosféricos resultantes da presença de aerossol sobre a superfície do mar, comum em águas costeiras. Graças à resolução espacial e espectral do Landsat, essa correção atmosférica permite detectar tipos de partículas em águas com elevada turbidez que não são diferenciados quando outras técnicas de correção são utilizadas.

As correções radiométrica e atmosférica foram realizadas individualmente para cada imagem dos sensores TM e OLI por meio do *software* ACOLITE, um processador de imagens Landsat 5 a 8 gratuito desenvolvido pelo *Royal Belgian Institute of Natural Sciences* (RBINS, 2018) que também cria, nas imagens, máscaras sobre nuvens e continente. Após as correções supracitadas, os *pixels* das imagens geradas passaram a conter informações da reflectância espectral da superfície da água (ρ_w), adimensional, que corresponde à R_{RS} , multiplicada por π .

5.4.2 Amostragens de água na pluma sedimentar do RPS

Conhecendo-se a concentração de MPS de um corpo d'água (determinada a partir de amostragens diretas) é possível desenvolver modelos empíricos da cor da água nos quais os valores dos dados obtidos *in situ* são correlacionados com valores de radiância ou reflectância

superficial da água extraídos das imagens de satélite (preferencialmente da mesma data das amostragens). Esses algoritmos permitem estimar valores de concentração de MPS para outras datas. Com o propósito de elaboração de um algoritmo empírico, foram programados trabalhos de campo para coleta de amostras de água superficial na porção final do canal do RPS e também em sua pluma sedimentar que coincidisse com a data de passagem do satélite Landsat 8.

Em função do padrão sazonal das chuvas na bacia, o regime hidrológico do RPS também possui uma dinâmica de variação sazonal (VALÉRIO; KAMPEL, 2013), com vazões menores durante a estação seca (junho a setembro, quando os valores atingem um mínimo de 180 m³/s perto da foz) e vazões maiores durante o período chuvoso (novembro a março, podendo atingir um máximo de 4400 m³/s, também na sua foz). Em função dessa sazonalidade, inicialmente foram planejados dois levantamentos de campo para amostragens para determinação da concentração de MPS no entorno da foz do RPS e em sua pluma: um na estiagem e outro na época da cheia.

Os dois levantamentos foram previamente programados para datas que coincidisse com a passagem local do Landsat 8, no período de 2016 a 2018. Ao longo desses dois anos, nos meses de junho a setembro (estiagem) e de novembro a março (cheia), foram acompanhados – a partir dos três dias anteriores às datas das passagens do satélite (que ocorre de 16 em 16 dias) – os boletins meteorológicos diários para se certificar das condições de nebulosidade na foz do RPS na data da passagem (quando, portanto, deveriam ser feitas as amostragens). Um pescador contratado de São João da Barra (na foz) ficou de prontidão para uma eventual saída para o mar caso as condições meteorológicas se mostrassem favoráveis. Os equipamentos a serem levados no trabalho de campo e todo o aparato necessário para o deslocamento do Rio de Janeiro até São João da Barra também ficavam organizados.

Mesmo com toda a logística montada para a realização do trabalho de campo, não foi fácil obter, ao longo dos dois anos programados, as condições ideais (pouca ou nenhuma cobertura de nuvens) nas datas das passagens do Landsat 8. Nesse período, apenas em uma data – na estiagem – as condições meteorológicas adequadas foram previstas para a data em que o Landsat 8 passaria. Assim, o levantamento desse período do ano pôde ser realizado na manhã do dia 21/07/2017, no horário de passagem do satélite Landsat 8, sob condições de céu claro com poucas nuvens, localizadas fora da área de interesse (Figura 158).

Não foi possível realizar o levantamento no período da cheia em função de intensa nebulosidade prevista pelos boletins meteorológicos para as datas de passagem do satélite naquele período. Mesmo sem ter ocorrido o levantamento de campo na cheia, as imagens

desse período, posteriormente disponibilizadas, foram analisadas. Todas mostraram grande percentual de cobertura de nuvens, o que de fato inviabilizaria a utilização das mesmas para geração do modelo matemático.

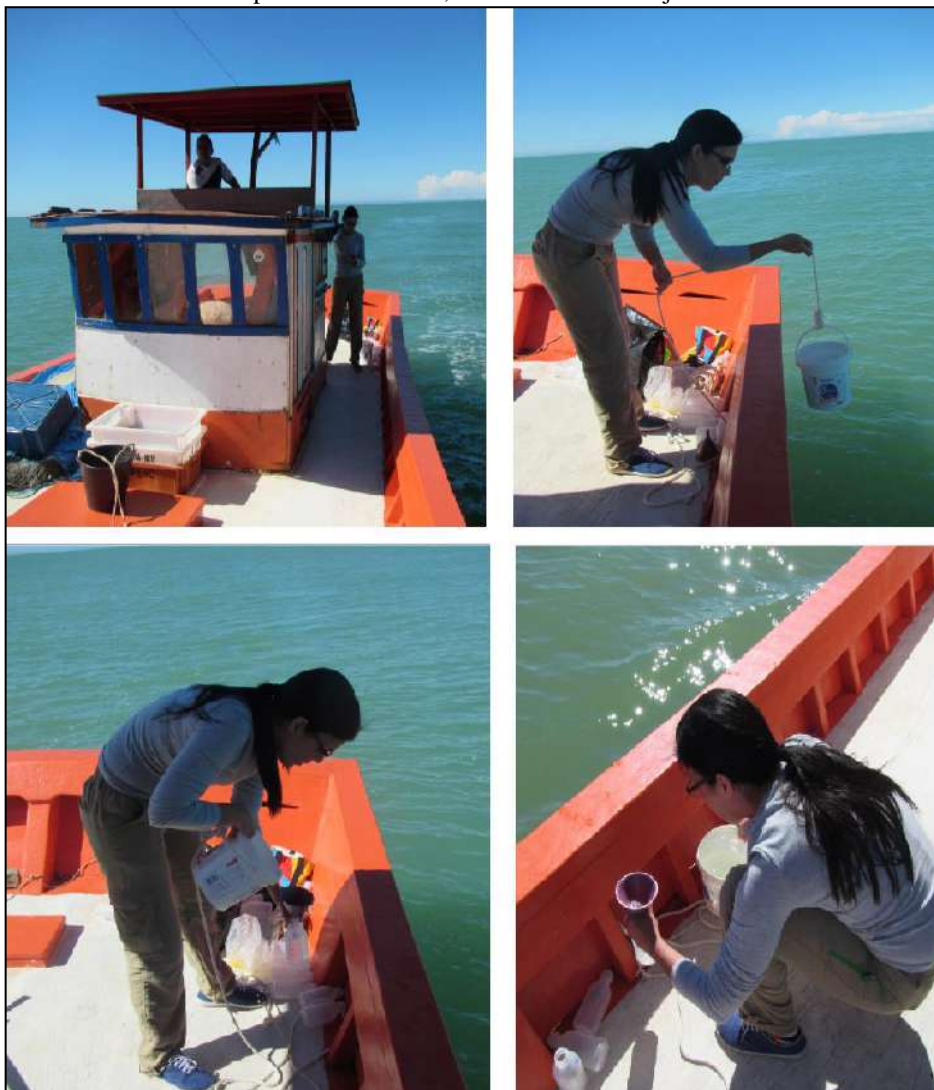
Foram investigadas outras fontes de informação (relatórios técnicos, dissertações, teses e artigos científicos) na busca por informações sobre amostragens para determinação de MPS feitas por levantamentos oceanográficos na época da cheia nas proximidades da foz e na pluma do RPS que pudessem ser utilizadas para correlacionar com as imagens Landsat das mesmas datas desses levantamentos e, posteriormente, gerar algoritmos empíricos. Alguns foram encontrados, porém, a data de nenhum deles coincidiu com a de passagem dos satélites da série Landsat.

Durante as amostragens realizadas para este trabalho (na estiagem de 2017) foram coletados aproximadamente 500 mL de água em superfície por meio de um recipiente lançado na água com o barco parado nos pontos previamente estabelecidos (Figura 158). Foram coletadas treze amostras de água superficial em dois transectos, um partindo do canal norte da desembocadura e outro, do canal sul, ambos em direção à pluma costeira (Figura 159). Para alcançar os pontos de coleta pré-selecionados foi utilizado um GPS Garmin eTrex 20x. As amostras foram acondicionadas em caixas de isopor com gelo e mantidas congeladas logo após a coleta, permanecendo nesse estado até que fossem transportadas ao local da filtração.

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

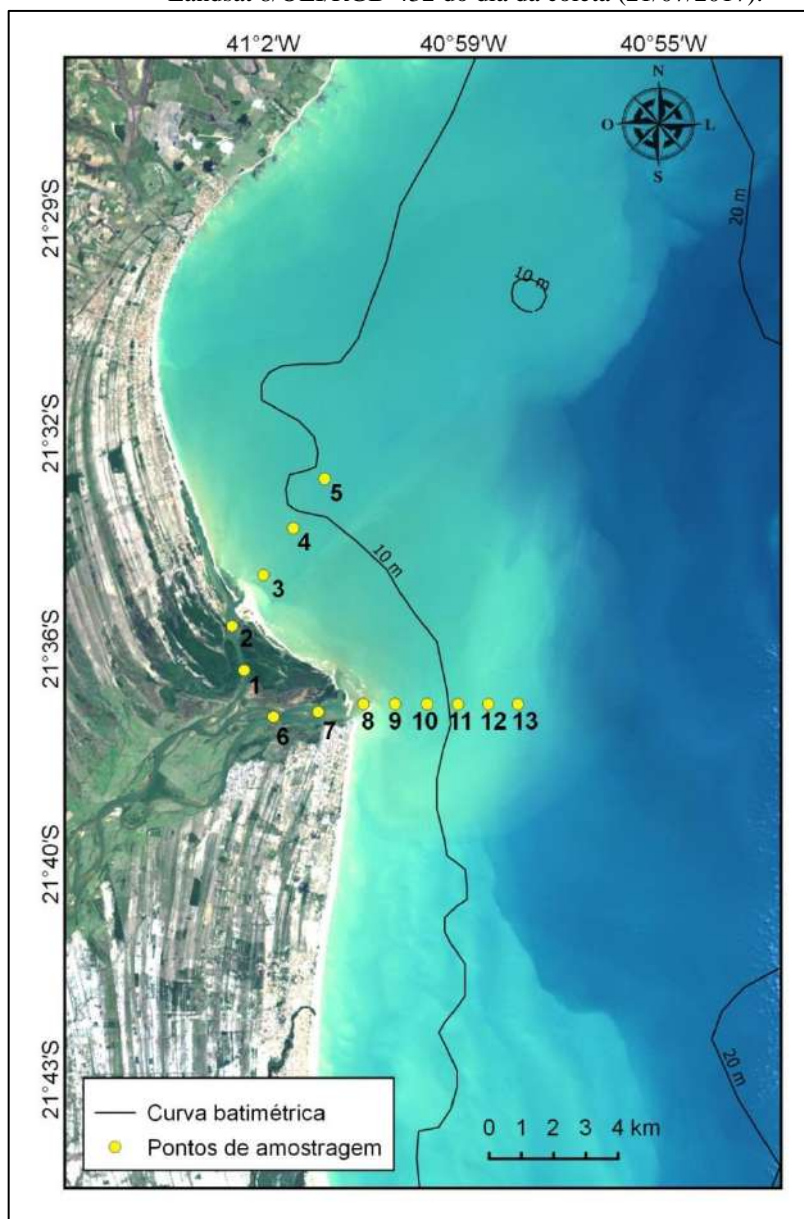
Os valores de concentração de MPS determinados a partir dessas amostras foram correlacionados com a reflectância superficial da água (ρ_w) da imagem da data da coleta para geração de um algoritmo empírico que pudesse estimar a concentração de MPS a partir de imagens Landsat (convertidas para ρ_w) de outras datas.

Figura 158 – Coleta de amostras de água de superfície na porção final do canal do RPS e em sua pluma sedimentar, realizada em 21 de julho de 2017.



Fonte: A autora, 2017 (fotografias tiradas por Silas da Silva).

Figura 159 – Localização dos pontos de amostragem de água superficial para determinação da concentração de MPS sobre imagem Landsat 8/OLI/RGB-432 do dia da coleta (21/07/2017).



Fonte: Modificado de USGS, 2018.

Como o levantamento de campo foi realizado apenas na estiagem e o modelo matemático foi gerado a partir da imagem desse período, optou-se por utilizar o mesmo somente para estimar a concentração de MPS de imagens de outras datas que também fossem da época da estiagem. Como tanto no canal do RPS como em sua foz a sazonalidade hidrológica anual (e conseqüentemente também a sedimentológica) é intensa, a aplicação de um algoritmo elaborado a partir de dados do período da estiagem sobre imagens da cheia poderia comprometer os resultados.

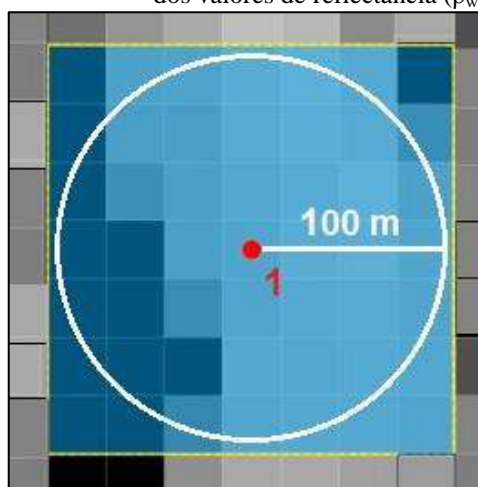
5.4.3 O modelo matemático

Para gerar o modelo matemático de estimativas de concentração de MPS a partir de valores de reflectância da superfície da água (ρ_w) foi necessário, inicialmente, correlacionar os valores de ρ_w obtidos após o processamento da imagem Landsat 8 (banda 4/vermelho) da data da coleta com os valores de MPS obtidos após a filtração das amostras de água.

Os pontos de coleta foram plotados sobre a imagem (convertida para ρ_w) e uma máscara de 7 x 7 pixels foi utilizada para que a média dos valores de ρ_w do entorno de cada ponto de amostragem fosse calculada. Esse procedimento foi adotado de modo a considerar os possíveis erros de localização do GPS, que, em função do modelo utilizado (Garmin eTrex 20x), podem chegar a 100 m no entorno do ponto. Como o pixel do Landsat 8 possui 30 m de resolução, uma máscara com tais dimensões a partir do ponto central da coordenada obtida com o GPS abarcaria os possíveis locais onde a amostragem foi realizada (Figura 160).

Após a obtenção dos valores médios de ρ_w de todos os pontos de amostragem, foi construída uma planilha com esses valores e com aqueles da concentração de MPS obtidos a partir da filtração (Quadro 9). A partir da correlação entre esses dados foi gerado o modelo matemático empírico para estimar a concentração de MPS de imagens Landsat de outras datas. Todas as etapas que envolveram a manipulação da imagem Landsat 8 para geração do modelo foram realizadas nos *softwares* livres SeaDAS (NASA, 2018) e QGIS (QGIS, 2016).

Figura 160 – Máscara para cálculo da média dos valores de reflectância (ρ_w).



Legenda: 1 – ponto de amostragem 1. O círculo de raio 100 m indica o local possível dos erros de deslocamento das coordenadas obtidas com GPS.

Fonte: A autora, 2019.

Quadro 9 – Localização, ρ_w e concentração de MPS dos pontos de amostragem.

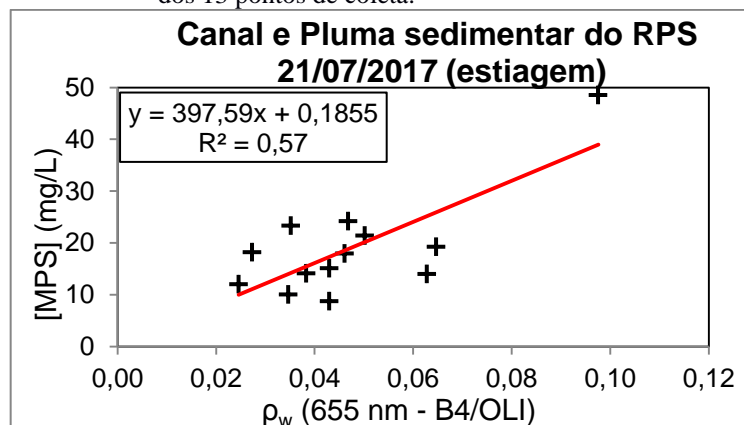
Ponto de coleta	Localização (Latitude; Longitude)	Distância da foz (km)	ρ_w	[MPS] (mg/L)
1	-21.60596; -41.04569	-3,0	0,0246	12,00
2	-21.59367; -41.04932	-1,5	0,0383	14,09
3	-21.57945; -41.03991	0,7	0,0647	19,25
4	-21.56638; -41.03096	2,5	0,0430	15,12
5	-21.55257; -41.02156	4,3	0,0347	10,00
6	-21.61895; -41.03691	-2,7	0,0273	18,18
7	-21.61755; -41.02348	-1,2	0,0352	23,29
8	-21.61538; -41.00993	0,4	0,0976	48,51
9	-21.61537; -41.00042	1,4	0,0628	13,98
10	-21.61538; -40.99082	2,5	0,0461	17,91
11	-21.61543; -40.98162	3,5	0,0468	24,17
12	-21.61540; -40.97252	4,5	0,0502	21,41
13	-21.61541; -40.96361	5,5	0,0430	8,75

Legenda: ρ_w – Reflectância espectral na superfície da água; [MPS] – concentração de material particulado em suspensão. Valores de distância da foz negativos indicam distâncias medidas no canal (da foz em direção ao continente); valores positivos, da foz em direção ao mar.

Fonte: A autora, 2019.

Sabe-se que há uma forte correlação entre a ρ_w e a concentração de MPS na água, e que esse relacionamento tem uma forma assintota; porém, alguns estudos mostram que os melhores coeficientes de determinação (R^2) são obtidos a partir de hipóteses simplificadas de um relacionamento linear (MILLER; McKEE, 2004; ESCH; NETO, 2013). Para a geração da equação linear, inicialmente foram utilizados os treze pontos de amostragem (Quadro 9); o R^2 obtido foi 0,57 (Figura 161).

Figura 161 – Diagrama de dispersão e equação da reta gerada a partir dos 13 pontos de coleta.

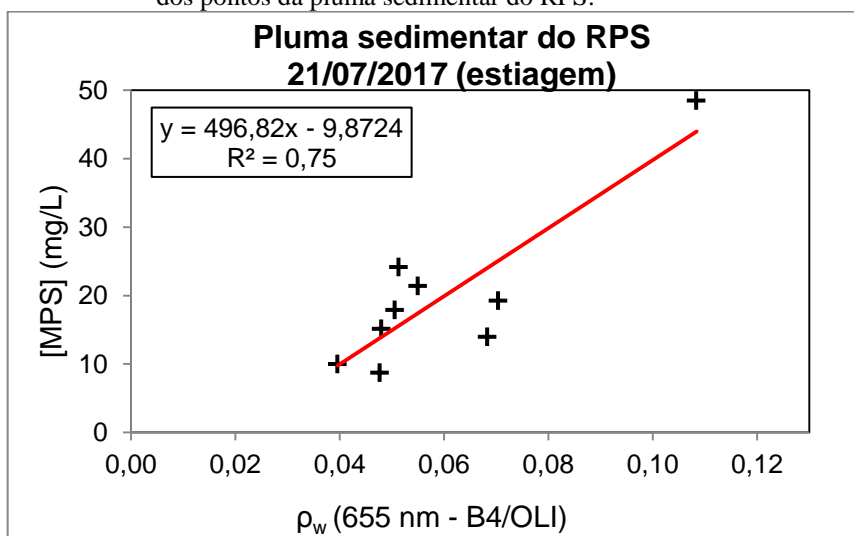


Legenda: [MPS] – concentração de material particulado em suspensão; ρ_w (655 nm - B4/OLI) – reflectância espectral na superfície da água obtida da Banda 4 (vermelho/655 nm) do sensor OLI (Landsat 8) do dia 21/07/2017; R^2 – coeficiente de determinação. A equação da reta obtida por regressão linear encontra-se no canto esquerdo superior.

Fonte: A autora, 2019.

Um novo modelo de regressão linear foi gerado excluindo-se os pontos de amostragens 1, 2, 6 e 7, localizados no canal do RPS. Após a exclusão, o R^2 da nova equação foi 0,75 (Figura 162), indicando aumento na correlação entre os dados em relação ao modelo anterior, tornando-o, conseqüentemente, mais confiável para realizar estimativas de concentração de MPS.

Figura 162 – Diagrama de dispersão e equação da reta gerada somente a partir dos pontos da pluma sedimentar do RPS.



Legenda: [MPS] – Concentração de material particulado em suspensão; ρ_w (655 nm - B4/OLI) – reflectância espectral na superfície da água obtida na Banda 4 (vermelho/655 nm) do sensor OLI (Landsat 8); R^2 - coeficiente de determinação. A equação da reta obtida por regressão linear encontra-se no canto esquerdo superior.

Fonte: A autora, 2019.

Assim, a equação da reta adotada para estimar a concentração de MPS a partir dos valores de ρ_w foi:

$$[MPS] = (496,82 \cdot \rho_w B_{\text{verm}}) - 9,8724 \quad (22)$$

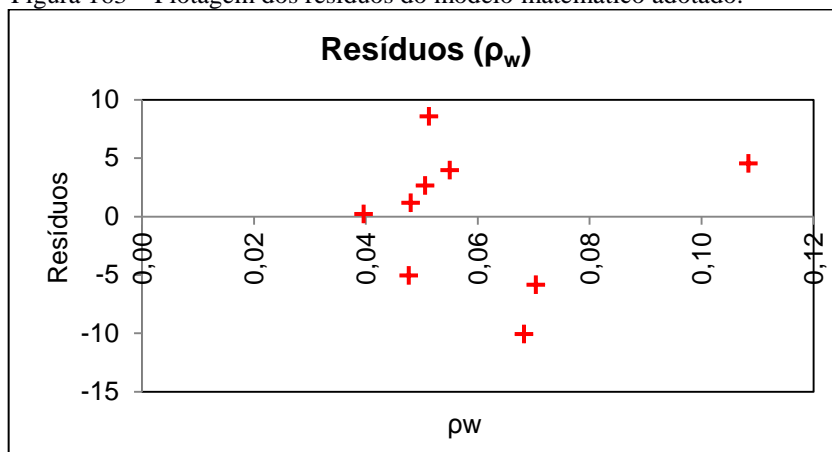
onde

[MPS] é a concentração estimada de MPS (mg/L);

$\rho_w B_{\text{verm}}$ é a reflectância espectral na superfície da água da banda correspondente ao vermelho (Banda 3 no sensor TM e Banda 4 no sensor OLI).

A plotagem dos resíduos do modelo de regressão linear adotado e o gráfico de probabilidade normal (Figuras 163 e 164, respectivamente) mostraram resultados satisfatórios para o modelo gerado.

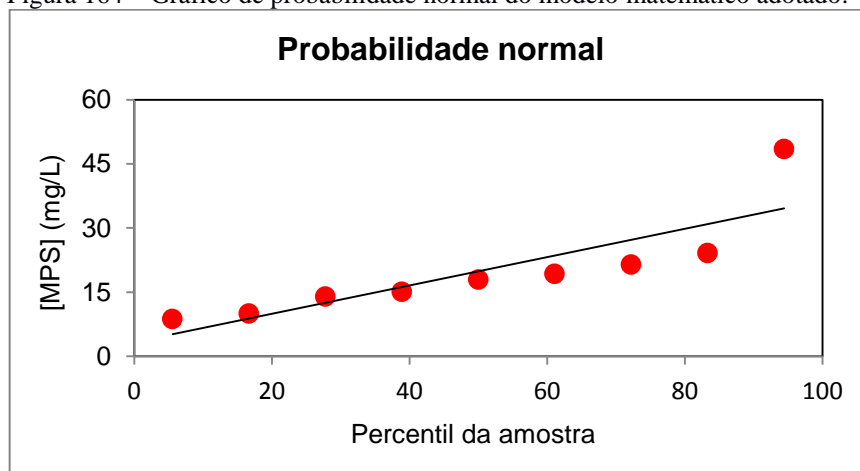
Figura 163 – Plotagem dos resíduos do modelo matemático adotado.



Legenda: ρ_w – Reflectância espectral na superfície da água.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 164 – Gráfico de probabilidade normal do modelo matemático adotado.



Legenda: [MPS] – Concentração de material particulado em suspensão.

Fonte: A autora, 2019.

Após o desenvolvimento do algoritmo empírico, o mesmo foi aplicado às imagens dos sensores TM, do Landsat 5 (de 1984 até o ano em que o mesmo foi desativado, 2011) e OLI, do Landsat 8 (de 2013 a 2018), convertidas para valores de reflectância da superfície da água, para que fosse estimada a concentração de MPS da porção final do canal e da pluma costeira do RPS (na estiagem), em anos anteriores e posteriores à instalação da barragem de Anta. Para aplicação do modelo empírico às imagens Landsat de 1984 a 2018 utilizou-se o *software* QGIS.

5.5 Resultados e discussões

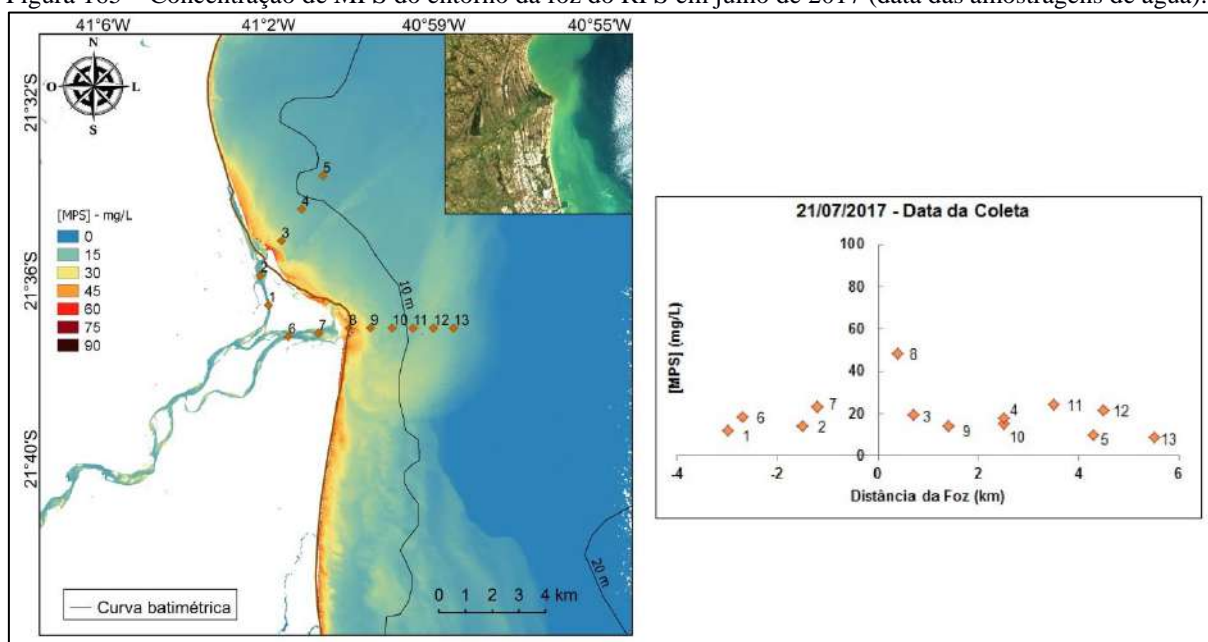
Após a aplicação do algoritmo sobre a imagem OLI/banda 4/Landsat da data das amostragens, o produto gerado indicou a estimativa de concentração de MPS (por meio de uma escala de cores) para a porção final do canal do RPS e para sua pluma costeira (Figura 165). Foi construído um gráfico (à direita, na Figura 165) mostrando a concentração de MPS nos pontos onde a coleta foi realizada em julho de 2017. Esse gráfico foi elaborado também para os produtos gerados a partir das imagens de outras datas (Figuras 166 a 169), nos quais os valores de concentração de MPS no canal do RPS (pontos 1, 2, 6 e 7) e na pluma costeira (pontos 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12 e 13) representam estimativas obtidas a partir daquelas imagens. Os pontos de coleta estão representados como losangos numerados de 1 a 13, tanto nas imagens como nos gráficos. Nos gráficos, o eixo x indica a distância desses pontos em relação à foz do RPS (valores negativos indicam os pontos localizados no canal, antes da foz; valores positivos indicam os pontos após a foz, na pluma); a ausência de algum desses pontos no gráfico indica que, na data da imagem correspondente, o mesmo estava encoberto por nuvens, não tendo sido possível, assim, estimar a concentração de MPS no mesmo.

Além dos valores de concentração de MPS nesses pontos, nos gráficos (Figuras 166 a 169) também foi representada a foz do RPS no canal norte da desembocadura, de modo que se pudesse estimar a concentração de MPS neste local; como o ponto 8 localiza-se muito próximo à foz do canal sul da desembocadura, não foi representado o ponto referente à foz nessa porção. Apenas na imagem da data da coleta (Figura 165) o ponto referente à foz do canal norte não foi representado; nela estão representados apenas os valores de concentração de MPS obtidos por meio da filtração das amostras daquele dia (Quadro 9) e que foram utilizados para geração do modelo matemático.

Foram elaboradas 26 figuras com as imagens resultantes da aplicação do modelo matemático, organizadas no Apêndice Q. Algumas (Figuras 165 a 169) serão apresentadas ao longo do texto com o intuito de facilitar a discussão dos resultados.

Ao longo das três décadas analisadas, o tamanho da pluma sedimentar costeira na época da estiagem mostrou-se bastante variável, ora manifestando-se timidamente ao longo da linha de costa, como em 1988 (Figura 166) e nos anos 1989, 1990, 1994, 1996, 1997, 2005 e 2016 (Apêndice Q), ora se espalhando por quilômetros na direção *offshore*, como em 2004 (Figura 167) e nos anos 1984, 1998, 2000, 2008, 2011, 2013, 2014 e 2015 (Apêndice Q).

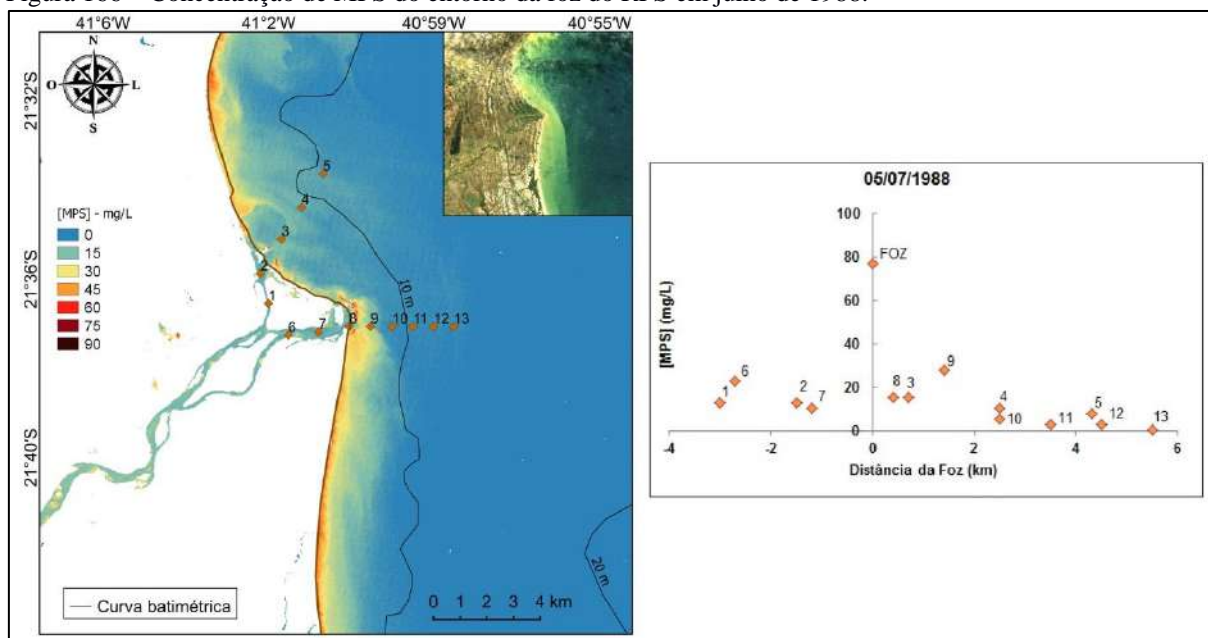
Figura 165 – Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 2017 (data das amostragens de água).



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada por filtração das 13 amostras de água realizadas em 21 de julho de 2017 (gráfico à direita); à esquerda, concentração estimada pelo modelo matemático desenvolvido neste trabalho (Equação 22) aplicado sobre imagem Landsat 8/Banda 4 (canto superior da imagem) do mesmo dia, de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

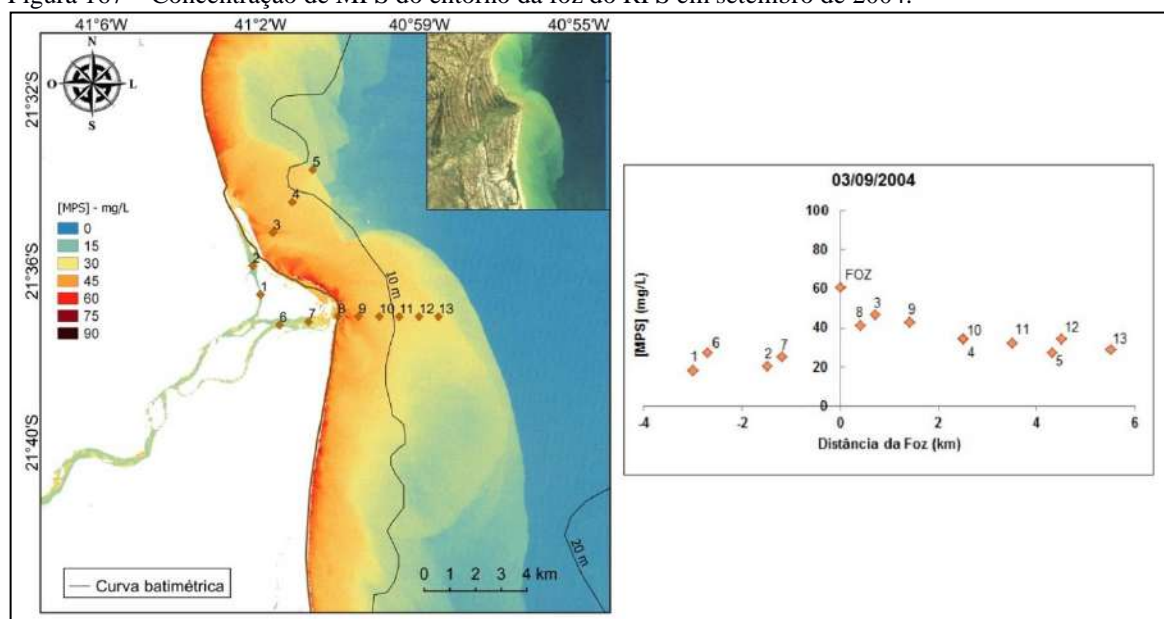
Figura 166 – Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 1988.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 167 – Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em setembro de 2004.

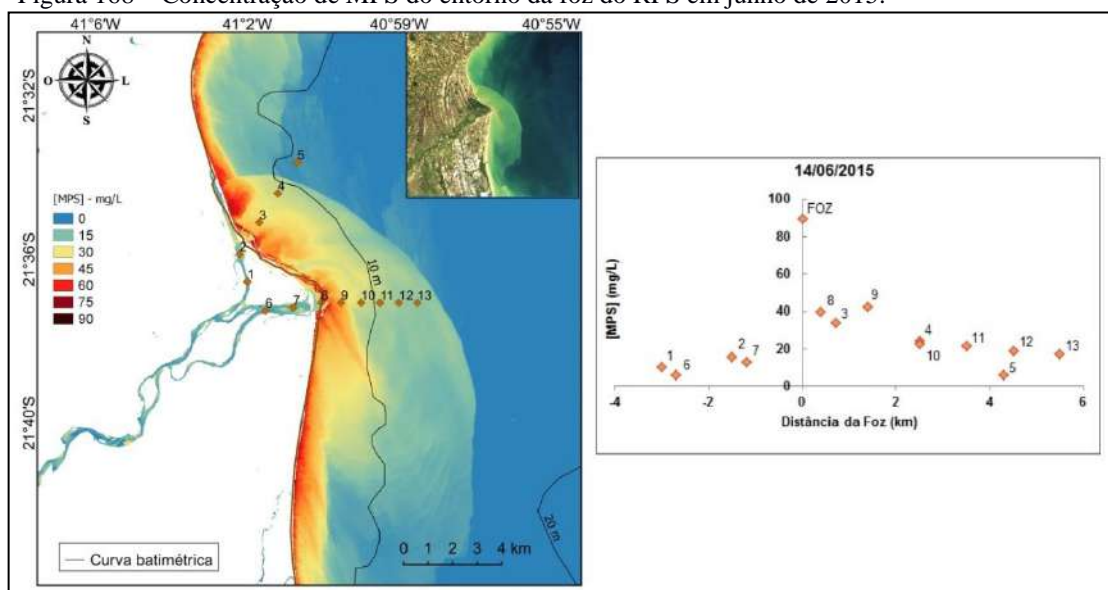


Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

Valores elevados de concentração de MPS foram observados tanto nas plumas menores e restritas à costa, como em 1988 (Figura 166), em que valores próximos a 80 mg/L foram observados perto da foz, como naquelas com maior área e alcance *offshore*, como a pluma de 2015 (Figura 168), que atingiu 90 mg/L na foz.

Figura 168 – Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em junho de 2015.



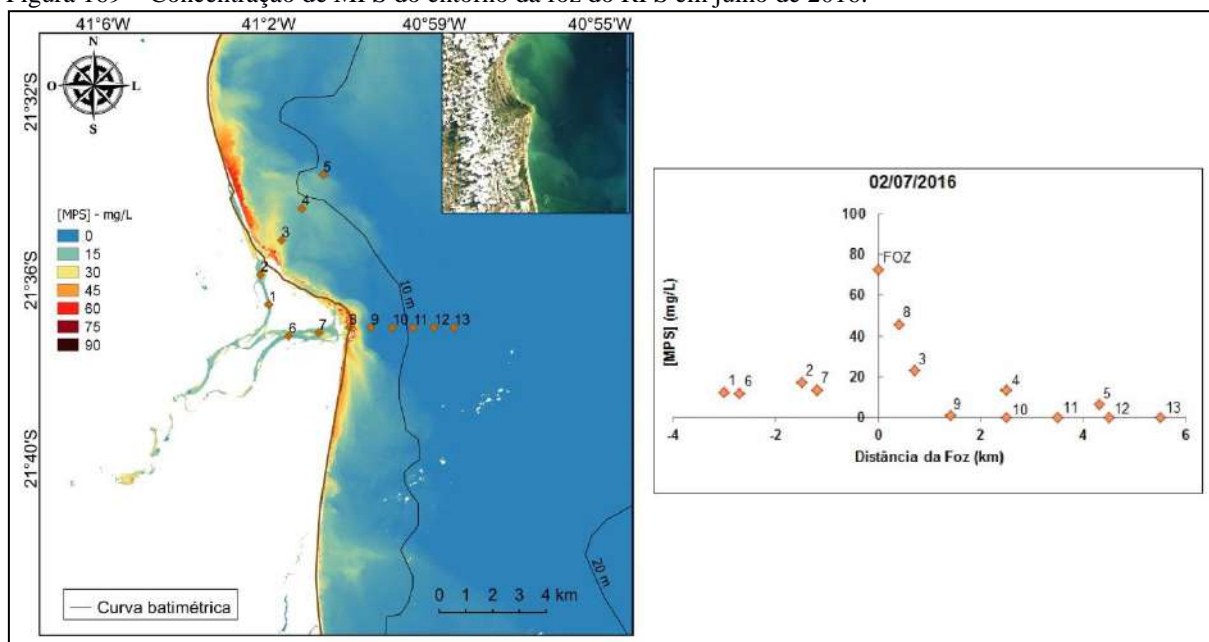
Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) aplicado sobre imagem Landsat 8/Banda 4 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

Cabe lembrar que a barragem de Anta foi instalada em outubro de 2013, e mesmo após essa data foram registradas tanto plumas de grandes dimensões e concentrações (como em 2014, Apêndice Q, e em 2015, Figura 168), como de pequeno porte (em 2016, Figura 169) e médio porte (em 2017, Figura 165).

A ausência de padrão na forma da pluma costeira do RPS já era característica das imagens do período de 1984 a 2013 (Apêndice Q), anteriores à instalação da barragem de Anta, evidenciando que essa obra, a princípio, não teria relação direta com a dispersão da pluma na direção *offshore*.

Figura 169 – Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 2016.



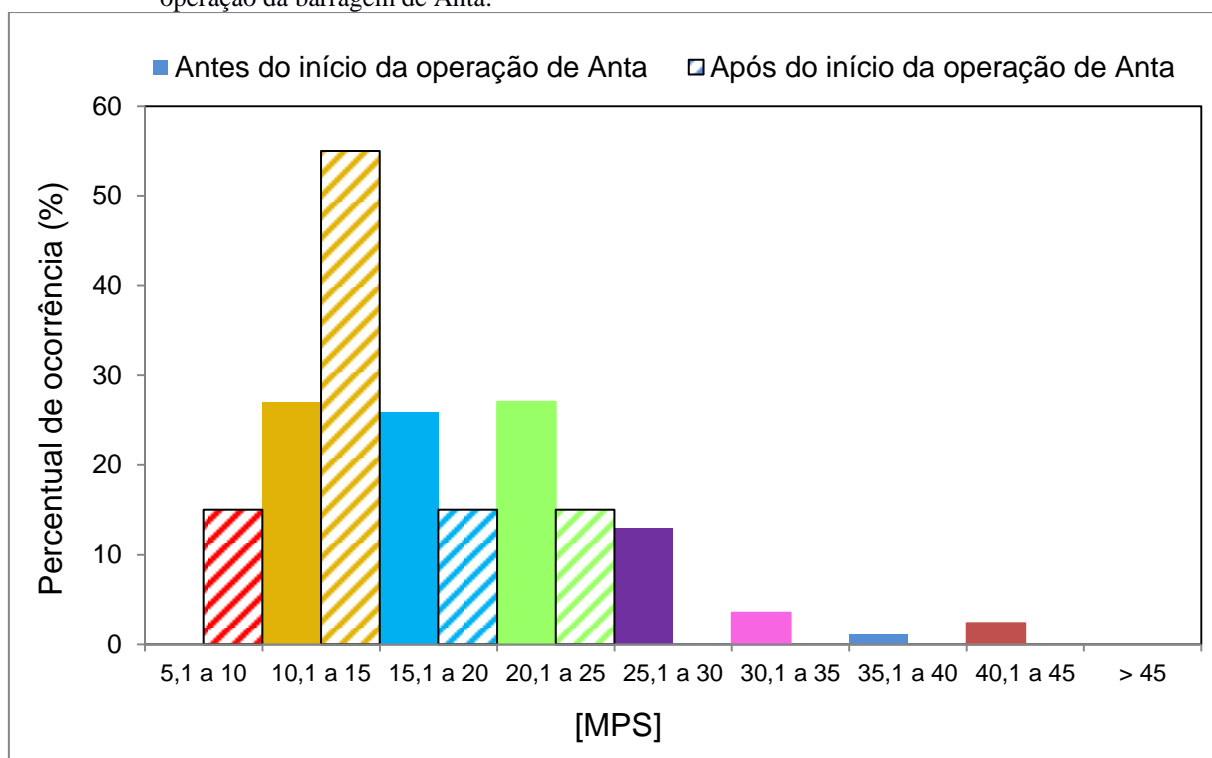
Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) aplicado sobre imagem Landsat 8/Banda 4 (canto superior da imagem), de USGS, 2018. Fonte: A autora, 2019.

O mesmo não se pode afirmar a respeito dos impactos da barragem de Anta sobre a concentração de MPS na porção final do canal do RPS, nos pontos 1, 2, 6 e 7, imediatamente antes da foz (Figura 159). A partir dos valores de concentração de MPS estimados nesses pontos foram construídos gráficos do percentual de ocorrência de alguns intervalos de concentração de MPS para verificar o comportamento desse parâmetro no canal do RPS em anos anteriores e posteriores à barragem de Anta (Figura 170).

Antes da instalação da barragem, a concentração de MPS oscilava entre 10,1 e 45 mg/L, principalmente com valores entre 10,1 e 25 mg/L, em um intervalo trimodal, dentro do qual foram identificadas três classes com frequência quase idêntica: entre 10,1 a 15 mg/L, 15,1 a 20 mg/L e 20,1 a 25 mg/L (Figura 170). De 1984 a 2013, os valores de concentração de MPS ultrapassaram 40 mg/L em três ocasiões: 1989, 1992 e 1994 (Apêndice Q).

Após a instalação da barragem, a largura do intervalo dos valores de concentração de MPS se deslocou para valores mais baixos, situando-se entre 5,1 e 25 mg/L (Figura 170). O intervalo de concentração de MPS deixou de ser trimodal e uma classe se tornou dominante (de 10,1 a 15 mg/L). Valores acima de 25 mg/L não foram registrados (Figura 170), indicando uma clara diminuição dos valores de concentração de MPS no canal do RPS nos anos posteriores à instalação da barragem.

Figura 170 – Frequência da distribuição da concentração de MPS no canal do RPS, antes e após o início da operação da barragem de Anta.



Legenda: [MPS] – concentração de material particulado em suspensão.

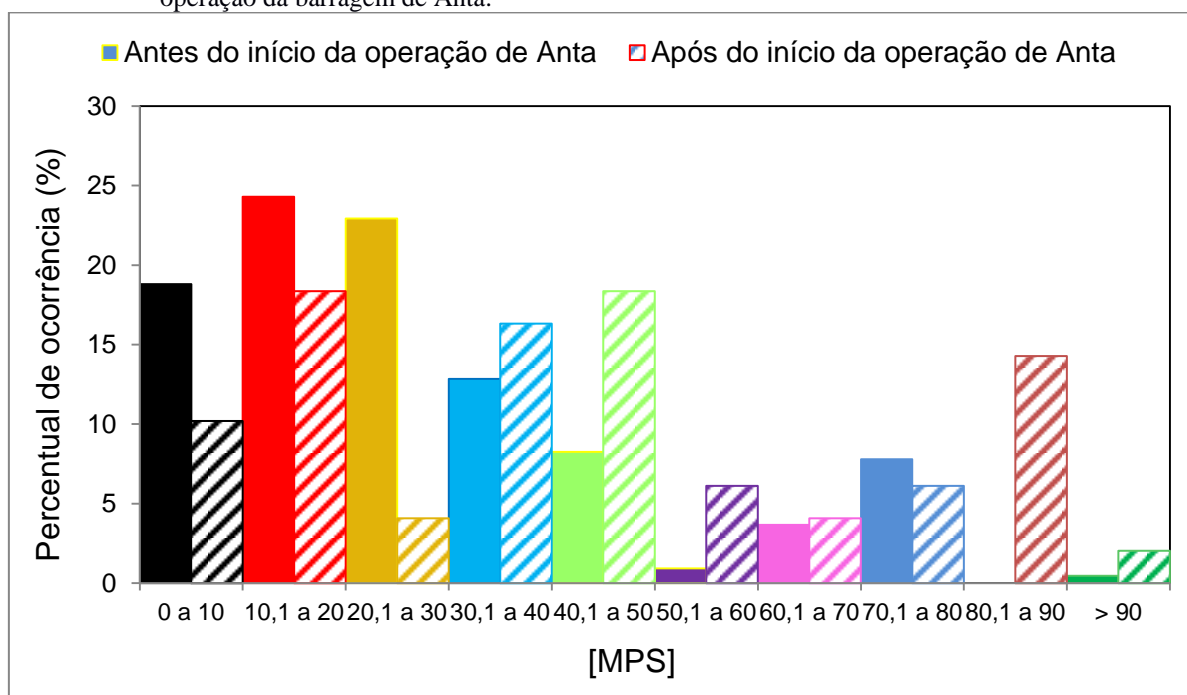
Fonte: A autora, 2019.

Em relação à concentração de MPS da pluma (Figuras 165 a 169 e Apêndice Q), foram encontrados em alguns pontos da mesma, em todos os anos analisados, valores mais

elevados que no canal do RPS, sinalizando a existência, na época da estiagem, de algum processo dinâmico na pluma costeira independente da descarga fluvial.

Ao analisar o percentual de ocorrência dos valores de concentração de MPS na pluma costeira em anos anteriores e posteriores ao início da operação da barragem de Anta, observou-se um aumento na ocorrência de valores mais elevados de concentração de MPS após a instalação da mesma (Figura 171). Antes da barragem, valores acima de 80 mg/L eram raros; após o enchimento de seu reservatório, a frequência de ocorrência de valores acima de 80 mg/L aumentou (Figura 171).

Figura 171 – Frequência da distribuição da concentração de MPS na pluma do RPS, antes e após o início da operação da barragem de Anta.



Legenda: [MPS] – concentração de material particulado em suspensão.

Fonte: A autora, 2019.

O percentual de ocorrência dos intervalos de concentração de MPS da pluma costeira do RPS (Figura 171) é distinto daquele encontrado no seu canal (Figura 170), indicando que não há correlação entre a concentração de MPS que o canal despeja na foz e a concentração de MPS presente na pluma durante a estiagem. Isso sugere a existência de outros processos dinâmicos além da foz responsáveis por alimentar a pluma costeira durante os períodos de baixa vazão do RPS, como aqueles de resuspensão de sedimentos devido à ação de ventos,

ondas e correntes litorâneas (Estágio III dos processos dinâmicos da pluma, segundo Wright e Nittrouer, 1995).

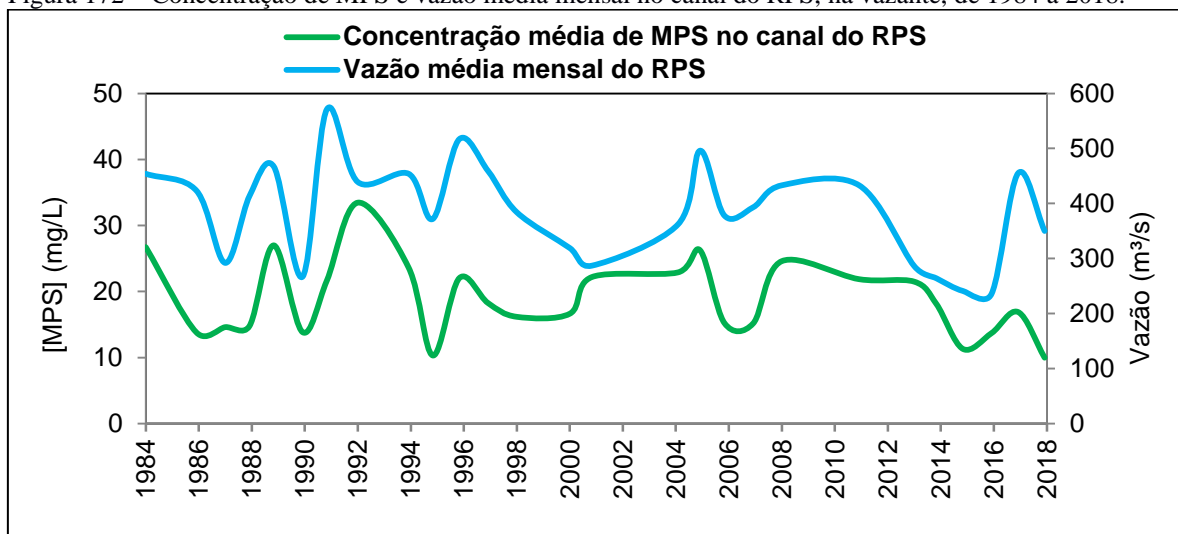
Oliveira (2009) também observou o mesmo comportamento ao estimar, por meio de algoritmos, a concentração de MPS no canal do RPS e em sua pluma costeira na época da vazante: pouca matéria em suspensão no canal do rio e valores relativamente mais elevados na pluma costeira, evidenciando que, em períodos de baixa vazão fluvial, a pluma é caracterizada principalmente por sedimentos oriundos de processos de resuspensão. No entanto, ao aplicar algoritmos desenvolvidos para a época da cheia, Oliveira (2009) encontrou resultados diferentes: tanto a concentração de sedimentos na pluma como no canal do RPS apresentaram valores semelhantes, sugerindo que no período de elevada vazão fluvial, a pluma é dominada por sedimentos provenientes do aporte fluvial recém dispersos na foz (Estágio I/Processos de Dispersão da Pluma, de Wright e Nittrouer, 1995).

Desta forma, a análise da concentração de MPS no canal e na pluma do RPS de 1984 a 2018, além de confirmar os resultados de Oliveira (2009) sobre a origem dos sedimentos presentes na pluma na época da vazante, também serviram para mostrar que mesmo antes da instalação da barragem de Anta esses processos já dominavam a dinâmica sedimentar da pluma costeira nos períodos em que a vazão do RPS encontra-se reduzida em função da sazonalidade anual.

Foram correlacionados os valores estimados de concentração de MPS do canal e da pluma costeira com a vazão média mensal do RPS dos meses da estiagem (junho a setembro) de 1984 a 2018 (período das imagens Landsat usadas neste estudo). Os dados de vazão média foram obtidos da estação fluviométrica Campos/Ponte Municipal (estação 13, Figura 23), localizada na porção final do curso inferior do RPS, aproximadamente 30 km a montante dos pontos de amostragem (Figura 159), sendo a estação mais próxima dos mesmos. Para obter os valores de concentração de MPS foi calculada a média aritmética dos valores de concentração de MPS dos pontos de amostragem do canal e da pluma, estimados a partir das imagens Landsat da estiagem.

Foi possível verificar que, no canal do RPS, o comportamento da curva de concentração média de MPS acompanha o da vazão média mensal do rio nessa mesma época (Figura 172). Ou seja, no canal do RPS, na época da vazante, vazão e concentração de MPS estão acoplados. Analisando o diagrama de dispersão desses parâmetros foi observado que eles são positivamente correlacionados (Figura 173).

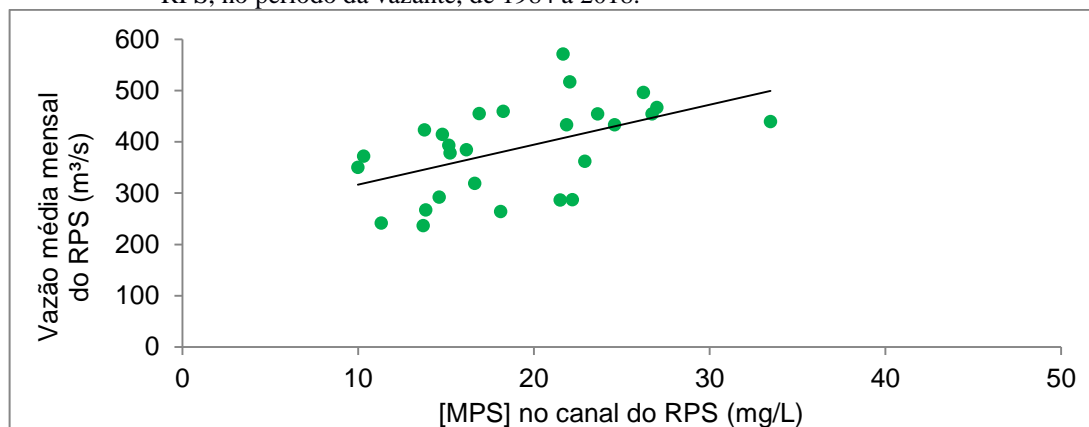
Figura 172 – Concentração de MPS e vazão média mensal no canal do RPS, na vazante, de 1984 a 2018.



Legenda: [MPS] – concentração de material particulado em suspensão (obtida pela média aritmética dos valores estimados para os pontos de amostragem do canal, a partir das imagens Landsat da estiagem).

Fonte: A autora, 2019.

Figura 173 – Diagrama de dispersão da concentração de MPS e da vazão média mensal no canal do RPS, no período da vazante, de 1984 a 2018.



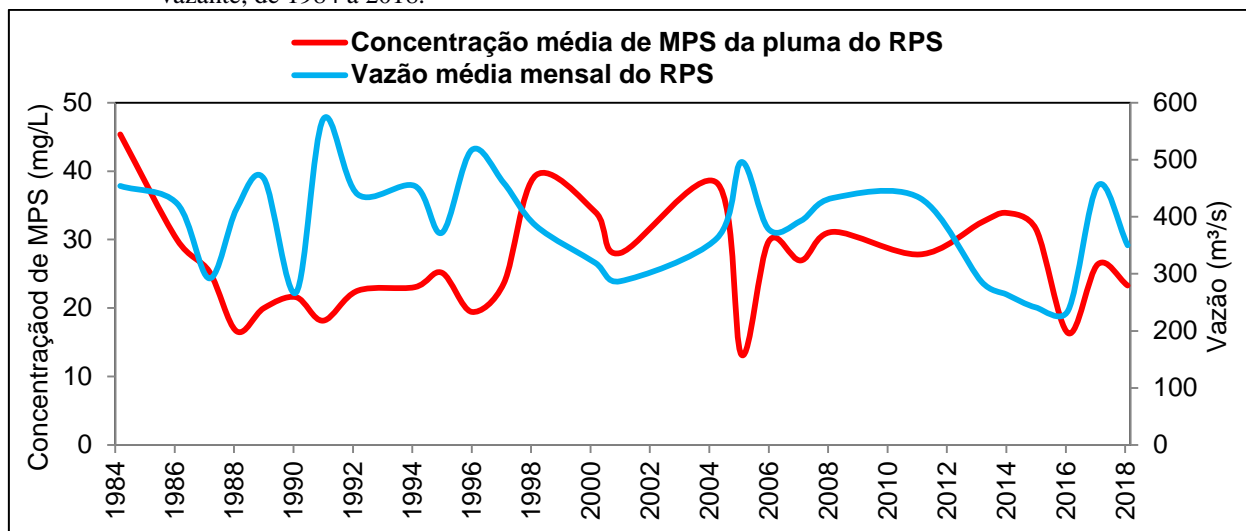
Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão.

Fonte: A autora, 2019.

Porém, ao comparar a vazão média da porção final do RPS com a concentração de MPS da pluma, também durante a vazante, verificou-se que a semelhança entre o comportamento desses parâmetros é pequena (Figura 174). Na vazante, períodos de vazão mais elevada no canal do RPS nem sempre coincidem com os da máxima concentração de MPS na pluma costeira (Figura 174). O diagrama de dispersão mostrou que os valores de concentração de MPS da pluma não aumentam conforme os valores de vazão média do RPS se elevam; a correlação nesse caso é negativa (Figura 175), ao contrário da observada no canal (Figura 173). Isso sugere que na pluma costeira, na época da vazante, diferentemente do

que acontece no canal do RPS, vazão e concentração de MPS não estão diretamente relacionados.

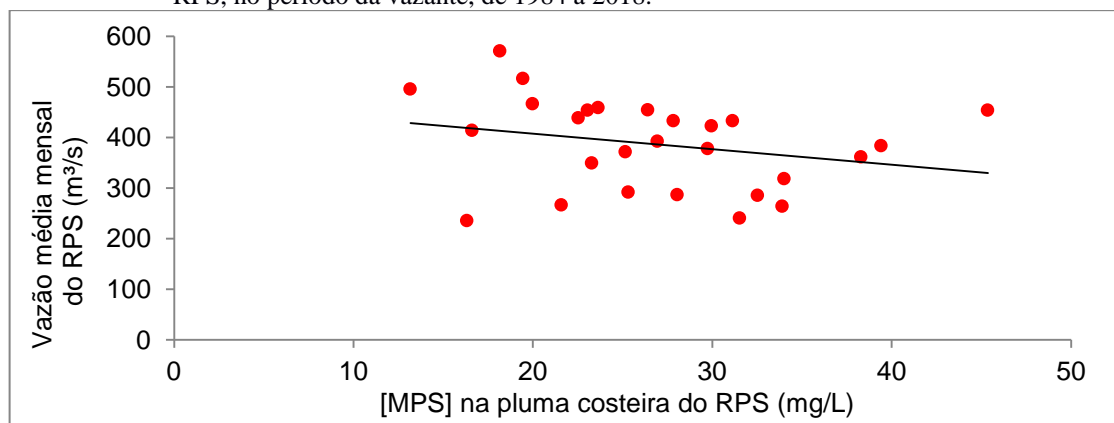
Figura 174 – Concentração de MPS da pluma costeira e vazão média mensal no canal do RPS, no período da vazante, de 1984 a 2018.



Legenda: [MPS] – concentração de material particulado em suspensão (obtida pela média aritmética dos valores estimados para os pontos de amostragem da pluma, a partir das imagens Landsat da estiagem).

Fonte: A autora, 2019.

Figura 175 – Diagrama de dispersão da concentração de MPS e da vazão média mensal no canal do RPS, no período da vazante, de 1984 a 2018.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão.

Fonte: A autora, 2019.

Como durante o estudo de caso não foi possível realizar levantamento de campo na época da cheia, e não foram encontrados levantamentos pretéritos de amostras de água de superfície na foz do RPS que coincidisse com a data das imagens Landsat disponíveis daquele período, não foi desenvolvido um modelo matemático que pudesse ser aplicado a imagens da cheia.

Como a origem dos sedimentos da pluma costeira na estiagem é diferente daquela da época da cheia (CARNEIRO, 1998; OLIVEIRA, 2009), o algoritmo desenvolvido nesse trabalho (para a estiagem) não foi aplicado sobre imagens da cheia para estimar a concentração de MPS da pluma costeira e, assim, verificar como esse parâmetro se comporta em relação à vazão fluvial naquele período do ano. Porém, segundo Carneiro (1998), esse acoplamento entre a vazão do RPS e o transporte de MPS no período da cheia (principalmente nos meses de pico, como dezembro e janeiro) existe, o que faz com que, nessa época do ano, o MPS predominante na pluma costeira seja oriundo da descarga fluvial, e não de resuspensão, como ocorre na vazante.

5.6 Conclusões do estudo de caso

Após a aplicação do modelo matemático para estimar a concentração de MPS na foz do RPS a partir de imagens de satélite, observou-se que, de 1984 a 2018, esse parâmetro variou bastante na pluma costeira, que chegou a apresentar valores elevados tanto antes como após a instalação da barragem de Anta. A forma e o alcance da pluma costeira do RPS na direção *offshore* também variou bastante nesse período.

Na vazante, foram encontrados valores de concentração de MPS mais elevados na região da pluma que no canal do RPS. Isso confirmou o que outros autores já haviam observado, que seria a inexistência de acoplamento entre a vazão fluvial do RPS e a concentração de MPS de sua pluma sedimentar no período da estiagem. Nesse período de baixa vazão (e conseqüentemente pouca descarga sedimentar), o RPS chega enfraquecido à foz, tornando-a mais vulnerável à ação de processos dinâmicos resultantes da ação de ventos, ondas e correntes litorâneas. Essas forçantes atuam sobre a resuspensão de sedimentos e alimentariam sua pluma costeira nessa época do ano.

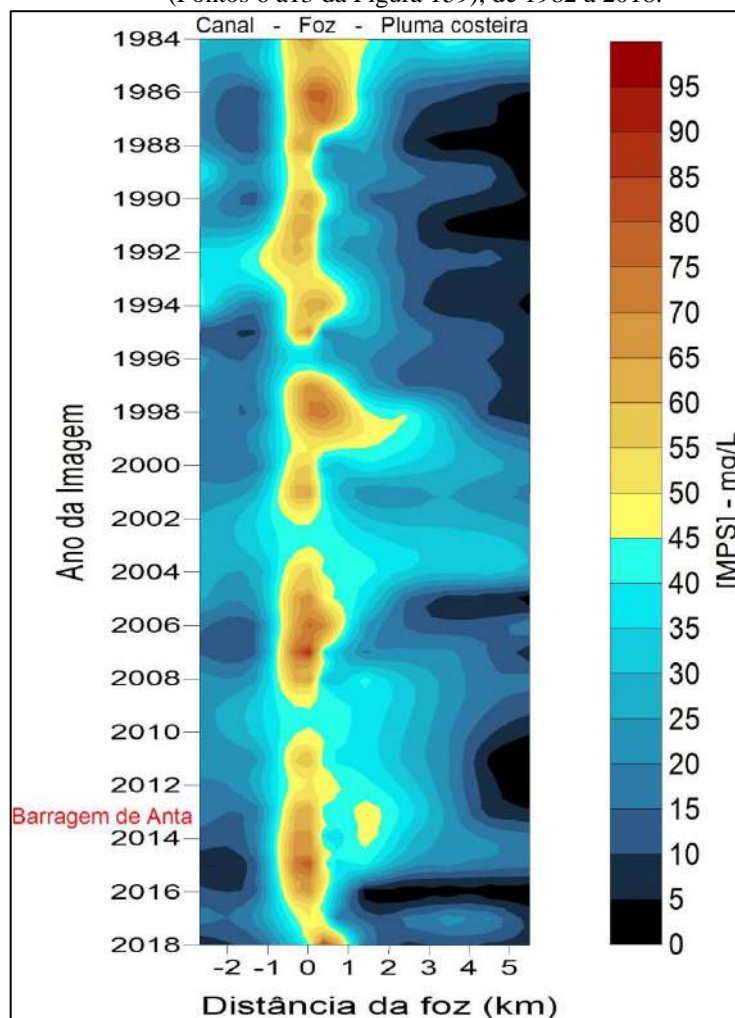
O diagrama de Hovmöller do transecto sul (Pontos 6 a 13, Figura 159) do RPS mostra a distribuição espacial e temporal da concentração do MPS na estiagem, de 1982 a 2018 (Figura 176). Esse parâmetro foi estimado a partir do modelo matemático elaborado neste trabalho, aplicado às imagens Landsat do período. Os valores negativos em relação à foz correspondem à porção final do canal do RPS; valores positivos, à região da pluma costeira.

Pelo diagrama (Figura 176) foi possível verificar que antes de 2013, quando a barragem ainda não estava em operação, a concentração de MPS no canal ficava em torno de

15 a 30 mg/L, atingindo valores superiores a 40 mg/L em certas ocasiões. Após 2013, a média dos valores diminuiu no canal, e concentrações abaixo de 10 mg/L (não observadas anteriormente) foram registradas (Figuras 170 e 176). Além disso, observou-se que, após 2013, em algumas ocasiões (Figura 168 e Apêndice Q), a pluma se espalhou na direção *offshore* mesmo na estiagem, e valores elevados de concentração de MPS ocorreram na mesma (Figuras 171 e 176). Porém, os valores mais elevados ocorreram principalmente nas proximidades da foz, enquanto a porção mais *offshore* da pluma se mostrou mais diluída (Figura 176). Na estiagem, o fluxo fluvial é caracterizado por vazões relativamente menores, e após 2013, sob os efeitos de uma estiagem severa que assolava a Região Sudeste (2013-2014) e submetido à regularização pela barragem de Anta, ele passou a chegar à porção final do canal ainda mais enfraquecido, com menor carga sedimentar (Figura 170). Mesmo após o fim da estiagem, os valores de concentração de MPS mantiveram-se baixos, impactados pela retenção de água no reservatório de Anta. Diante disso, após 2013, as forçantes oceanográficas atuaram ainda mais próximo à foz, provocando no seu entorno a resuspensão dos sedimentos de fundo. Isso explicaria a ocorrência, nas adjacências da foz, de valores mais altos de concentração de MPS.

Futuros estudos, que permitam avaliar a concentração de MPS na foz na época da cheia, contribuiriam sobremaneira para corroborar os resultados aqui apresentados, de que a barragem de Anta vem impactando a quantidade de sedimentos do RPS que chega à foz. E, ainda, serviriam para investigar de maneira mais profunda os impactos desta barragem na pluma costeira, cujo comportamento sedimentar, na cheia, está diretamente relacionado à descarga fluvial.

Figura 176 – Diagrama Hovmöller do transecto sul do RPS (Pontos 6 a13 da Figura 159), de 1982 a 2018.



Legenda: [MPS]: concentração de material particulado em suspensão.

OBS.: Os valores de [MPS] dos anos 1985, 1993, 1999, 2002, 2003, 2009, 2010 e 2012 foram determinados por interpolação, pois não foram utilizadas imagens dessas datas no modelo matemático desenvolvido neste trabalho face à elevada cobertura de nuvens das cenas existentes.

Fonte: A autora, 2019.

CONCLUSÕES

O estudo das mudanças hidrosedimentológicas e morfológicas dos sistemas fluviais e sua relação com fatores naturais e antrópicos é reconhecidamente uma ferramenta importante para definir seus padrões de evolução e, assim, conduzir de maneira eficaz projetos de gestão e recuperação dos mesmos. Porém, determinar os principais agentes responsáveis por essas mudanças não é tarefa simples, principalmente quando o objeto de estudo é um rio como o Paraíba do Sul, em cujo vale diferentes tipos de atividades humanas vêm consumindo suas águas e interferindo em sua dinâmica sedimentar há pelo menos dois séculos e operações hidráulicas vêm regularizando seu fluxo por meio de barragens há décadas.

Estudar os seis sinais vitais para avaliação de sistemas fluviais sugeridos por Lord, Germanoski e Allmendinger (2009) em um rio com mais de mil quilômetros de extensão, implicou em segmentá-lo em quatro cursos com características físicas distintas entre si, mas internamente submetidos a processos e atividades antrópicas semelhantes. Essa técnica facilitou a manipulação de dados hidrológicos, sedimentológicos e das fotografias aéreas do canal, e, principalmente, as análises para avaliar os impactos das barragens nos sinais vitais do RPS. Investigar as mudanças ocorridas em cada um dos seus quatro cursos, e depois compilá-las para obter uma visão integrada do sistema fluvial do RPS foi desafiador, mas fundamental para compreender o quanto as barragens o impactaram.

Normalmente, os parâmetros hidrológicos são os primeiros a responder à instalação de barragens no canal fluvial, uma vez que elas alteram imediatamente o fluxo a sua jusante. Nas estações fluviométricas do RPS localizadas a jusante de barragens com reservatório ocorreu queda nos parâmetros hidrológicos logo após o ano de início de suas operações hidráulicas, bem como mudanças na assinatura hidrológica das séries temporais de cotas ou vazões médias mensais. Essas alterações foram respostas imediatas ao represamento e à regularização realizados pelas barragens com reservatório sobre o fluxo fluvial.

Outra característica observada nos dados hidrológicos das estações fluviométricas a jusante de barragens com reservatório foi a tendência negativa de suas séries temporais de cotas ou vazões ao longo das décadas analisadas. A hipótese de que essa tendência estaria associada ao comportamento pluviométrico foi descartada, pois as séries de chuvas do mesmo período, ao contrário das séries hidrológicas, mostraram tendência positiva em todas as estações da bacia. A única estação fluviométrica cuja série hidrológica temporal apresentou tendência positiva foi aquela localizada a montante das barragens com reservatório, longe da

influência das barragens. Ali, o comportamento hidrológico acompanhou o ritmo das chuvas. A investigação das causas do comportamento positivo das séries de chuvas da bacia do RPS seria um tema interessante para pesquisas climatológicas.

Apesar da tendência pluviométrica positiva em toda a bacia do RPS ao longo das décadas analisadas, alguns períodos de estiagens severas assolaram a Região Sudeste do Brasil. Durante esses eventos, a queda dos parâmetros hidrológicos foi acentuada. Quando os períodos de seca coincidiram com os anos de instalação de barragens reguladoras, esse efeito tornou-se ainda mais pronunciado. Os primeiros anos após o início da transposição das águas do RPS para o rio Guandu, por exemplo, coincidiram com um período de grande estiagem que assolava o Sudeste brasileiro. A seca impactou os valores médios de vazões/cotas de todo o RPS, mas nas estações fluviométricas localizadas a jusante da transposição, as mudanças foram ainda mais intensas e, mesmo após o fim da estiagem, seus parâmetros hidrológicos não recuperaram os valores originais, anteriores à transposição.

Além de comprometer o regime hidrológico por meio do controle de vazão (e com isso, dos picos de inundação), as barragens alteram o fluxo de sedimentos retirados das cabeceiras e das margens dos rios que normalmente chegariam até a foz, interrompendo, assim, a continuidade longitudinal do sistema fluvial. Cabe ressaltar que as barragens reguladoras de fluxo do RPS (Paraibuna, Santa Branca, Funil e Anta) atuam sobre o controle das grandes vazões, que são justamente as responsáveis pelo maior volume de transporte sedimentar.

Apesar de curtas, as séries temporais de concentração de MPS das estações fluviométricas do RPS (todas a jusante das barragens com reservatório) também apresentaram tendência negativa ao longo dos anos. Amostragens mensais de água do RPS, realizadas durante dois anos, a montante e a jusante da barragem de Anta, comprovaram a hipótese de que essas obras retêm sedimentos finos em seus reservatórios, uma vez que os valores de concentração de MPS das amostras a montante foram superiores aos das amostras a jusante. A inexistência de séries temporais de sedimentos grossos impediu a realização de uma análise sedimentológica completa do RPS. Futuros estudos que contemplem esse tipo de sedimento seriam fundamentais, pois a retenção dos mesmos nas barragens pode induzir uma série de alterações a jusante, tanto na morfologia do canal como na foz.

O estudo da morfologia de vista em planta do RPS por meio de fotografias aéreas de diferentes décadas mostrou que a alteração morfológica mais significativa ocorrida ao longo de seu curso fluvial foi a diminuição da largura média do canal. Os maiores percentuais foram encontrados nos trechos a jusante das barragens com reservatório e nos trechos onde, além das barragens, atividades antrópicas ostensivas consomem grandes volumes de água e areia, como

nas várzeas paulistas.

Outra mudança morfológica observada nos trechos a jusante das barragens com reservatório foi o aumento da área das ilhas, cujas superfícies tornaram-se mais expostas em função da diminuição da disponibilidade hídrica no canal. O contrário – aumento da largura do canal fluvial e desaparecimento significativo de ilhas – também aconteceu, mas principalmente nos trechos imediatamente a montante dos reservatórios, onde o represamento de água realizado pelas barragens também alterou a morfologia fluvial.

Graças à transposição de dois terços de seu volume original e à retenção de suas águas e sedimentos em quatro grandes reservatórios de barragens a montante, o RPS chega à desembocadura, enfraquecido. Sem o seu potencial hidráulico original, sua foz vem sofrendo, desde o início da regularização, os impactos da ação erosiva das ondas e outras forçantes oceanográficas. O estudo da morfologia de vista em planta do RPS permitiu espacializar a região de sua foz em dois momentos distintos: quando os primeiros efeitos da regularização começavam a se manifestar, na década de 1950, e cinquenta anos mais tarde, após a instalação das suas maiores barragens com reservatório. Por meio de fotografias aéreas foi possível delinear a morfologia da desembocadura e da praia de Atafona nesses dois momentos e quantificar as alterações morfológicas e os efeitos da destruição relatada por moradores, reportagens e outros estudos da área. A disponibilidade de imagens orbitais gratuitas com boa resolução espacial facilita futuros estudos para acompanhamento das mudanças na área.

O cálculo de alguns parâmetros extraídos da morfologia transversal do canal do RPS permitiu avaliar como as barragens reguladoras afetam sua variabilidade e, com isso, podem comprometer as mudanças morfológicas naturais do canal. Em uma estação a montante das barragens e, portanto, livre dos efeitos da regularização, os parâmetros extraídos da morfologia transversal apresentaram grande variabilidade com o tempo, como era esperado para segmentos do canal onde o fluxo fluvial oscila naturalmente. Porém, nos trechos onde a regularização é a principal atividade de interferência no fluxo fluvial, os percentuais de variação desses parâmetros foram relativamente menores, evidenciando o impacto das barragens com reservatório sobre sua variabilidade natural e, conseqüentemente, sobre a morfologia transversal.

Por meio da investigação da morfologia longitudinal do RPS anterior e posterior à instalação de duas grandes barragens com reservatório foi possível verificar que essas obras criam irregularidades no local onde são instaladas, aumentam o desequilíbrio do perfil longitudinal e dificultam sua evolução natural para uma silhueta mais suave, que facilite o transporte sedimentar.

Finalmente, o estudo de caso realizado na foz do RPS e em sua pluma costeira por meio de imagens orbitais e levantamentos de campo na época da estiagem mostrou que, desde a instalação do reservatório da barragem de Anta, a quantidade de MPS que chega à porção final do canal, e, conseqüentemente, é despejada no Atlântico, vem diminuindo. Como o RPS vem chegando cada vez mais enfraquecido à sua porção final, a ação das forçantes oceanográficas vem se intensificando, provocando a resuspensão dos sedimentos de fundo cada vez mais próximo à foz.

Ao adotar uma metodologia em que a investigação de seis sinais vitais é necessária para avaliar se uma interferência antrópica impacta o sistema fluvial, foi possível obter uma visão sinóptica das transformações dos parâmetros hidrosedimentológicos e morfológicos do RPS e comprovar que suas barragens com reservatório vêm modificando seu sistema há décadas. Aos impactos das barragens sobre o fluxo fluvial e a morfologia do canal somam-se aqueles advindos de outras atividades antrópicas que consomem as águas do RPS e modificam seu canal. Esses impactos merecem investigações mais profundas.

Com uma população crescente em seu entorno e na Região Metropolitana do Rio de Janeiro extremamente dependentes de suas águas, não há expectativas de diminuição das intervenções antrópicas sobre o Paraíba do Sul em um futuro próximo. Contrariando as recomendações do Instituto Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro (INEA), em março de 2018 foi inaugurado um novo sistema de transposição das águas da bacia do RPS, desta vez desviando cerca de um terço das águas do reservatório do rio Jaguari, afluente do RPS, para o reservatório Atibainha, parte do Sistema Cantareira. Com isso, aumentou-se a segurança hídrica da Região Metropolitana de São Paulo, colocando-se em risco a do Rio de Janeiro. Os efeitos da crise hídrica de 2013-2014 nos municípios a jusante da transposição foram drásticos. Com a nova transposição, como ficará a segurança hídrica desses municípios? Eles conseguirão superar a escassez de água em face de um eventual período de estiagem severa? Estudos que contemplem os impactos da transposição Jaguari-Atibainha sobre o fluxo fluvial são fundamentais para responder essas questões, bem como para trazer à luz argumentos concretos que justifiquem a necessidade de alternativas para o abastecimento de água das duas maiores regiões metropolitanas do Brasil, evitando, assim, futuros conflitos pelo uso da água.

Com uma legislação frágil, que permite que projetos de barragens consigam licenciamento ambiental sem a realização de estudos que contemplem todo o sistema fluvial, a possibilidade de instalação de novas barragens no canal principal do RPS e em seus afluentes existe. O contrário, projetos de desativação e remoção de barragens (medidas cada vez mais comuns em alguns países onde os rios são regularizados há décadas), não vêm sendo

discutidos, embora a vida útil de algumas das barragens do RPS vá expirar nos próximos anos. Em um país onde a segurança das barragens não é uma prioridade, outra investigação importante seria a respeito das ações que as empresas responsáveis pela manutenção dessas barragens vêm tomando. Rompimentos de barragens que porventura ocorressem em uma bacia tão populosa como a do RPS teriam consequências ainda mais trágicas que as de Mariana e Brumadinho.

O Paraíba do Sul vem há mais de um século cumprindo os papéis a ele atribuídos, necessários ao abastecimento da Região Sudeste e à economia do Brasil. Até quando este rio conseguirá cumprir essas atribuições é uma incógnita. O que ficou claro com este trabalho foi a necessidade de alternativas para o abastecimento da população dependente de suas águas de Janeiro e de projetos eficazes de gestão e recuperação deste rio que tanto contribuiu para o desenvolvimento econômico do Brasil, mas que, no cenário atual, é apenas um rio sobrevivente.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, A.Z.; BERNARDES, N. *Vale do Paraíba, Serra da Mantiqueira e Arredores de São Paulo*. 1. ed. Rio de Janeiro: Conselho Nacional de Geografia, 1958.

AGÊNCIA DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL (AGEVAP). *Agência de Bacia _ Pioneira na Gestão das Águas*. Resende, AGEVAP, 2016. Disponível em: <<http://www.agevap.org.br/apresentacao.php>> Acesso em: 17 de agosto de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Bacia do Rio Paraíba do Sul*. Brasília, ANA, 2016. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/outorgaefiscalizacao/outorgafiscalizacaoserv.aspx>>. Acesso em: 12 de junho de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Bacia do Rio Paraíba do Sul – Livro da Bacia*. Brasília, ANA, 2001. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2001/BaciadoRioParaibadoSul.pdf>> Acesso em: 04 de novembro de 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Bacias Hidrográficas Brasileiras – Arquivos Digitais*. Brasília, ANA, 2010. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?TocItem=4100>> Acesso em: 10 de julho de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Manual de construção da base hidrográfica otocodificada da ANA. Brasília, ANA, 2007. Disponível em: <http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/en/resources.get?id=47&fname=manual_base_otocodificada.pdf&access=private>. Acesso em: 10 de setembro de 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Notícias*. ANA, 2012. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?List=ccb75a86-bd5a-4853-8c76-cc46b7dc89a1&ID=11223>>. Acesso em: 24 de agosto de 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Resolução 211, de 2003*. Brasília, ANA, 2003. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2003/211-2003.pdf>>. Acesso em: 12 de junho de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Resolução 465, de 2004*. Brasília, ANA, 2004. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2004/465-2004.pdf>>. Acesso em: 14 de junho de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Resolução 714, de 2015*. Brasília, ANA, 2015a. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2015/714-2015.pdf>>. Acesso em: 12 de junho de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA, de 2015*. Brasília, ANA, 2015b. Disponível em: <[http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/20150320094225_Minuta20ResoluC3%A7%C3%A3o%20Novas%20Regras%20PBS%20-2010Mar15%20\(3\).pdf](http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/20150320094225_Minuta20ResoluC3%A7%C3%A3o%20Novas%20Regras%20PBS%20-2010Mar15%20(3).pdf)> Acesso em: 11 de agosto de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil 2014: Encarte Especial sobre a Crise Hídrica*. Brasília: ANA, 2014. 31 p. Relatório técnico. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/docs/crisehidrica.pdf>>. Acesso em: 10 de junho de 2016.

ANDRADE, M.H. *Impactos da Produção de arroz inundado sobre a qualidade da água do Rio Paraíba do Sul: Trecho Taubaté*. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2010.

ARAÚJO, J.R.S; NUNAN, G.W. *Ictiofauna do Rio Paraíba do Sul: danos ambientais e sociais causados por barragens, hidrelétricas e poluição no trecho fluminense*. Rio de Janeiro: CPDMA-ALERJ, 2005. 59 p. Relatório técnico.

ARGENTO, M.S.F.; COSTA, D.T.M.A. Os impactos socioambientais da praia de Atafona – litoral Norte Fluminense. In: X ENCONTRO DE GEÓGRAFOS DA AMÉRICA LATINA, 2005, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005, p. 1205-1216.

ARNAUD, F. et al. Historical geomorphic analysis (1932-2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives: the Old Rhine downstream of the Kems diversion dam (France, Germany). *Geomorphology*, v. 236, 163-177, May 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.009>

BASTOS, A.C.; SILVA, C.G. Caracterização morfodinâmica do litoral Norte Fluminense, RJ, Brasil. *Revista Brasileira de Oceanografia*, n. 48(1), p. 41-60, 2000.

BRANDT, S.A. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, v. 40, p. 375-401, March 2000.

BRASIL. Decreto nº 1.842, de 22 de março de 1996. Dispõe sobre a criação do Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Casa Civil, Brasília, DF, 25 mar. 1996. Seção 1, p.1.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Dispõe sobre a criação da Política Nacional de Recursos Hídricos, do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Casa Civil, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Seção 1, p.1.

BRICE, J.C. Channel patterns and terraces of the Loup Rivers in Nebraska. *United States Geological Survey Professional Paper*, 422-D p. 1-41, June 1964.

CARNEIRO, M.E.R. *Transporte de matéria orgânica no estuário do Rio Paraíba do Sul*. 1998. 200 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1998.

CARVALHO, N.O. *Hidrossedimentologia prática*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
CASSAR, J.C.M.; NEVES, C.F. Aplicação das Rosas de Transporte Litorâneo à Costa Norte-Fluminense. *Revista Brasileira de Engenharia*, v.11 p.81-103, 1993.

CHURCH, M. Channel morphology and typology. In: CALOW, P.; PETTS, G.E., ed. *The Rivers handbook: hydrological and ecological principles*. Malden: Blackwell Scientific Publications, 1992. p. 126-143.

CLERICI, A. et al. Morphological changes of the floodplain reach of the Taro River (Northern Italy) in the last two centuries. *Journal of Hydrology*, v. 527, p. 1106-1122, June 2015.

COELHO, V. *Paraíba do Sul: um rio estratégico*. 1. ed. Rio de Janeiro: Casa da Palavra, 2012.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). *Plano Integrado de Recurso Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e Plano de Ação de Recursos Hídricos das Bacias Afluentes: Relatório de Diagnóstico*, Tomos I a 3. Resende: CEIVAP, 2014. 753 p. Relatório técnico. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/planobacia1.php>>. Acesso em: 15 de agosto de 2016.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). *Relatório técnico sobre a situação dos reservatórios com subsídios para ações de melhoria da gestão na bacia do rio Paraíba do Sul*. Resende: CEIVAP, 2010. 184 p. Relatório técnico. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/downloads2011/4-Rel2010SituRes.pdf>>. Acesso em: 30 de março de 2017.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). *Atlas Pluviométrico do Brasil – Arquivos Digitais*. Rio de Janeiro, CPRM, 2016. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>> Acesso em: 15 de agosto de 2016.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, SF-23 (Rio de Janeiro) e SF-24 (Vitória)*. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<http://geociencias.cprm.gov.br/novointegrador/>> Acesso em: 20 de dezembro de 2017.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). *Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/geodiversidade/rjgeologico/geologia_mpgeologica.pdf> Acesso em: 28 de novembro de 2016.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO (DAEE). *Rio Paraíba do Sul: Controle, regularização e aproveitamento de afluentes para irrigação*. São Paulo, DAEE, 2016. Disponível em: <<http://www.daee.sp.gov.br/acervoepesquisa/relatorios/revista/raee0002/valeparaiba.htm>> Acesso em: 17 de agosto de 2016.

DIAS, G.T.M. O Complexo Deltaico do Rio Paraíba do Sul, Rio de Janeiro. In: IV SIMPÓSIO DO QUATERNÁRIO NO BRASIL. Publicação Especial n. 2, 1981, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: CTCQ/SBG, 1981. p. 58-88.

DIAS, G.T.M.; SILVA, C.G. Geologia de depósitos arenosos costeiros emersos – exemplos ao longo do litoral fluminense. In: LACERDA, L. D. et al. (Eds.) *Restingas: Origem, Estrutura e Processos*. Niterói: CEUFF, 1984. P. 47-60.

EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO (EBC). Agência Brasil. *Geral*. Brasília, DF, [2016]. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-02/apos-vazamento-de-residuos-no-paraiba-do-sul-amstras-de-agua-vao-para-analise>>. Acesso em 25 de agosto de 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Anuário Estatístico de Pesquisa Energética 2015. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2015.

ENGEVIX. *Estudo de Impactos Ambientais-Relatório de Impactos Ambientais (EIA-RIMA) de Simplício*. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<http://licenciamento.ibama.gov.br/Hidreletricas/Simplicio/EIA%20-%20RIMA/>>. Acesso em: 10 de junho de 2016.

ESCH, K.F.; NETO, A.S. Análise histórica da pluma de sedimentos do rio Paraíba do Sul utilizando dados orbitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, 2013, Foz do Iguaçu. *Anais...*São José dos Campos: INPE, 2013. p. 5397-5404.

ETCHEBEHERE, M.L.C. et al. Detection of neotectonic deformations along the Rio do Peixe Valley, western São Paulo state, Brazil, based on the distribution of late quaternary allunits. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. v. 6, n. 1, p. 109-114, 2004.

ETCHEBEHERE, M.L.C. *Terraços neo-quaternários no vale do Rio do Peixe, planalto ocidental paulista: implicações estratigráficas e tectônicas*. 2000. 264 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

FEKETE, B. M et al. Millennium Ecosystem Assessment Scenario drivers (1970-2050): Climate and hydrological alterations. *Global Biogeochemical Cycles*, GB0A12, v. 24, p. 1-12, July 2010.

FLORENZANO, T.G. *Imagens de satélites para estudos ambientais*. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

FUJITA, R.H. et al. Perfil longitudinal e a aplicação do índice de gradiente (RDE) no Rio dos Patos, bacia hidrográfica do Rio Ivaí, PR. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 41, p. 597-603, dez. 2011.

FUNDAÇÃO FLORESTAL DA SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO SÃO PAULO (FFSP). *Unidades de Conservação: parques estaduais*. São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://fflorestal.sp.gov.br/unidades-de-conservacao/parques-estaduais/parques-estaduais/>>. Acesso em: 23 de julho de 2016.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS (FURNAS). *UHE de Simplício*. Disponível em: <<http://www.furnas.com.br/hotsites/EnergiaFurnas2016/usinas.html>>. Acesso em: 8 de junho de 2016.

GOOGLE INC. Google Earth Pro. Versão 7.1.5.1557. California, EUA: Google Inc, 2017. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 17 de setembro de 2017.

GOULD, R.W.; ARNONE, R.A. Optical water mass classification for ocean color imagery. In: PROCEEDINGS: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE, CURRENT PROBLEMS IN OPTICS OF NATURAL WATERS, 1, 2003, St. Petersburg. *Anais...* Russia: Levin and G. Gilbert, 2003. p. 1-6.

GROPPO, J.D. *Estudo de tendências nas séries temporais de qualidade de água de rios do Estado de São Paulo com diferentes graus de intervenção antrópica*. 2005. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) – Programa de Pós-graduação da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/ USP, Piracicaba, 2005.

HACK, J.T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Jour. Research U.S. Geol. Survey*, v. 1, n. 4, p. 421-429, July-August, 1973.

HIRSCH, R.M.; SLACK, J.R. A Non-parametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, v. 20, n. 6, p. 727-732, June, 1984.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Agência de notícias: PIB dos Estados e regiões. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/23037-roraima-e-unico-estado-com-crescimento-do-pib-em-2016>>. Acesso em: 03 de dezembro de 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Censo Agropecuário 2006*. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/2006_segunda_apuracao/default_tab_munic_xls.shtm>. Acesso em: 25 de agosto de 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Cidades*. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/>>. Acesso em: 10 de junho de 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Estimativas Populacionais 2015*. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=>>>. Acesso em: 1 de março de 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Informações Ambientais*. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm> Acesso em: 12 de agosto de 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Malhas Municipais 2014*. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <ftp://geofpt.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/> Acesso em: 21 de julho de 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Noções Básicas de Cartografia*. Rio de Janeiro, 1999. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoos/representacao.html>. Acesso em: 14 de dezembro de 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA/ INFRAESTRUTURA NACIONAL DE DADOS ESPACIAIS (IBGE/INDE). *IBGE revê as altitudes dos 7 pontos culminantes*. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.inde.gov.br/noticias-inde/8530-geociencias-ibge-reve-as-altitudes-de-sete-pontos-culminantes.html>> Acesso em: 22 de julho de 2016.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). *Parque Nacional da Serra da Bocaina*. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/visitacao1/unidades-abertas-a-visitacao/197-parque-nacional-serra-da-bocaina>>. Acesso em 23 de julho de 2016.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). *Unidades de Conservação*. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/unidadesdeconservacao/biomas-brasileiros>>. Acesso em 10 de outubro de 2017.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (INEA). *Proposta paulista de transposição das águas da Bacia do rio Paraíba do Sul e segurança hídrica do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: INEA, 2014. 20 p. Relatório técnico.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP), Dados Históricos*. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em 4 de março de 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *Ocorrência de El Niño*. São José dos Campos, 2018. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/tab_elnino.shtml>. Acesso em 06 de julho de 2018.

INSTITUTO TRATA BRASIL (TRATABRASIL). *Situação saneamento Brasil*. São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/saneamento-no-brasil>>. Acesso em 19 de agosto de 2016.

INTERNATIONAL OCEAN COLOR COORDINATING GROUP (IOCCG). *Current oceans color sensors*. Canada, 2018. Disponível em: <<http://ioccg.org/resources/missions-instruments/current-ocean-colour-sensors/>>. Acesso em: 3 de novembro de 2018.

JET PROPULSION LABORATORY (JPL). *Shuttle Radar Topographic Mission*. Virginia, 2016. Disponível em: <<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>> Acesso em: 19 de dezembro de 2017.

- KAMPEL, M.; NOVO, E.M.L.M. O sensoriamento remoto da cor da água. In: SOUZA, R.B. (Org.). *Oceanografia por satélites*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos. Cap. 2, p. 199-218.
- KENDALL, M.G. *Rank correlation methods*. 4 ed. London: Charles Griffin, 1975.
- KONDOLF, G.M. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, v.21, n. 4, p. 533-551, 1997.
- KUNDZEWICZ, Z.W. et al. *Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data*. 1.ed. Geneva: World Meteorological Organization, 2000.
- LEOPOLD, L.B.; WOLMAN, M.G. River channel patterns: braided, meandering and straight. *United States Geological Survey Professional Paper*, 282-B, p. 39-85, 1957. Disponível em: < <https://pubs.usgs.gov/pp/0282b/report.pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2018.
- LIGHT S.A. (LIGHT). *Sistema Light*. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em:< <http://www.light.com.br/grupo-light/Empresas-do-Grupo/light-energia.aspx>>. Acesso em 30 de julho de 2016.
- LIMA, M.I.C. *Análise de drenagem e seu significado geológico-geomorfológico*. 3. ed. Belém: IBGE, 2006.
- LIMA, S.F.S.; BATISTA, G.T. Impacto da represa da Usina Hidrelétrica de Paraibuna, SP, Brasil. *Ambiente e Água*, v.5, n.3, p.208-221, 2010.
- LORD, M.L.; GERMANOSKI, D.; ALLMENDINGER, N.E. Fluvial Geomorphology: Monitoring stream systems in response to a changing environment. In: YOUNG, R.; NORBY, L. *Geological Monitoring*. Boulder: The Geological Society of America, 2009. p. 69-103.
- MARENGO, J.A.; ALVES, L.M. Tendências hidrológicas da Bacia do Rio Paraíba do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.
- MARINI, S. Ilustração adaptada do esquema de classificação fluvial de CHURCH (1992). 2017a. Arte Digital.
- MARINI, S. Ilustração adaptada do esquema de classificação fluvial de SCHUMM (1981). 2017b. Arte Digital.
- MARINI, S. Ilustração elaborada a partir das análises e resultados das alterações morfológicas de vista em planta do RPS. 2017c. Arte Digital.
- MARTIN, L. et al. Le Quaternaire Marin Brésilien (Littoral Pauliste, Sud-fluminense et Bahianais): CATHiers Office de la Recherche Scientifique et Technique d’Outre-Mer. *Sér. Géologie*, v. 11, n. 1, p. 95-124, 1980.
- McCAYE, I.N. Suspended Sediment. In: DYER, K.R. *Estuarine Hydrograph and Sedimentation*. Cambridge: Cambridge University Press, 1979. p. 125-180.
- McCULLY, P. *Silenced Rivers: the ecology and politics of large dams*. Enlarged and Updated ed. London: Zed Books, 1996.

MEDEIROS, P.P. *Avaliação da importância da autocorrelação para a análise de tendências das séries históricas de vazão do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) no Brasil*. 2015. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

MELO, O.A.G.; FUJITA, R.H.; SANTOS, M.L. Análise do perfil longitudinal do Rio Baiano – Assis Chateaubriand – PR a partir da aplicação do índice de gradiente (RDE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13, 2009, Viçosa. *Anais... Viçosa*: UFV, 2009. p. 1-10.

MELLO, F.M. *A História das Barragens no Brasil: séculos XIX, XX e XXI*. 1. Ed. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2011.

MILLER, R.L.; MCKEE, B.A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, v. 93, p. 259-266, July 2004.

MILLIMAN, J.D. Blessed dams or damned dams? *Nature*, v. 386, p. 325-327, March 1997.

MILLIMAN, J.D.; MEADE, R.H. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*, v. 91, p. 1-21, January 1983.

MINAS GERAIS. Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. *Diário do Executivo de Minas Gerais*, DO/MG, Minas Gerais, MG, 30 jan. 1999. Seção 1, p.1.

MOREL, A.; PRIEUR, L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, v. 22, p. 709-722, July 1977.

MOUNT, N.J. et al. Estimation of error in bankfull width comparisons from temporally sequenced raw and corrected aerial photographs. *Geomorphology*, v. 56, p. 65-77, December 2003.

MUEHE, D. Aspectos gerais da erosão costeira no Brasil. *Mercator*, ano 4, n. 7, p. 97-110, jun. 2005.

MUEHE, D. *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. 1. ed. Brasília: IBAMA-MMA, 2006.

MUELLER, J.E. An introduction to the hydraulic and topographic sinuosity indexes. *Annals of the Association of American Geographers*, v. 58:2, p. 371-385, June 1968.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). *SeaDAS software*. Versão 7.5.1. EUA. Disponível em: <<https://seadas.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 14 de agosto de 2018.

OLIVEIRA, E.N. *Impacto de barragens sobre a dispersão de matéria e a sustentabilidade da pluma costeira do rio São Francisco (SE/AL): análise espacial e temporal por sensoriamento remoto*. 2009. 153 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2009.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Acompanhamento Semanal – Novas Instalações ao Sistema Interligado Nacional*. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.ons.org.br/resultados_operacao/boletim_semanal/2013_06_07/instalacoes.htm>. Acesso em: 19 de junho de 2016.

PATRIANI, L.; CUNHA, V. *Paraíba do Sul: história de um rio sobrevivente*. 1. ed. São Paulo: Horizonte, 2010.

PEIRY, J.L.; NOUGUIER, F. Le Drac dans l'agglomération de Grenoble : première évaluation des changements géomorphologiques contemporains. *Revue de Géographie Alpine* v. 2, 77-96, 1994. Disponível em: <http://www.persee.fr/doc/rga_0035-1121_1994_num_82_2_3752>. Acesso em: 5 fev. 2018.

QGIS. *Quantum GIS software livre*. Versão 2.18. Las Palmas: 2016. Disponível em: <https://www.qgis.org/pt_BR/site/>. Acesso em: 2 de março de 2016.

R PROJECT. The R Project for statistical computing. Versão 3.4.4. Viena, Áustria: R Foundation, 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org/about.html>>. Acesso em: 10 de março de 2018.

REIS, B.J. et al. Influência das cavas de extração de areia no balanço hídrico do vale do Paraíba do Sul. *Revista Escola de Minas*, v. 59, n. 4, p. 1-7, Outubro/Dezembro 2006.

REIS, R.S. et al. Uso de imagens Landsat e dados de campo para avaliar a distribuição espacial de material em suspensão em reservatórios do semi-árido brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. *Anais...São José dos Campos: INPE, 2005*. p. 2569-2577.

RIO DE JANEIRO. Lei n° 3.239, de 2 de agosto de 1999. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro, da Criação do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. *Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro*, DOERJ, Rio de Janeiro, RJ, 4 ago. 1999. Seção 1, p.1.

ROYAL BELGIAN INSTITUTE OF NATURAL SCIENCES (RBINS). *ACOLITE software*. Versão 20180925. Bélgica: REMSEM, 2018. Disponível em: <<https://odnature.naturalsciences.be/remsem/software-and-data/acolite>>. Acesso em 12 de julho de 2018.

SANTOS, A.R. A tectônica e as formas de relevo. In: FLORENZANO, T.G. (Org.) *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 129-158.

SÃO PAULO. Lei n° 7.663, de 30 de dezembro de 1991. Estabelece normas à Política de Recursos Hídricos e ao Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, DOSP, São Paulo, SP, 30 dez. 1991. Seção 1, p.1.

SCHUMM, S.A. Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. *Geological Society of America Bulletin*, v. 74, p. 1089-1100, September, 1963.

SCHUMM, S.A. Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications. *SEPM Special Publication*, v. 31, p. 19-29, August, 1981.

SCORPIO, V. et al. River channel adjustments in Southern Italy over the past 150 years and implications for channel recovery. *Geomorphology*, v. 251, p. 77-90, December 2015.

SILVA, C.G. Complexo Deltaico do Rio Paraíba do Sul (Roteiro de Excursão Geológica). In: I SIMPÓSIO DE GEOLOGIA REGIONAL RJ-ES, 1987, Rio de Janeiro. *Anais...Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia – Núcleo RJ/ES*, 1987, p.299-346.

SILVA, G.B.S.; SIMI, R.; RUDORFF, B.F.T. Monitoramento da extração de areia nos municípios não pertencentes ao Zoneamento Ambiental Minerário do trecho paulista da várzea do rio Paraíba do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. *Anais...São José dos Campos: INPE*, 2011. p. 6465-6471.

SILVA, O.F.; NOVO, E.; KRUG, T. Distribuição espaço-temporal dos totais sólidos em suspensão do reservatório Tucuruí/PA através de dados *in situ* e TM-Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996, Salvador. *Anais...São José dos Campos: INPE*, 1996. p. 387-392.

SINHA, M. et al. Impact of Farakka Barrage on the hydrology and fishery of Hooghly Estuary. *Estuaries*, v. 19, p. 710-722, September 1996.

SIQUEIRA, M. Canal Campos-Macaé, uma incrível obra de engenharia. *O Debate Diário de Macaé*, Macaé, 30 jul. 2012. Notícias, p. 1-2. Disponível em: <<http://www.odebateon.com.br/site/noticia/detalhe/24281/canal-macae-campos-uma-incrivel-obra-de-engenharia>>. Acesso em: 20 de agosto de 2016.

SOUZA et al. Use of multitracers for the study of water mixing in the Paraíba do Sul River estuary. *Journal of Environmental radioactivity*, v. 101, p. 564-570, 2010.

SU, T et al. Comparison of channel geometry changes in Inner Mongolian reach of the Yellow River before and after joint operation of large upstream reservoirs. *Geographical Sciences*, v. 25 (8), p. 930-942, March, 2015.

SURIAN, N.; RINALDI, M.; PELLEGRINI, L. *Linee guida per l'analisi geomorfologica degli alvei fluviali e delle loro tendenze evolutive*. Università di Padova: Coop. Libreria Editrice, 2009.

SYVITSKI, J. et al. Impacts of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, v. 308, p. 376-380, April 2005.

TEODORO, A.C.; VELOSO-GOMES, F. Utilização de imagens de satélite na determinação de sedimentos suspensos totais em zonas costeiras. In: SEGUNDA JORNADA DE HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE, Porto. *Anais... Porto: FEUP*, 2007. p. 129-138.

TROIANI, F. et al. Spatial analysis of stream length-gradient (*SL*) index for detecting hillslope processes: A case of the Gállego River headwaters (Central Pyrenees, Spain). *Geomorphology*, v. 214, p. 183-197, June, 2014.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Acervo de Imagens de Satélite*. Virginia, 2018. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>> Acesso em: 28 de setembro de 2018.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Comparison between landsat 8 and previous landsat satellites*. Virginia, 2018[a]. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/how-does-landsat-8-differ-previous-landsat-satellites>> Acesso em: 18 de outubro de 2018.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Using the USGS Landsat Level 1 Product*. Virginia, 2018[b]. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product>> Acesso em: 29 de outubro de 2018.

VALÉRIO, A.M.; KAMPEL, M. Uso de imagens LISS-III para a caracterização espectral da pluma do Rio Paraíba do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, 2013, Foz do Iguaçu. *Anais...São José dos Campos*: INPE, 2013. p. 5353-5360.

VANHELLEMONT, Q; RUDDICK, K. Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications. *Remote Sensing of Environment*, v. 216, p. 587-597, July 2018.

WARRICK, J.A. et al. Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: Source-to-sink sediment budget and synthesis. *Geomorphology*, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.010>>. Acesso em: 08 mai. 2015.

WILLIAMS, G.P. The case of the shrinking channels – the North Platte and Platte Rivers in Nebraska. *United States Geological Survey Circular*, 781, 48 pp., 1978. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/circ/1978/0781/report.pdf>>. Acesso em: 4 fev. 2018.

WILLIAMS, G.P.; WOLMAN, M.G. Downstream effects of dams on alluvial rivers. *United States Geological Survey Professional Paper*, 1286 (83), p. 54-74, 1984. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.277.5322.9j>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

WRIGHT, L.D. Sediment transport and deposition at river mouths: a synthesis. *Geological Society of America Bulletin*, v. 88, p. 857-868, June 1977.

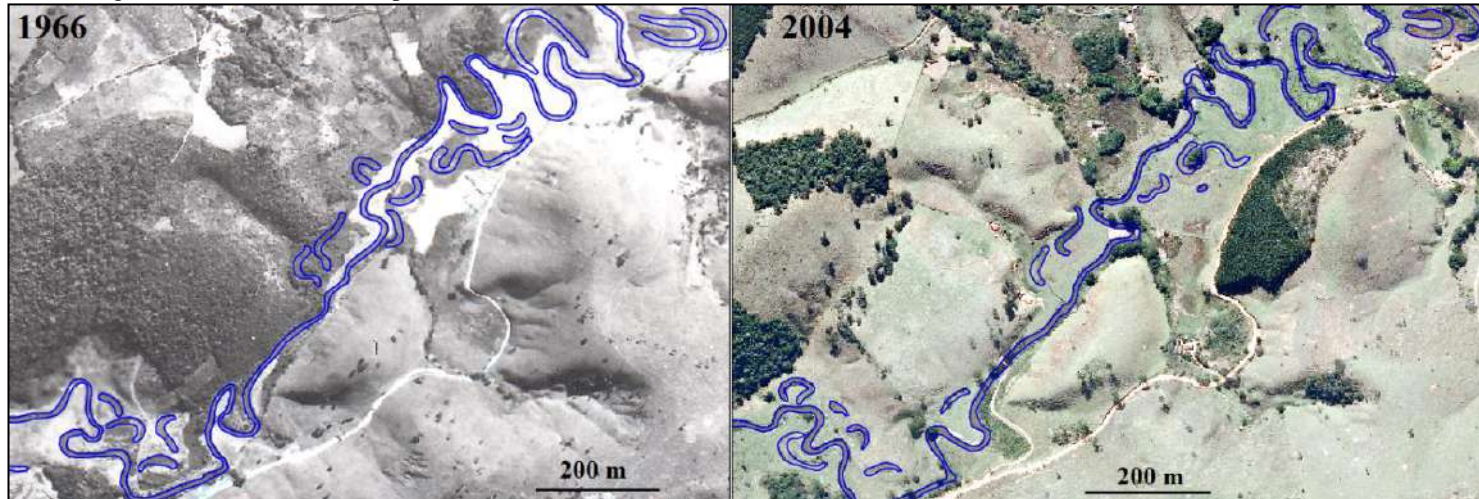
WRIGHT, L.D.; NITTROUER, C.A. Dispersal of river sediments in coastal seas: six contrasting cases. *Estuaries*, v. 18(3), p. 494-508, September 1995.

ZALAN, P.V.; OLIVEIRA, J.A.B. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes cenozoicos do sudeste do Brasil. *Boletim de Geociências-PETROBRAS*, v. 13(2), p. 269-300, maio/novembro 2005.

ZOFFOLI, M.L.; KAMPEL, M.; FONSECA, L.M.G. Caracterização da pluma de sedimentos do rio Doce (ES) utilizando dados TM – Landsat 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. *Anais...São José dos Campos*: INPE, 2011. p. 5025-5031.

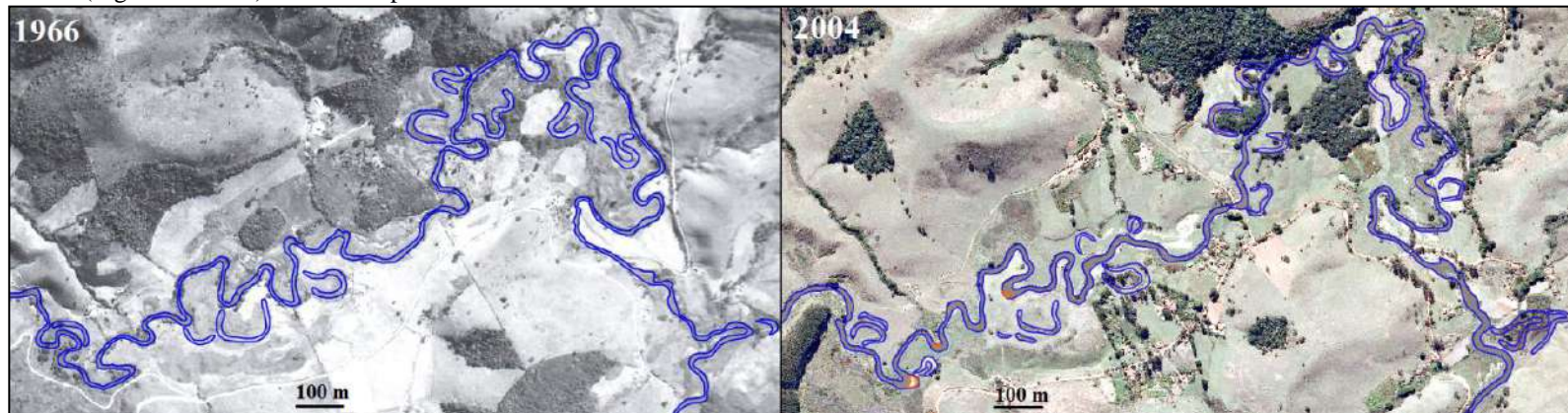
APÊNDICE A – Áreas 5 e 6 do curso superior

Área 5 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



Fonte: A autora, 2019.

Área 6 (Figuras 36 e 37) do curso superior.

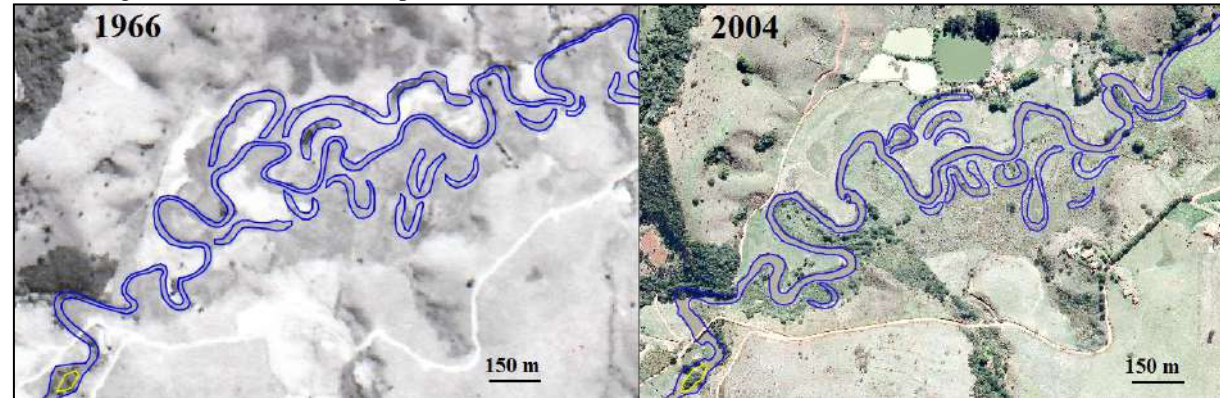


OBS.: Pequenas barras de pontal (em laranja) presentes na foto de 2004.

Fonte: A autora, 2019.

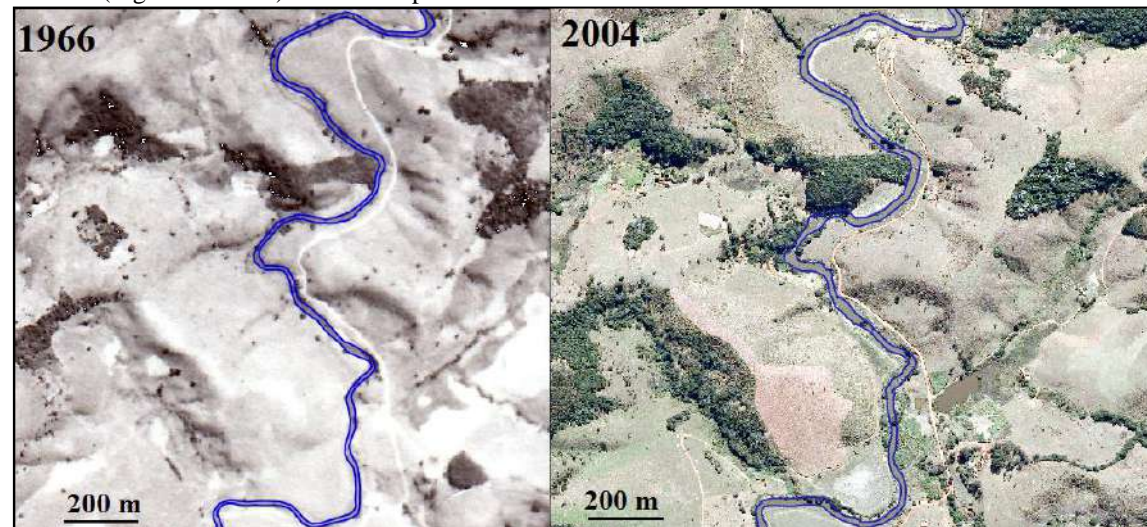
APÊNDICE B – Áreas 9 e 10 do curso superior

Área 9 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



Fonte: A autora, 2019.

Área 10 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



Fonte: A autora, 2019.

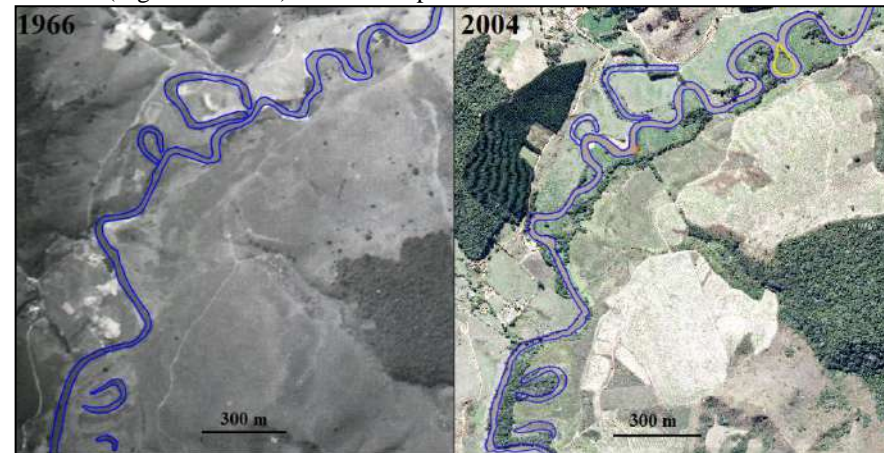
APÊNDICE C – Áreas 11 e 12 do curso superior

Área 11 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



OBS.: Observa-se o aparecimento de uma barra arenosa (em laranja) mais recentemente.
Fonte: A autora, 2019.

Área 12 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



OBS.: Uma ilha (em amarelo) e uma barra arenosa (em laranja) surgiram em 2004.
Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE D – Principais alterações morfológicas no curso superior do RPS

MUDANÇAS MORFOLÓGICAS OBSERVADAS NAS ÁREAS 1 A 20 DO CURSO SUPERIOR, DE 1966 A 2004.			
Área	Localização	Padrão	Alterações observadas ao longo do tempo
1	Menos de 10 km a jusante da nascente	Sinuoso	Sem alteração morfológica significativa. Diminuição de 3 m na largura média do canal.
2	15 km a jusante da nascente	Meandrante	Algumas alterações morfológicas; surge primeiro meandro abandonado. Diminuição de 2 m na largura média do canal.
3	17 km a jusante da nascente	Meandrante	Muitas mudanças morfológicas; vários meandros abandonados (antigos e recentes). Diminuição de 1 m na largura média do canal.
4	25 km a jusante da nascente	Meandrante	Muitas mudanças morfológicas; vários meandros abandonados (antigos e recentes). Revitalização de meandros abandonados. Aumento de 1 m na largura média do canal.
5	35 km a jusante da nascente	Meandrante	Muitas mudanças morfológicas; vários meandros abandonados (antigos e recentes). Diminuição de 2 m na largura média do canal.
6	60 km a jusante da nascente	Meandrante	Muitas mudanças morfológicas; vários meandros abandonados (antigos e recentes). Aumento de 1 m na largura média do canal.
7	70 km a jusante da nascente	Sinuoso	Poucas alterações entre a morfologia fluvial pretérita e a mais recente. Ilhas preservadas. Aumento de 1 m na largura média do canal.
8	75 km a jusante da nascente	Sinuoso	Poucas alterações morfológicas. Barras arenosas preservadas, embora com redução no tamanho da área emersa. Aumento de 4 m na largura média do canal.
9	Porção mediana do curso superior, a montante dos reservatórios	Meandrante	Muitas mudanças morfológicas; vários meandros abandonados (antigos e recentes). Aumento de 1 m na largura média do canal.
10	Porção mediana do curso superior, a montante dos reservatórios	Sinuoso	Sem alterações significativas; observa-se aumento de 9 m na largura média do canal.

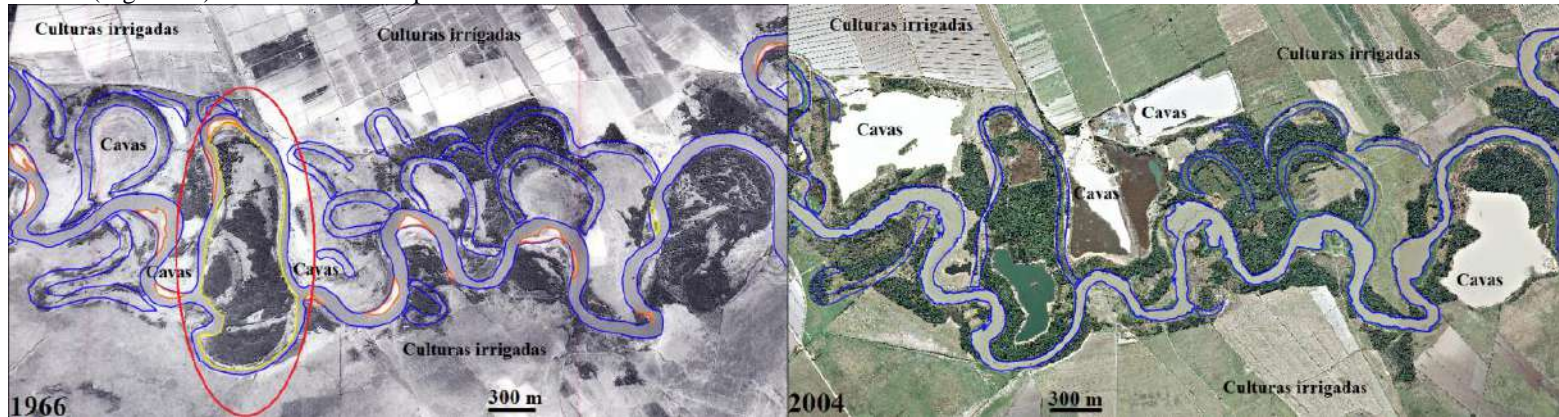
Principais alterações morfológicas no curso superior do RPS (continuação).

MUDANÇAS MORFOLÓGICAS OBSERVADAS NAS ÁREAS 1 A 20 DO CURSO SUPERIOR, DE 1966 A 2004.			
Área	Localização	Padrão	Alterações observadas ao longo do tempo
11	Porção mediana do curso superior, a montante dos reservatórios	Sinuoso/retilíneo	Poucas alterações morfológicas; observa-se aumento de 9 m na largura média do canal e o aparecimento de uma barra arenosa.
12	Porção mediana do curso superior, a montante dos reservatórios	Meandrante	Novas mudanças no curso fluvial. Presença de meandros abandonados, surgimento de ilha após alteração no curso fluvial. Aumento de 1 m na largura média do canal.
13	Porção mediana do curso superior, a montante dos reservatórios	Sinuoso/meandrante	Poucas alterações morfológicas. Aumento de 3 m na largura média do canal e no tamanho de algumas ilhas já existentes anteriormente.
14	Porção mediana do curso superior, a montante dos reservatórios	Sinuoso/meandrante	Poucas alterações morfológicas. Desaparecimento de algumas ilhas. Aumento de 4 m na largura média do canal.
15	8 km a montante do reservatório de Paraibuna	Meandrante	Muitas alterações morfológicas; presença de meandros. Aumento de 5 m na largura média do canal com a proximidade dos reservatórios a jusante.
16	1 km a montante do reservatório de Paraibuna	Sinuoso/meandrante	Aumento de 54 m na largura média do canal em função do aumento no volume de água após a inundação do reservatório de Paraibuna, a jusante. Desaparecimento de ilhas.
17	No reservatório de Paraibuna	Antigo curso fluvial (foto de 1966) e área alagada do reservatório (foto de 2004)	Grandes mudanças morfológicas com a inundação da área do canal: desaparecimento de ilhas, surgimento de novas ilhas (topos de morros), aumento do volume de água.
18	No reservatório de Santa Branca	Área alagada do reservatório em ambas as fotografias	Poucas alterações morfológicas; reservatório de Santa Branca já existia nos dois registros fotográficos.
19	Menos de 1 km a jusante do reservatório de Santa Branca	Sinuoso	Poucas mudanças morfológicas no canal fluvial; aumento de tamanho de algumas ilhas e surgimento de outras; surgimento de barra arenosa. Diminuição de 11 m na largura média do canal fluvial.
20	10 km a jusante do reservatório de Santa Branca	Sinuoso	Poucas mudanças morfológicas no canal fluvial; surgimento de novas ilhas e barras arenosas. Diminuição de 2 m na largura média do canal fluvial.

Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE E – Áreas 5 e 6 do curso médio superior

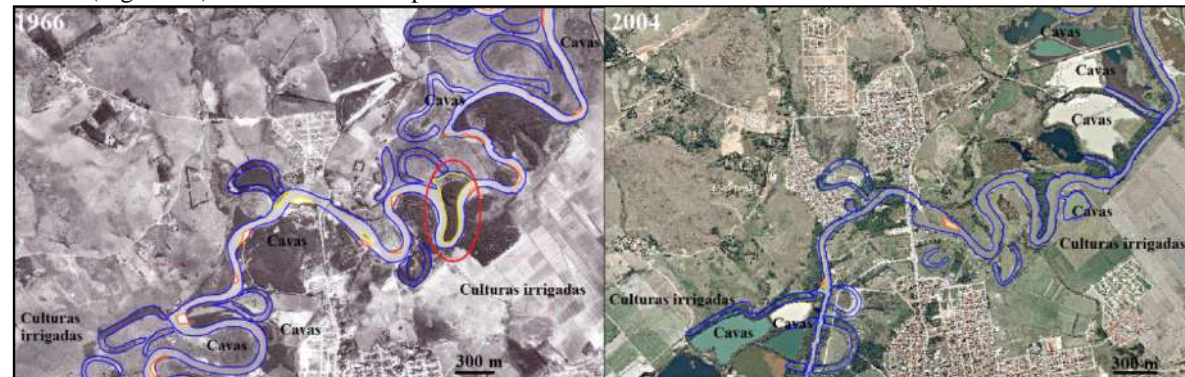
Área 5 (Figura 64) do curso médio superior.



OBS.: Barras de pontal (em laranja) e ilhas (em amarelo). Uma grande ilha (circulada em vermelho) foi incorporada às margens do canal após a desconexão de um braço do RPS do curso fluvial principal, tornando-se um meandro abandonado.

Fonte: A autora, 2019.

Área 6 (Figura 64) do curso médio superior.



OBS.: Barras de pontal (em laranja) e ilhas (em amarelo). Uma grande ilha (circulada em vermelho) foi incorporada às margens do canal após desconexão de um braço do curso fluvial principal, tornando-se um meandro abandonado.

Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE F – Áreas 7 e 8 do curso médio superior

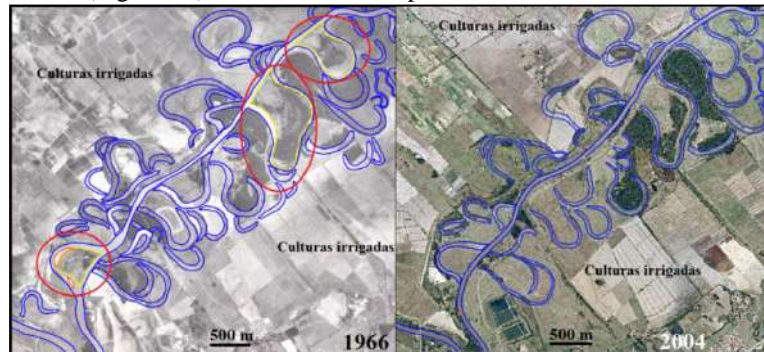
Área 7 (Figura 64) do curso médio superior.



OBS.: Barras de pontal (em laranja) e ilhas (em amarelo) na fotografia antiga não estão presentes na fotografia recente. Três ilhas (circuladas em vermelho) foram incorporadas às margens do canal após a desconexão de três braços do curso fluvial principal, tornando-se meandros abandonados.

Fonte: A autora, 2019.

Área 8 (Figura 64) do curso médio superior.

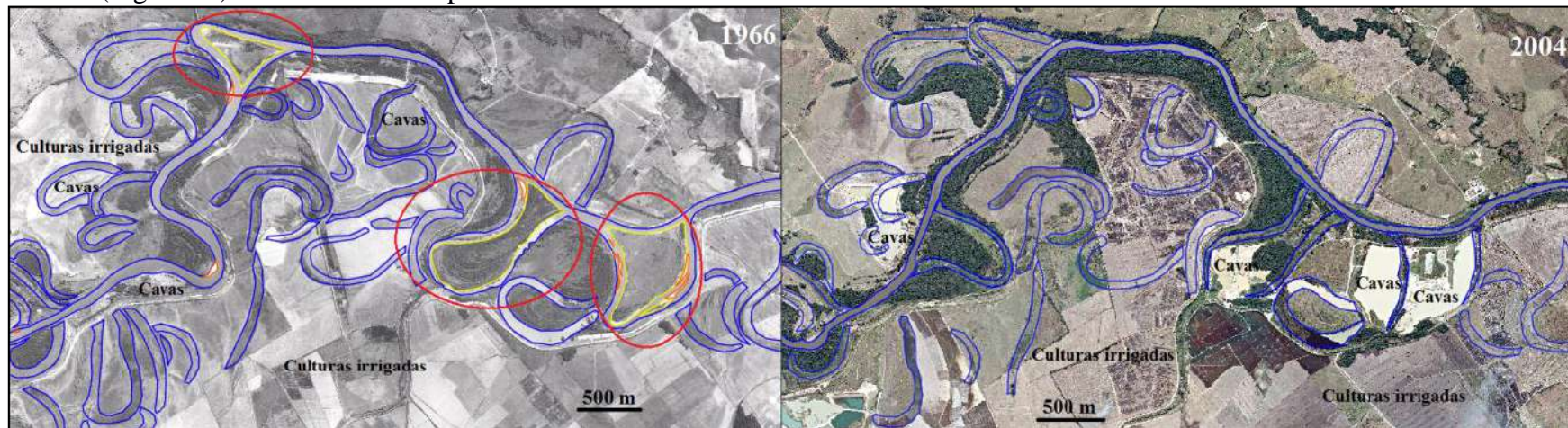


OBS.: Barras de pontal e central (em laranja) e ilhas (em amarelo). Três ilhas (circuladas em vermelho) incorporadas às margens do canal após desconexão de três braços do curso principal.

Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE G – Área 9 do curso médio superior

Área 9 (Figura 64) do curso médio superior.



OBS.: Barras arenosas (em laranja) e ilhas (em amarelo) na fotografia antiga não estão presentes na fotografia recente. Três ilhas (circuladas em vermelho) foram incorporadas às margens do canal após a desconexão de três braços do RPS do curso fluvial principal, tornando-se meandros abandonados.

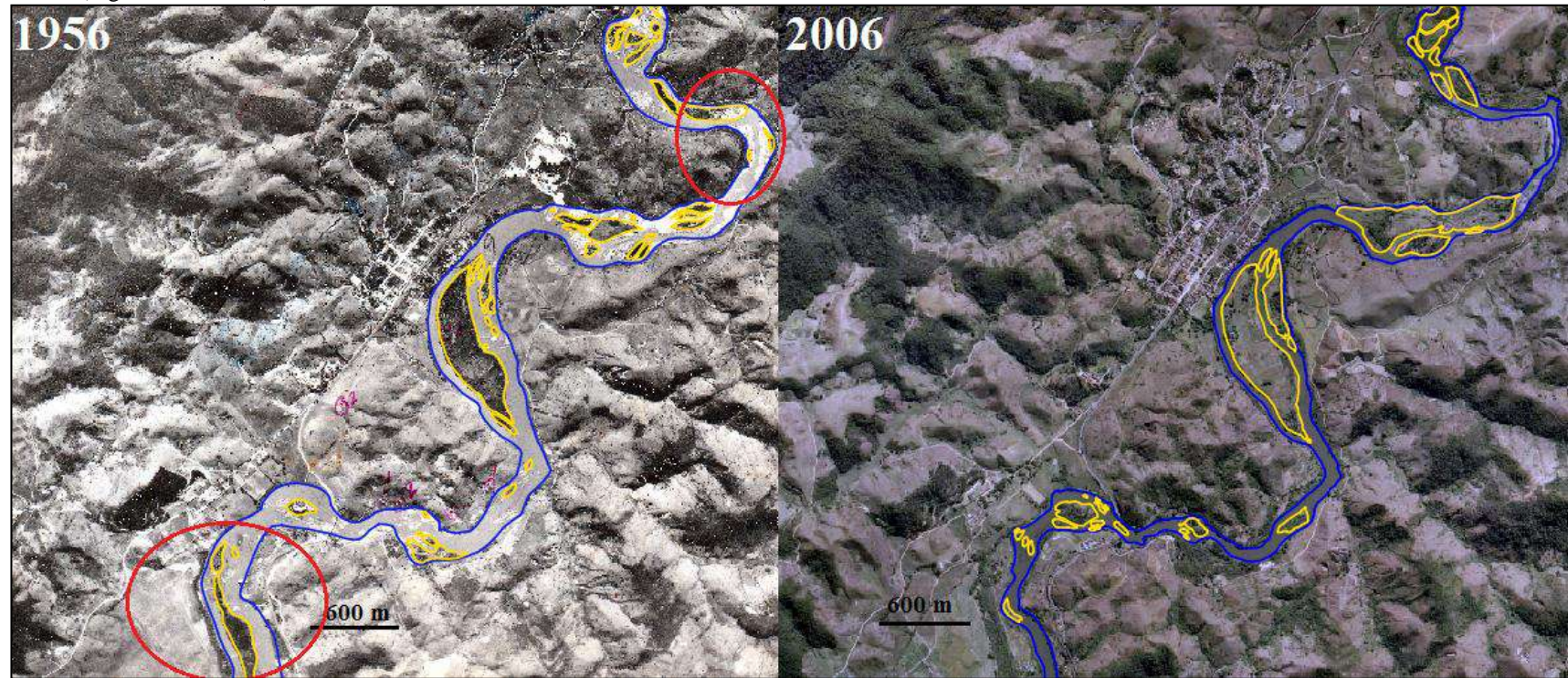
APÊNDICE H - Principais alterações morfológicas no curso médio superior do RPS

MUDANÇAS MORFOLÓGICAS OBSERVADAS NAS ÁREAS 1 A 11 DO CURSO MÉDIO SUPERIOR DO RPS, DE 1966 A 2004			
Área	Localização	Padrão	Alterações observadas ao longo do tempo
1	Parte mais a montante do curso médio superior, 50 km a jusante do reservatório de Santa Branca.	Sinuoso	Diminuição de 12 m na largura média e aparecimento de ilha.
2	25 km a jusante da área 1.	Meandrante	Diminuição de 70 m na largura média, meandros abandonados. Agricultura irrigada e cavas de areia
3	8 km a jusante da área 2.	Meandrante	Diminuição de 70 m na largura média, meandros abandonados. Barras de pontal incorporadas às margens do canal. Agricultura irrigada e cavas de areia
4	12 km a jusante da área 3.	Meandrante	Diminuição de 100 m na largura média do canal. Meandros abandonados. Ilhas e barras de pontal incorporadas às margens do canal. Agricultura irrigada e cavas de areia.
5	13 km a jusante da área 4.	Meandrante	Diminuição de 15 m na largura média do canal. Meandros abandonados. Uma ilha e barras de pontal incorporadas às margens do canal. Agricultura irrigada e cavas.
6	7 km a jusante da área 5.	Meandrante	Diminuição de 36 m na largura média do canal. Meandros abandonados. Uma ilha e barras de pontal incorporadas às margens do canal. Agricultura irrigada e cavas.
7	44 km a jusante da área 6.	Meandrante	Diminuição de 18 m na largura média do canal. Meandros abandonados. Três ilhas e barras de pontal incorporadas às margens do canal. Agricultura irrigada e cavas.
8	12 km a jusante da área 7.	Meandrante	Diminuição de 24 m na largura média do canal. Meandros abandonados. Três ilhas e barras de pontal incorporadas às margens do canal. Agricultura irrigada.
9	12 km a jusante da área 8.	Meandrante	Diminuição de 37 m na largura média do canal. Meandros abandonados. Três ilhas e barras de pontal incorporadas às margens do canal. Agricultura irrigada e cavas.
10	35 km a jusante da área 9.	Sinuoso/meandrante.	Diminuição de 53 m na largura média do canal. Meandros abandonados. Uma ilha e barras de pontal incorporadas às margens do canal. Agricultura irrigada.
11	17 km a jusante da área 10. Porção final do curso médio superior.	Sinuoso/retilíneo	Diminuição de 37 m na largura média do canal. Sem meandros abandonados. Manutenção de algumas ilhas e incorporação de outras às margens do canal

Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE I – Área 7 do curso médio inferior

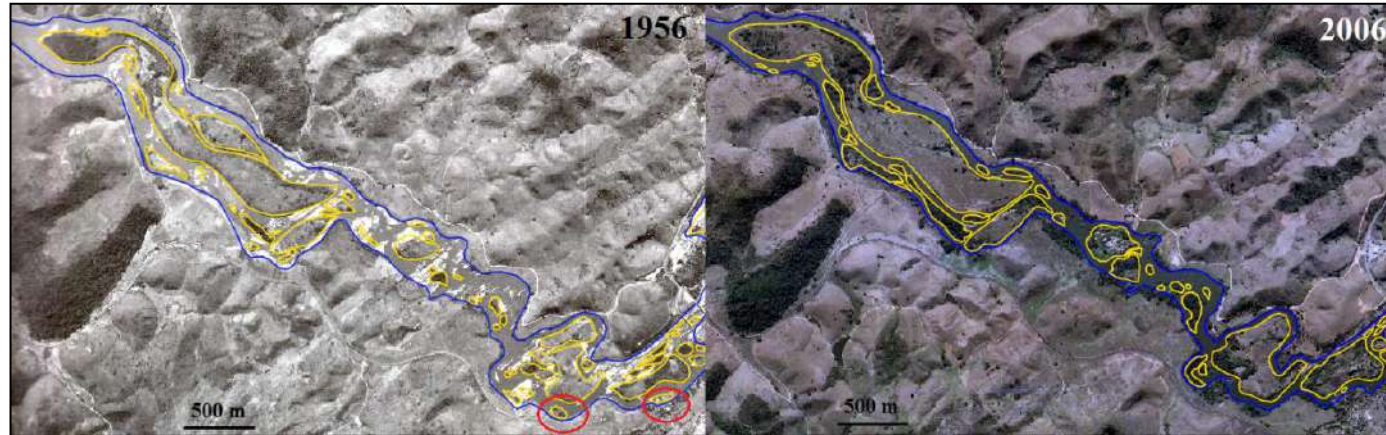
Área 7 (Figuras 100 e 102) do curso médio inferior.



OBS.: Desaparecimento de algumas ilhas (em amarelo) e aumento na dimensão de outras. Incorporação de ilhas às margens do canal (circuladas em vermelho).
Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE J – Áreas 8 e 9 do curso médio inferior

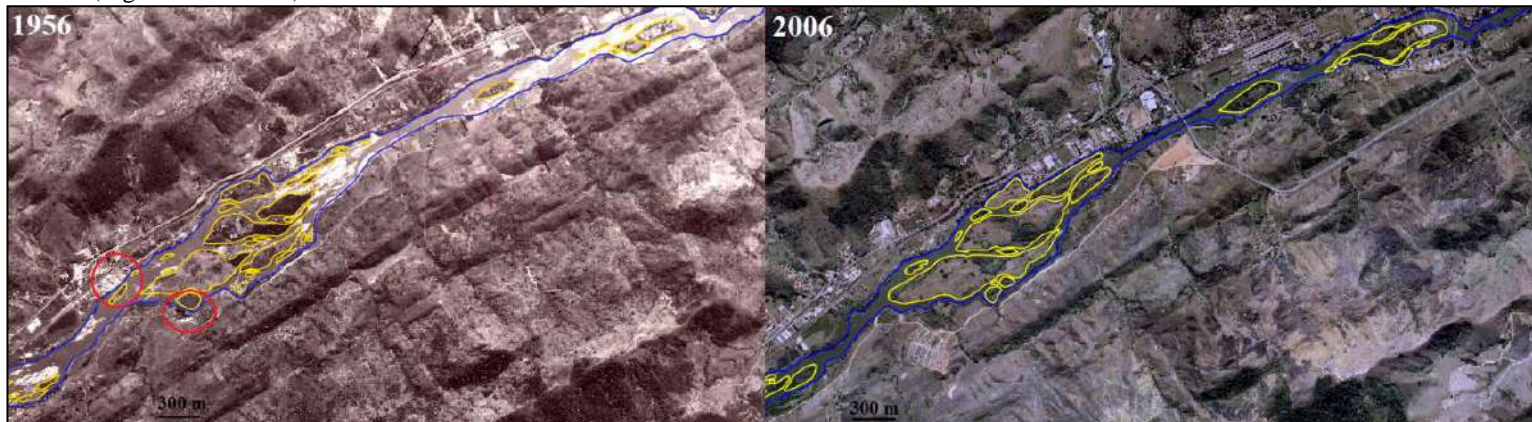
Área 8 (Figuras 100 e 102) do curso médio inferior.



OBS.: Desaparecimento de algumas ilhas (em amarelo) e aumento na dimensão de outras. Incorporação de ilhas às margens do canal (circuladas em vermelho).

Fonte: A autora, 2019.

Área 9 (Figuras 101 e 103) do curso médio inferior.

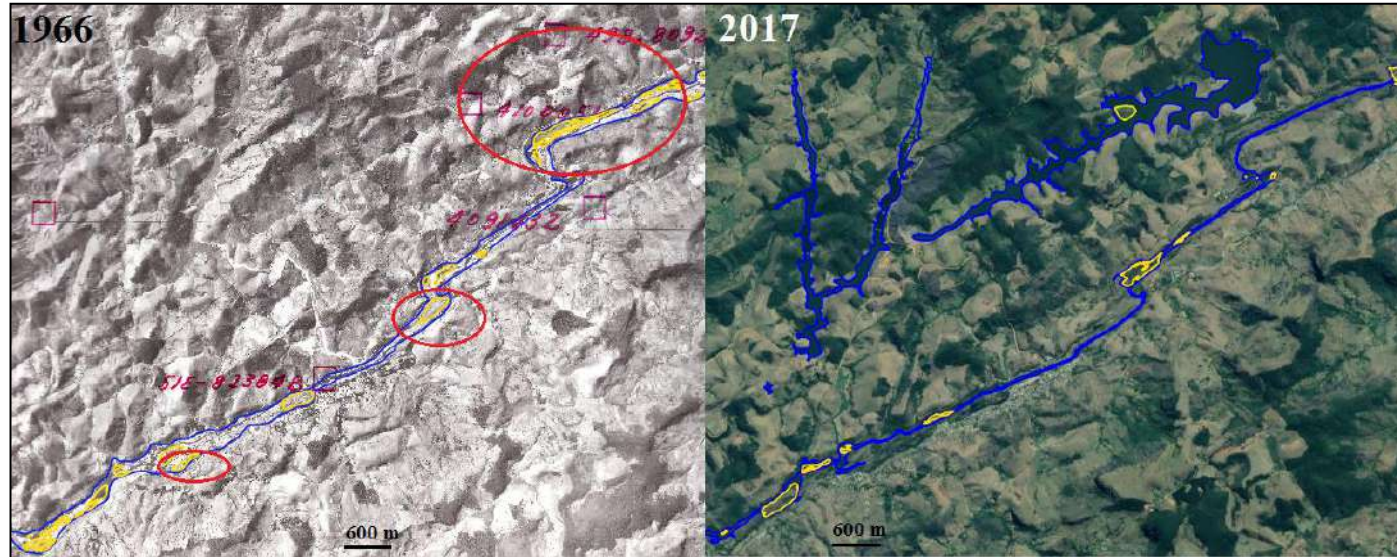


OBS.: Desaparecimento de algumas ilhas (em amarelo) e aumento na dimensão de outras. Incorporação de ilhas às margens do canal (circuladas em vermelho).

Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE L – Áreas 11 e 12 do curso médio inferior

Área 11 (Figuras 101 e 103) do curso médio inferior.



OBS.: As anotações em vermelho na fotografia de 1966 foram feitas pelos reambuladores do IBGE, e não foram apagadas para não danificar o material original. Na imagem de 2017 é possível ver, na parte superior, os canais alagados que recebem, por meio de túneis, a água do reservatório de Anta para alimentar as turbinas da UHE de Simplício.

Fonte: A autora, 2019.

Área 12 (Figuras 101 e 103) do curso médio inferior (UHE Ilha dos Pombos, representada como uma barra vermelha).

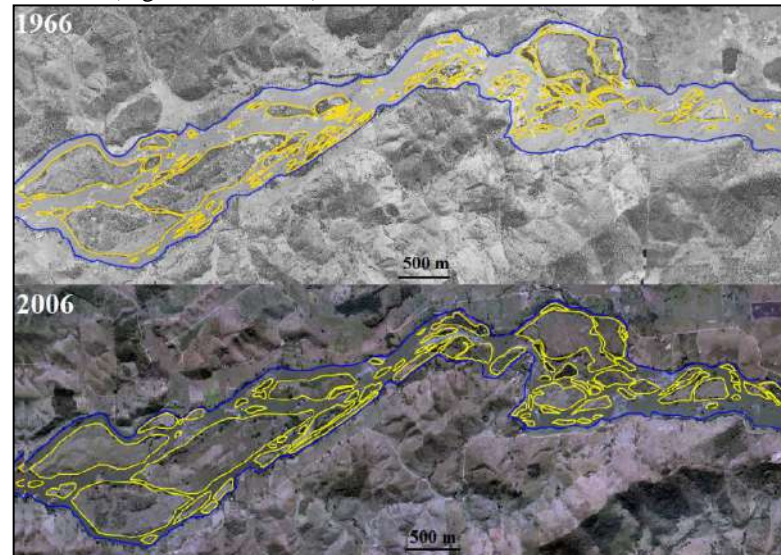


OBS.: Incorporação de ilhas às margens do canal (circuladas em vermelho na foto de 1966).

Fonte: A autora, 2019.

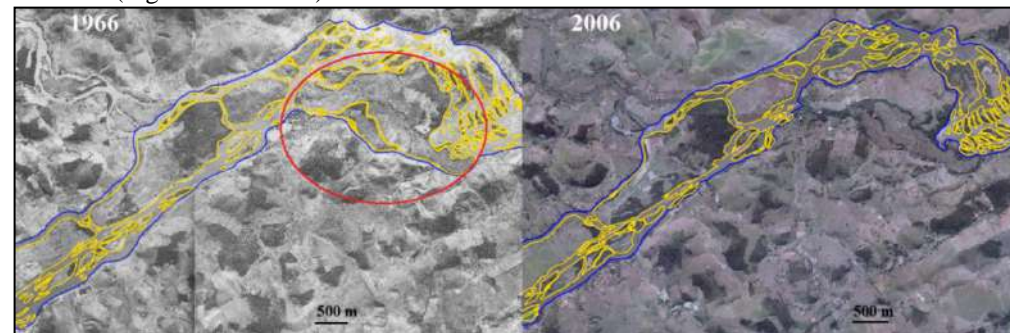
APÊNDICE M – Áreas 13 e 14 do curso médio inferior

Área 13 (Figuras 101 e 103) do curso médio inferior.



Fonte: A autora, 2019.

Área 14 (Figuras 101 e 103) do curso médio inferior.



OBS.: Incorporação de ilhas às margens do canal (circuladas em vermelho na fotografia de 1966).
Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE N – Principais alterações morfológicas no curso médio inferior do RPS

MUDANÇAS MORFOLÓGICAS OBSERVADAS NAS ÁREAS 1 A 14 DO CURSO MÉDIO INFERIOR DO RPS, DE 1956 A 2017			
Área	Localização	Padrão	Alterações observadas ao longo do tempo
1	Início do curso médio inferior.	Sinuoso	Diminuição de 17 m na largura média do canal fluvial. Aumento na quantidade de ilhas e na área emersa das ilhas existentes; fusão de pequenas ilhas.
2	8 km a jusante da Área 1.	Sinuoso	Diminuição de 12 m na largura média do canal. Aumento na quantidade de ilhas e na área emersa das ilhas existentes, fusão de pequenas ilhas.
3	8 km a jusante da Área 2 e 20 Km a montante da UHE Funil.	Sinuoso/retilíneo	Aumento de 59 m na largura média do canal graças à influência do reservatório da UHE Funil. Desaparecimento de pequenas ilhas e surgimento de novas ilhas com o alagamento das áreas marginais ao canal.
4	Área atualmente ocupada pelo reservatório da UHE Funil.	Área alagada do reservatório de Funil.	Alterações drásticas das condições hidrológicas e morfológicas do canal.
5	60 km a jusante do reservatório de Funil.	Sinuoso/retilíneo.	Diminuição de 73 m na largura média do canal. Aumento do tamanho das ilhas (após a fusão de algumas delas) e incorporação de outras às margens do canal.
6	130 km a jusante do reservatório de Funil; neste trecho foi construída a UEL Santa Cecília, onde ocorre a transposição de 2/3 das águas do RPS para o rio Guandu.	Sinuoso.	Diminuição de 93 m na largura média do canal. Aumento do tamanho de algumas ilhas (como resultado do aumento da área emersa das mesmas e também fusão de algumas ilhas após a diminuição do volume d'água). Desaparecimento de outras ilhas com a diminuição da largura do canal fluvial.
7	160 km a jusante do reservatório de Funil e a 30 km da UEL Santa Cecília.	Sinuoso/entrelaçado.	Diminuição de 100 m na largura média do canal. Desaparecimento de algumas ilhas e aumento na dimensão de outras. Incorporação de ilhas às margens do canal.
8	210 km a jusante do reservatório de Funil e a 80 km da UEL Santa Cecília.	Sinuoso/entrelaçado.	Diminuição de 71 m na largura média do canal. Desaparecimento de algumas ilhas e aumento na dimensão de outras. Incorporação de ilhas às margens do canal.
9	250 km a jusante do reservatório de Funil e a 130 km da UEL Santa Cecília.	Retilíneo/entrelaçado.	Diminuição de 91 m na largura média do canal. Desaparecimento de algumas ilhas e aumento na dimensão de outras. Incorporação de ilhas às margens do canal.

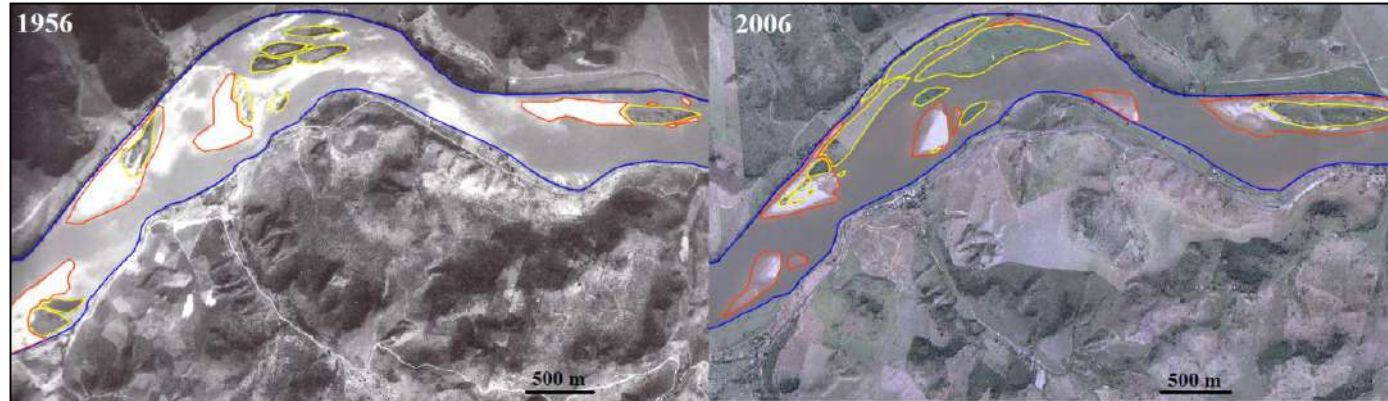
Principais alterações morfológicas no curso médio inferior do RPS (continuação).

MUDANÇAS MORFOLÓGICAS OBSERVADAS NAS ÁREAS 1 A 14 DO CURSO MÉDIO INFERIOR DO RPS, DE 1956 A 2017			
Área	Localização	Padrão	Alterações observadas ao longo do tempo
10	Área hoje ocupada pelo AHE de Simplício, onde foi construída a barragem e reservatório de Anta.	A montante da barragem, alteração nas características morfológicas naturais. A jusante, retilíneo/entrelaçado.	A montante da barragem houve aumento de 181 m na largura média do canal e desaparecimento de ilhas. A jusante da barragem houve diminuição de 73 m na largura média do canal, incorporação de ilhas às margens e aumento da dimensão de outras.
11	Porção final do trecho ocupado pelo AHE de Simplício, a jusante da barragem.	Retilíneo/entrelaçado.	Diminuição de 206 m na largura média do canal. Incorporação de ilhas às margens do canal, fusão de ilhas e aumento da área emersa de outras.
12	17 km a jusante do AHE de Simplício. Nesta área está localizada a UHE Ilha dos Pombos.	Retilíneo.	Diminuição de 63 m na largura média do canal. Incorporação de ilhas às margens do canal e aumento na área emersa de outras.
13	60 km a jusante do AHE de Simplício.	Sinuoso/anastomosado.	Diminuição de 49 m na largura média do canal. Aumento no tamanho das ilhas em função da fusão de ilhas e aumento da superfície emersa das mesmas.
14	80 km a jusante do AHE de Simplício.	Sinuoso/anastomosado.	Diminuição de 309 m na largura média do canal. Aumento no tamanho das ilhas em função da fusão de ilhas, aumento da superfície emersa das mesmas e incorporação de ilhas às margens fluviais.

Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE O – Áreas 3 e 4 do curso inferior

Área 3 do curso inferior.



Fonte: A autora, 2019.

Área 4 do curso inferior.



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

Fonte: A autora, 2019.

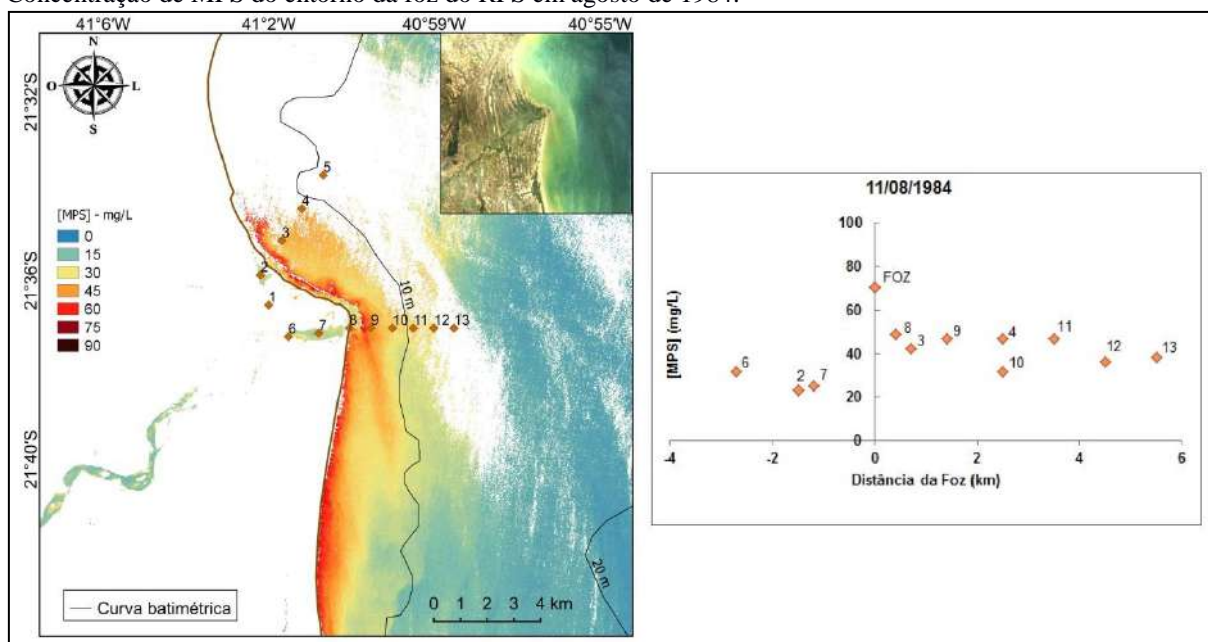
APÊNDICE P – Principais alterações morfológicas do curso inferior do RPS

MUDANÇAS MORFOLÓGICAS OBSERVADAS NAS ÁREAS 1 A 6 DO CURSO INFERIOR DO RPS, DE 1956 A 2005/2006			
Área	Localização	Padrão	Alterações observadas ao longo do tempo
1	Início do curso inferior, 150 km a jusante do reservatório de Anta.	Sinuoso/anastomosado.	Diminuição de 110 m na largura média do canal. Aumento relativo no tamanho das ilhas em função da redução do volume de água do RPS.
2	7 km a jusante da área 1.	Sinuoso/entrelaçado.	Diminuição de 106 m da largura média do canal. Aumento relativo no tamanho das ilhas em função da redução do volume de água do RPS. Surgimento de novas ilhas e incorporação de outras às margens do canal. Presença de barras arenosas.
3	12 km a jusante da área 2.	Sinuoso/entrelaçado.	Diminuição de 70 m da largura média do canal. Aumento relativo no tamanho das ilhas em função da redução do volume de água do RPS. Surgimento de novas ilhas e incorporação de outras às margens do canal. Presença de barras arenosas.
4	26 km a jusante da área 3 e a 60 km a montante da foz.	Retilíneo/entrelaçado.	Diminuição de 131 m na largura média do canal. Aumento relativo no tamanho das ilhas em função da redução do volume de água do RPS. Incorporação de ilhas às margens do canal. Presença de barras arenosas e meandros abandonados.
5	20 km a montante da foz.	Retilíneo/entrelaçado.	Diminuição de 148 m na largura média do canal. Aumento relativo no tamanho das ilhas em função da redução do volume de água do RPS. Incorporação de ilhas às margens do canal. Presença de barras arenosas e meandros abandonados.
6	Trecho final, próximo à foz.	Sinuoso/anastomosado.	Diminuição de 18 m na largura média do canal. Aumento relativo do tamanho das ilhas. Incorporação de ilhas às margens do canal e diminuição de barras arenosas, principalmente na fotografia antiga.

Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE Q – Concentração de MPS do entorno da foz do RPS após aplicação do modelo matemático

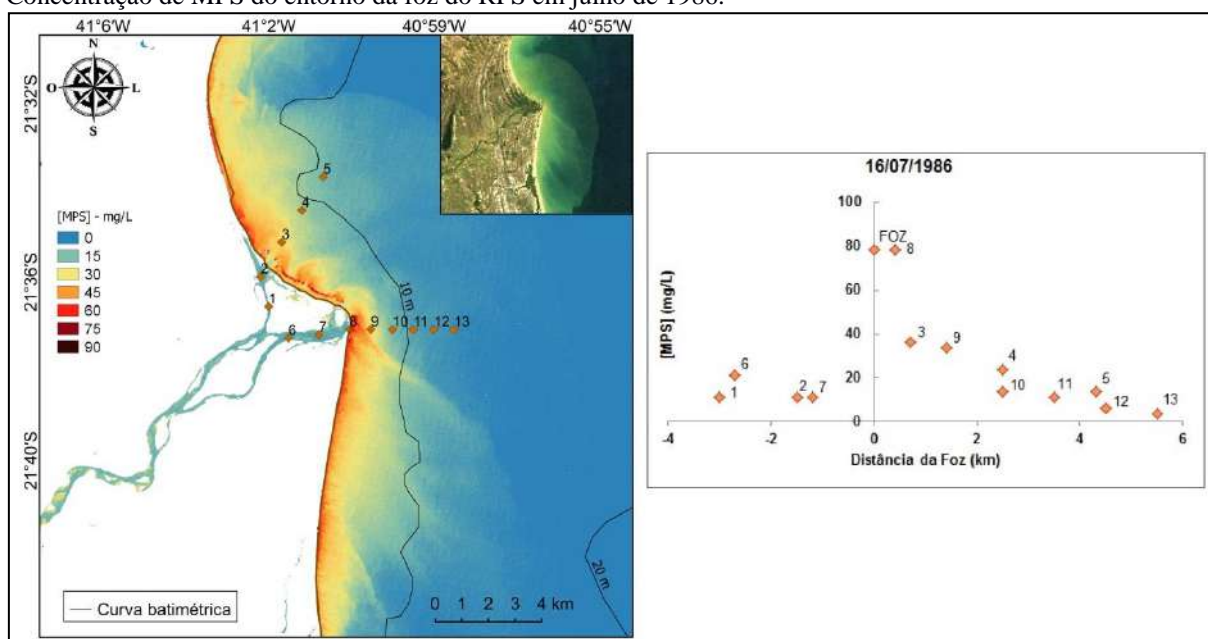
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em agosto de 1984.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

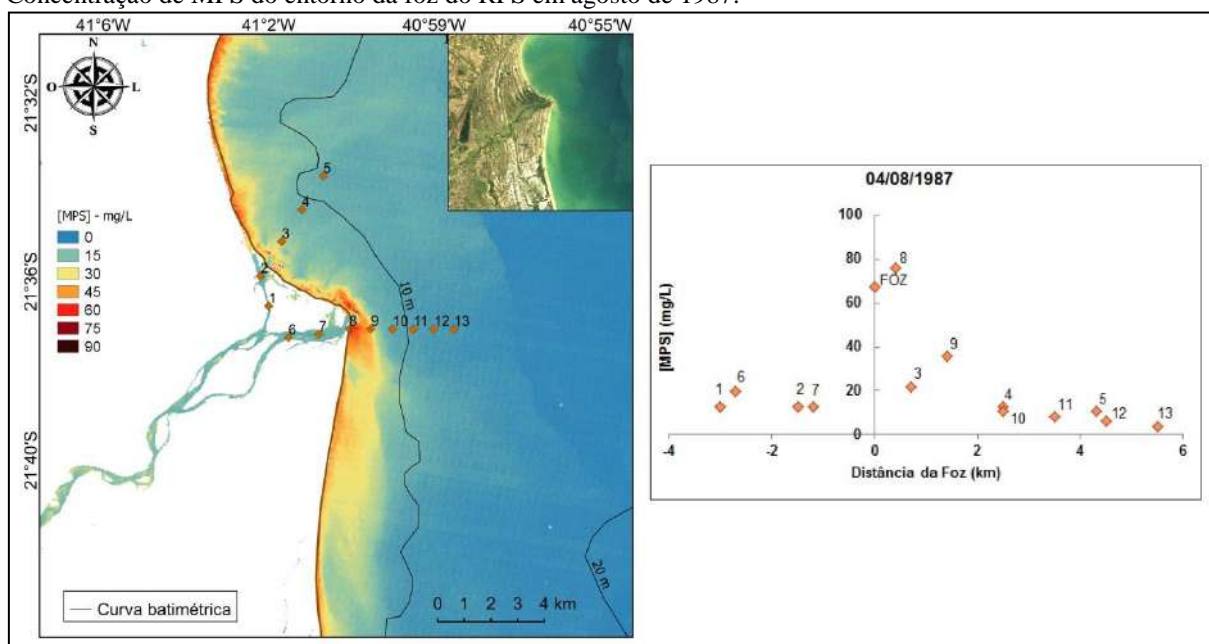
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 1986.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

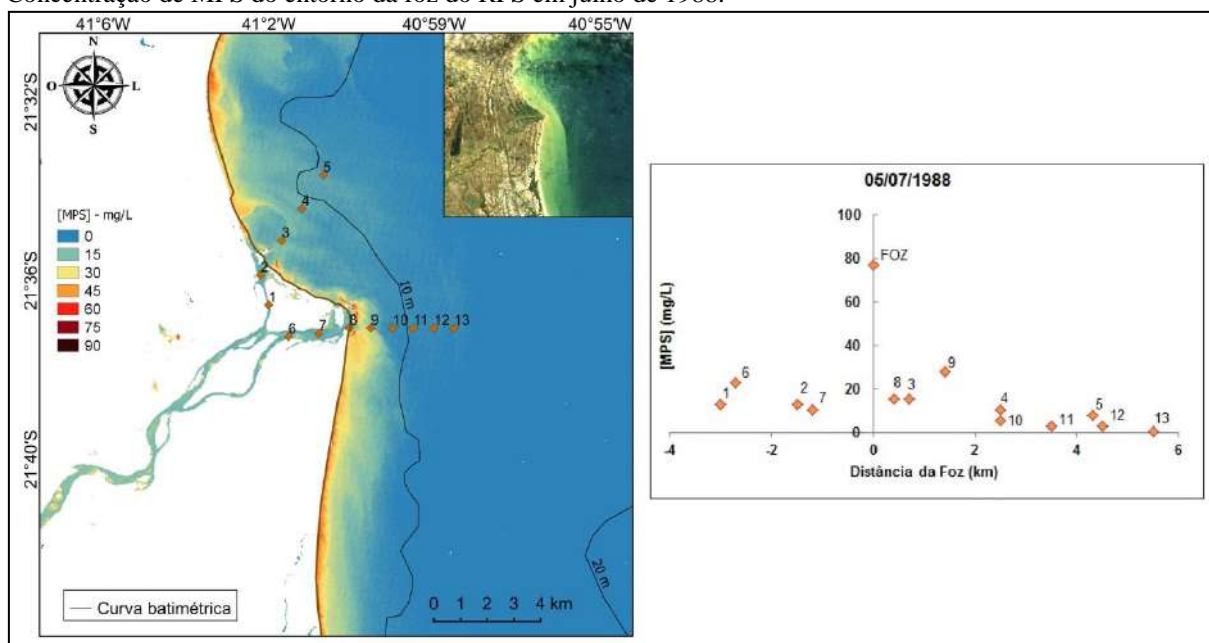
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em agosto de 1987.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

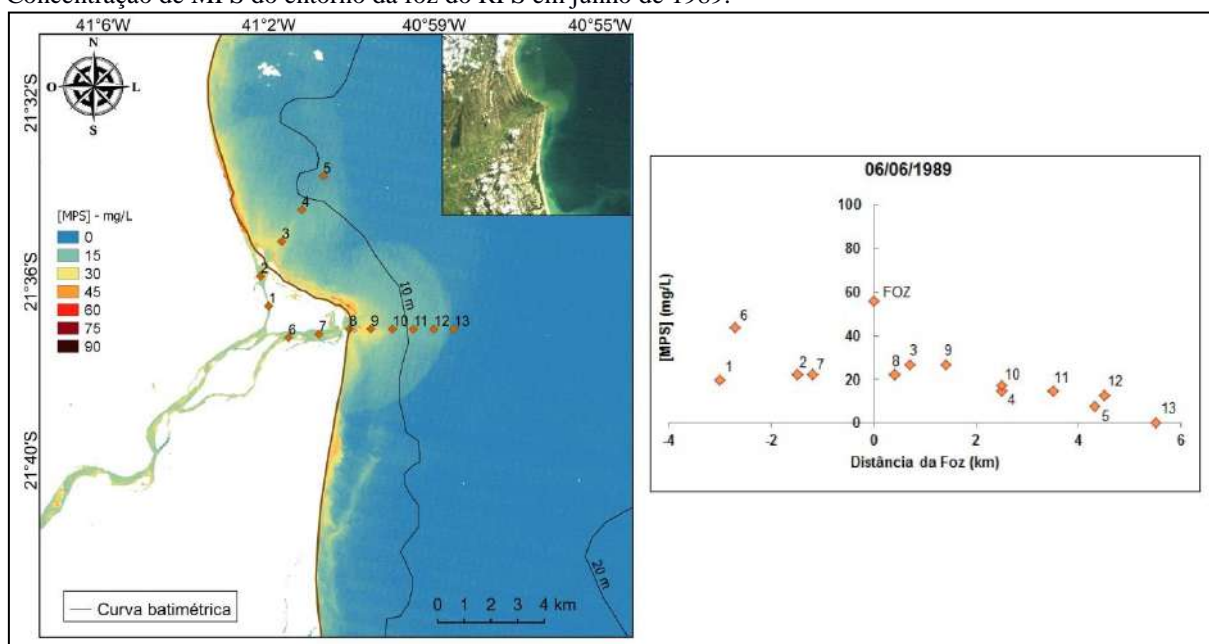
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 1988.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

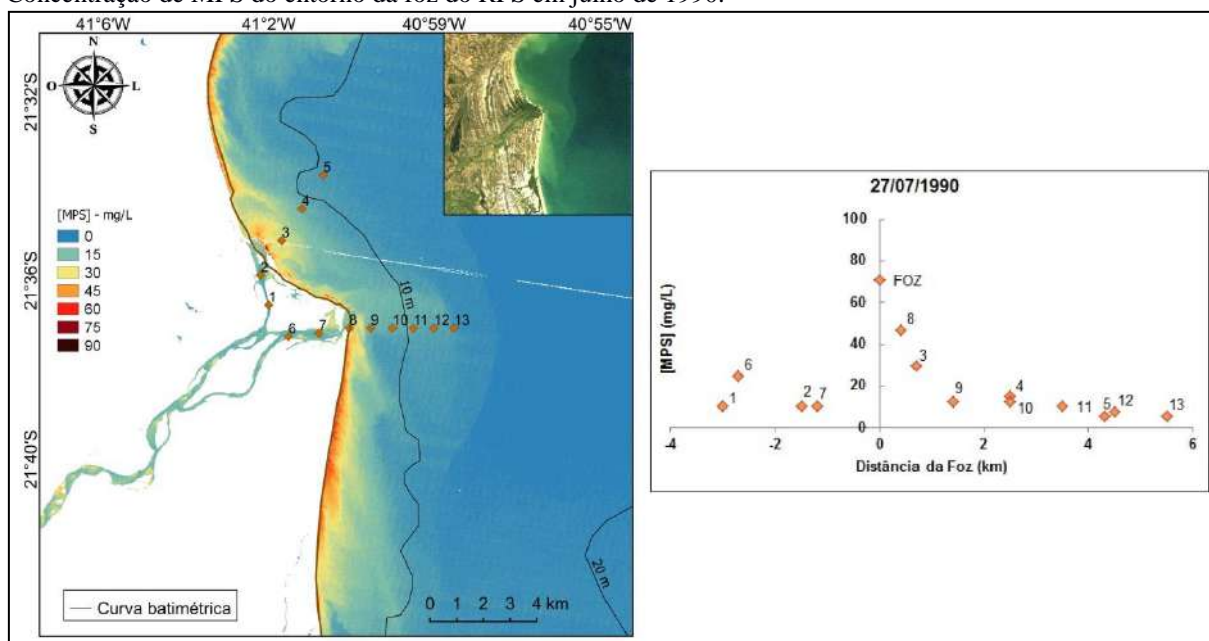
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em junho de 1989.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

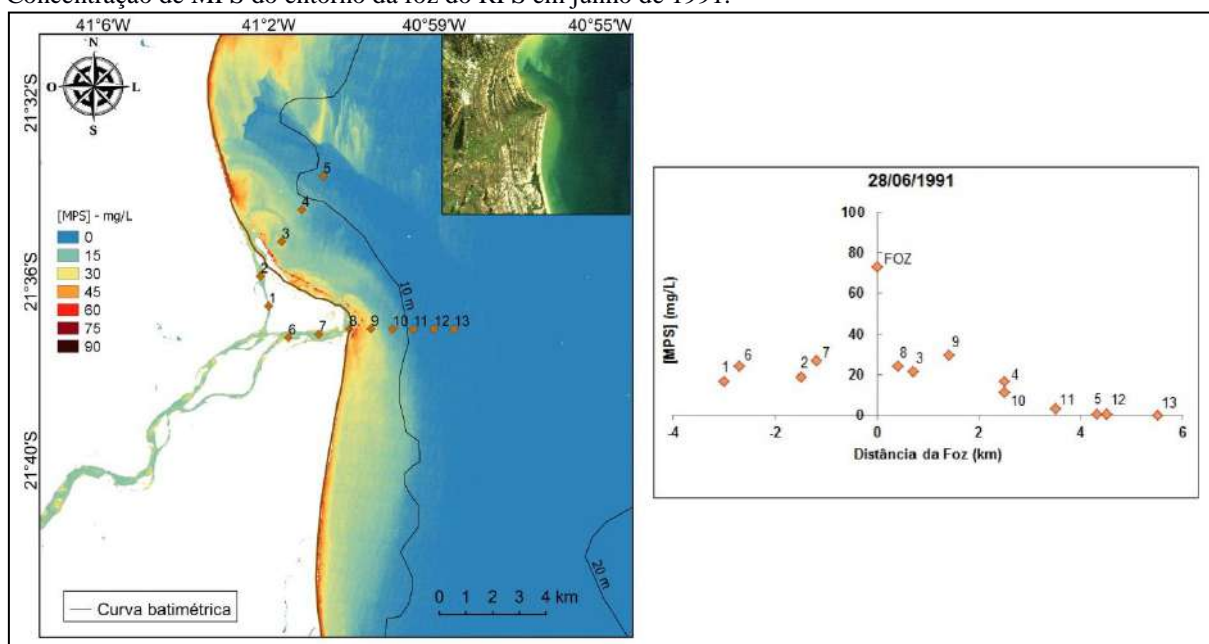
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 1990.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

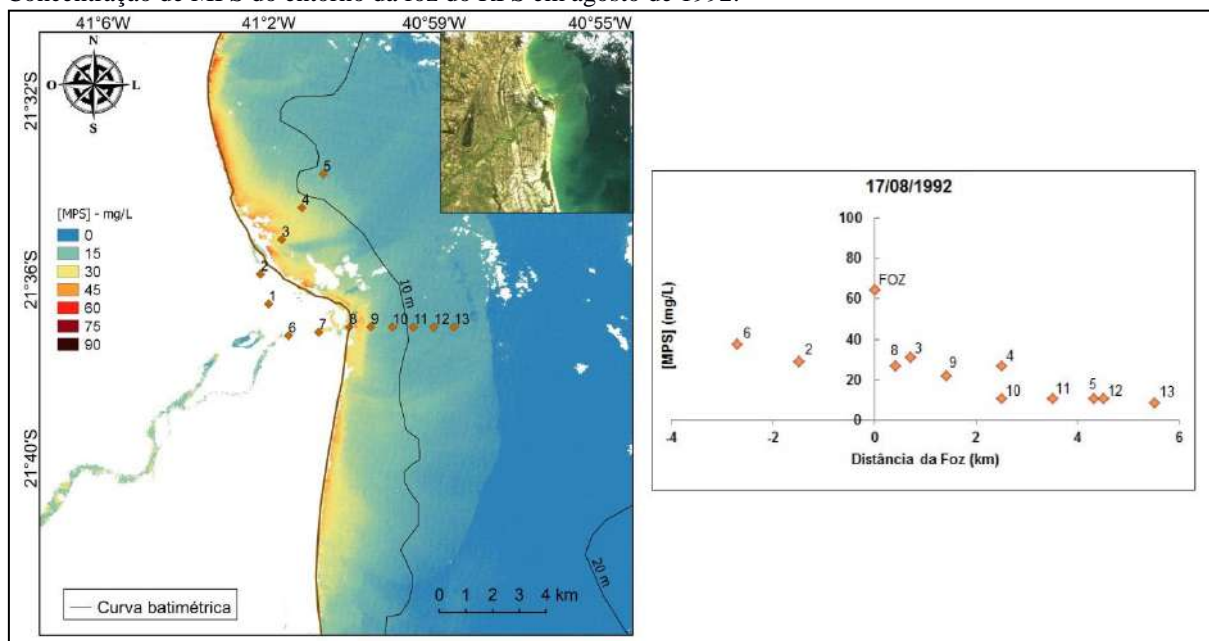
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em junho de 1991.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

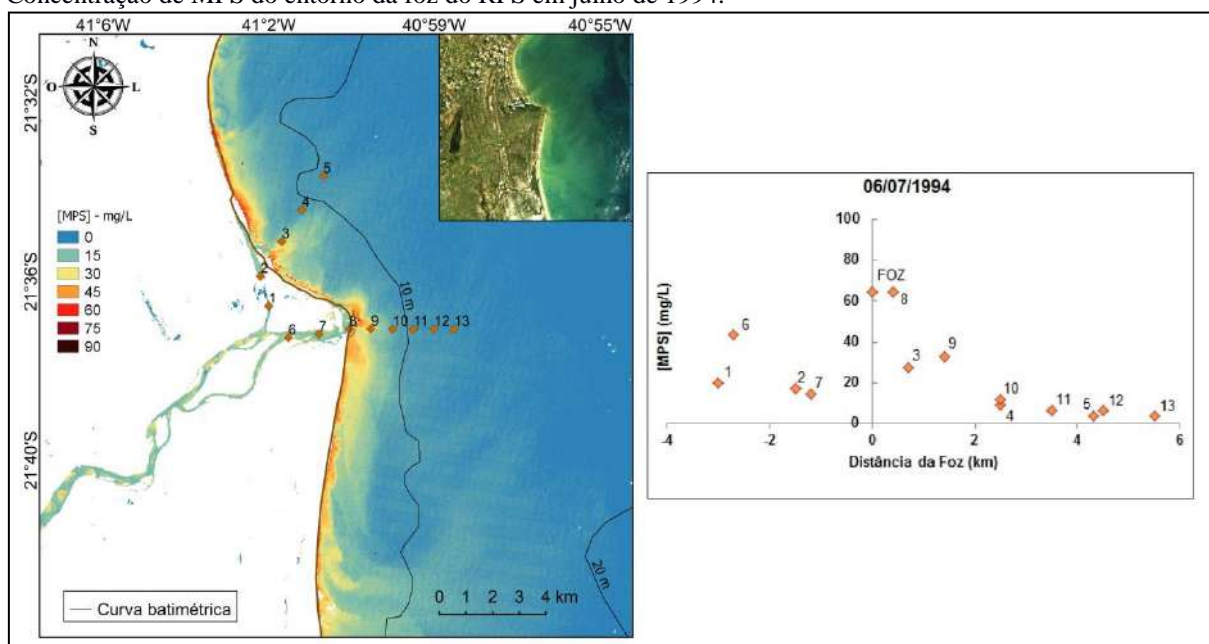
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em agosto de 1992.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

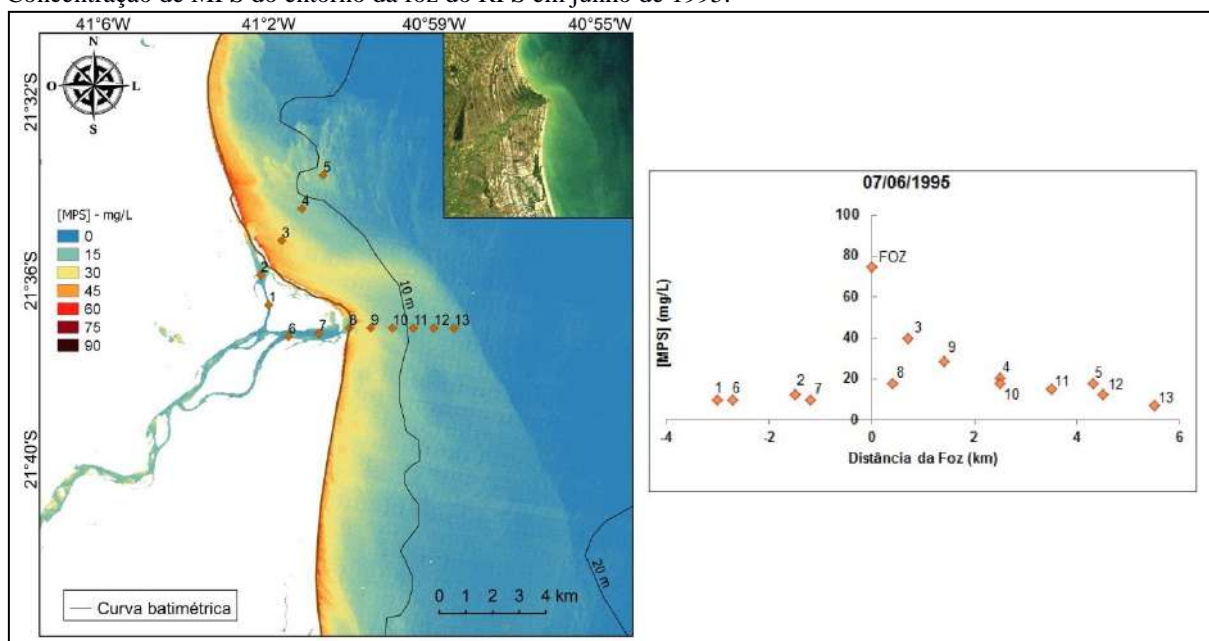
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 1994.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

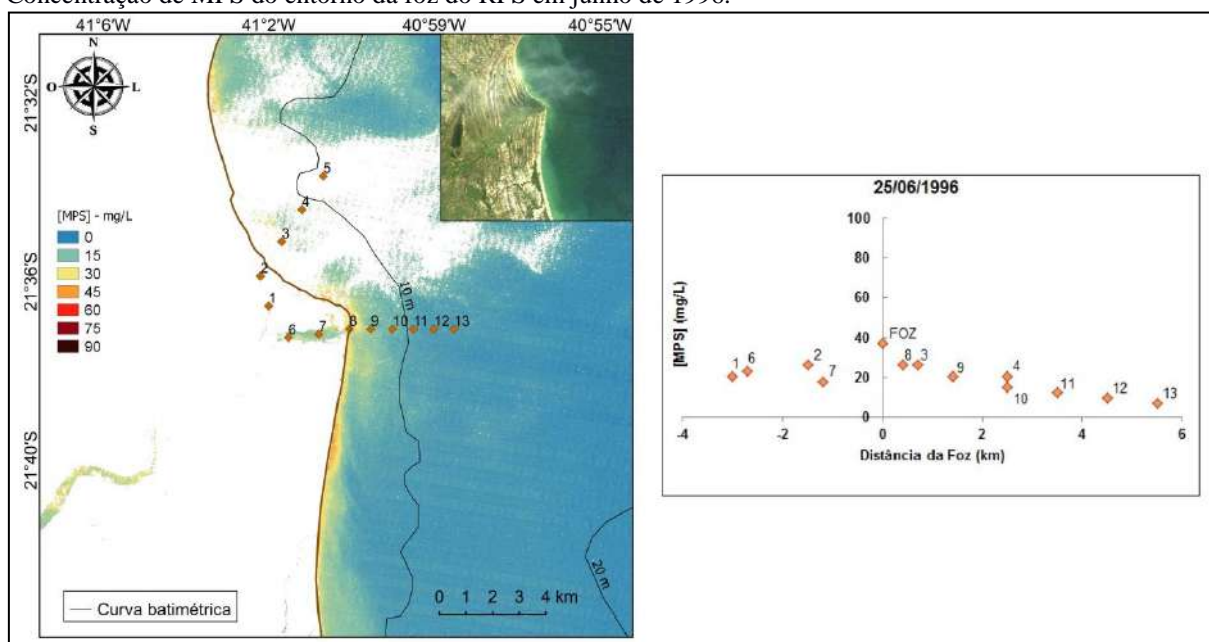
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em junho de 1995.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

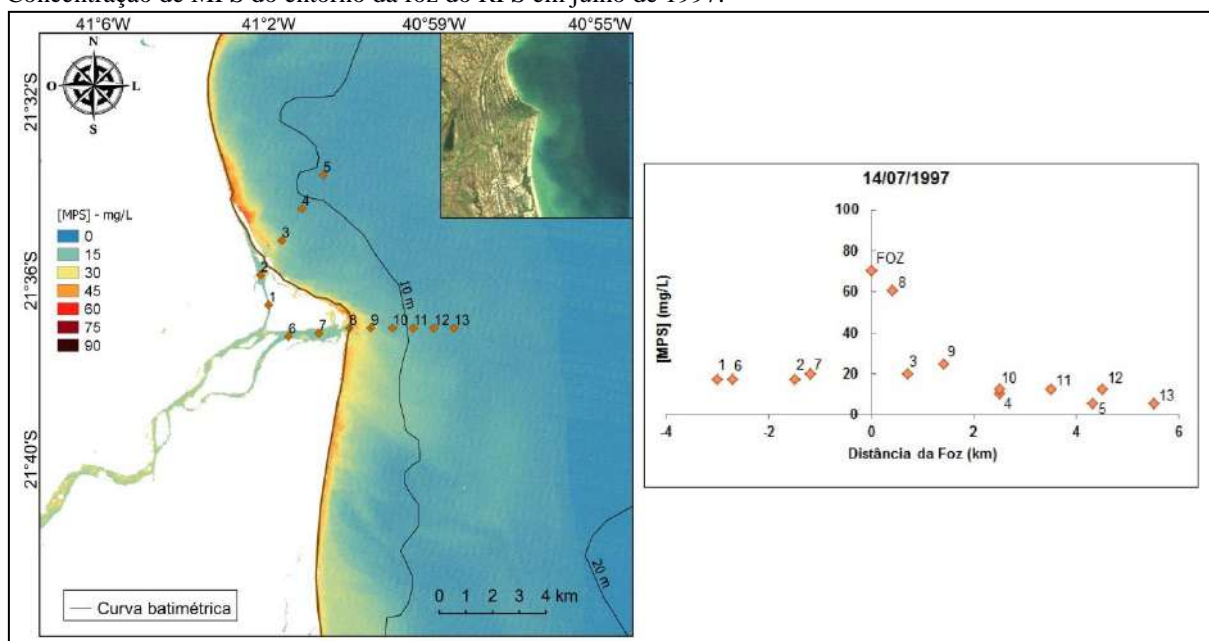
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em junho de 1996.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

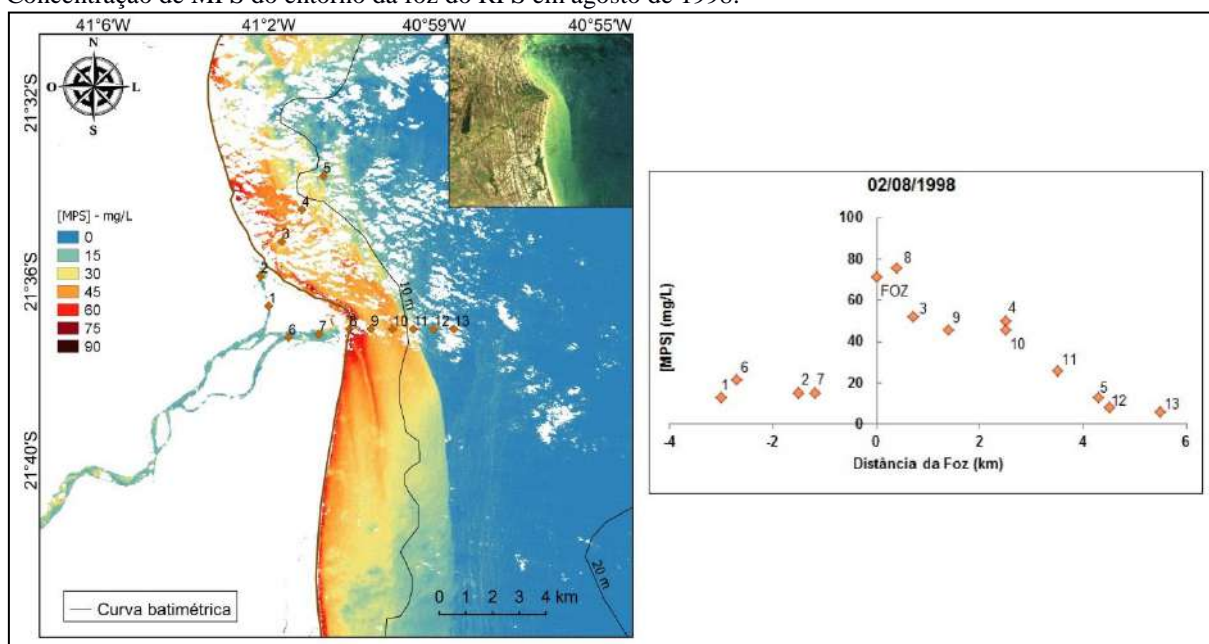
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 1997.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

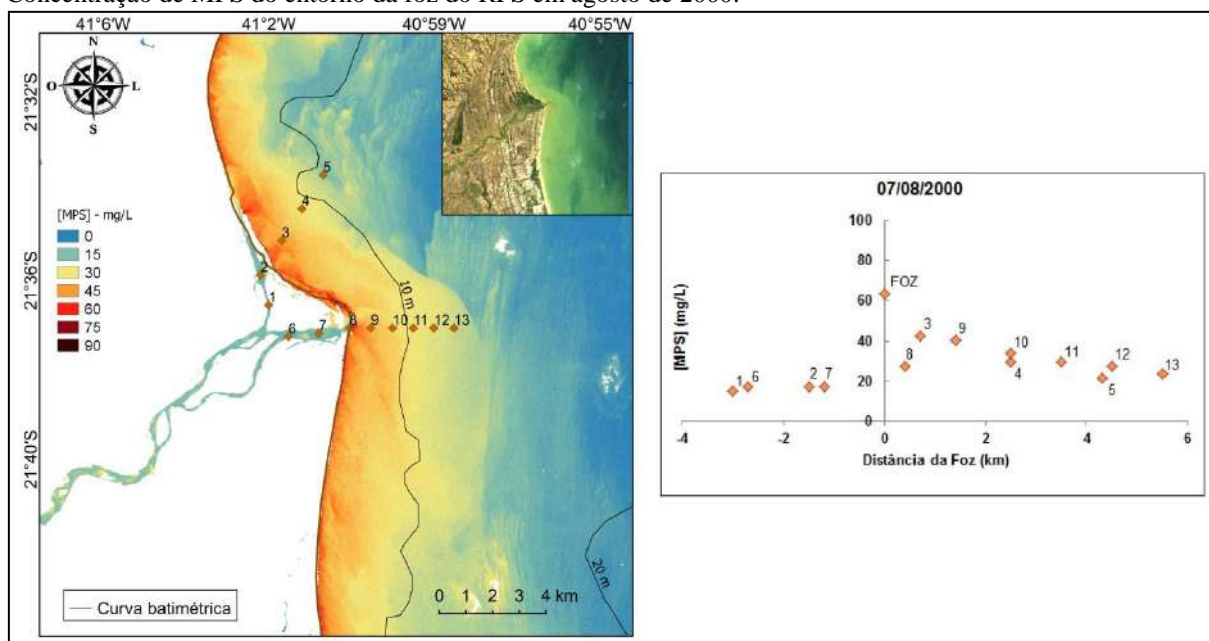
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em agosto de 1998.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

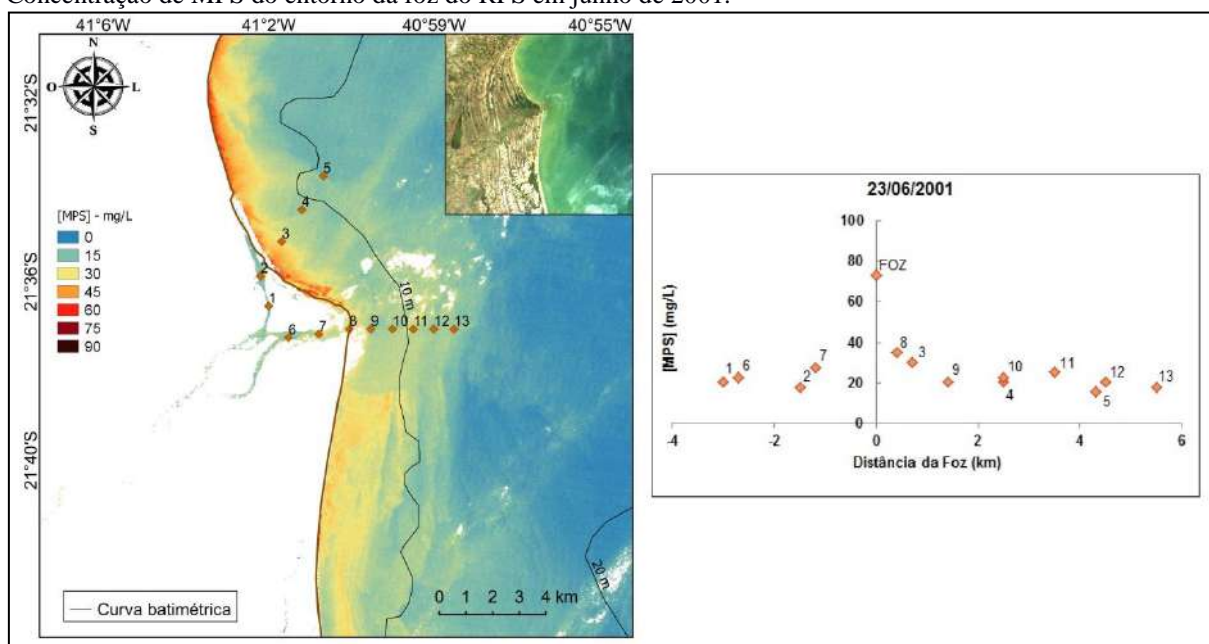
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em agosto de 2000.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

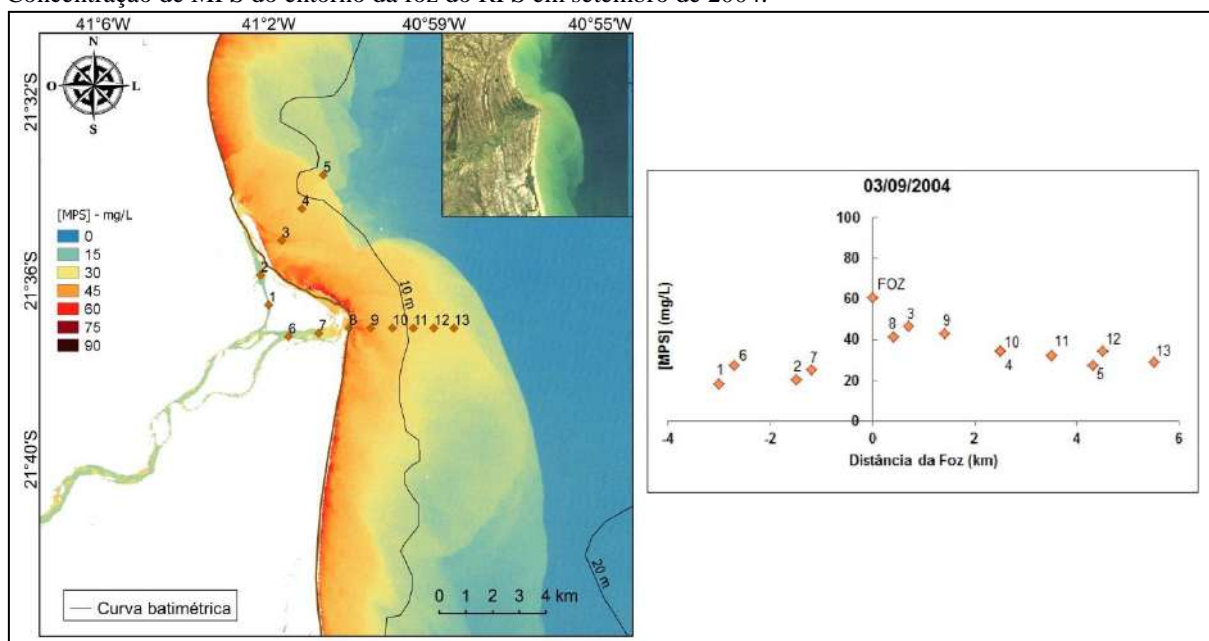
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em junho de 2001.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

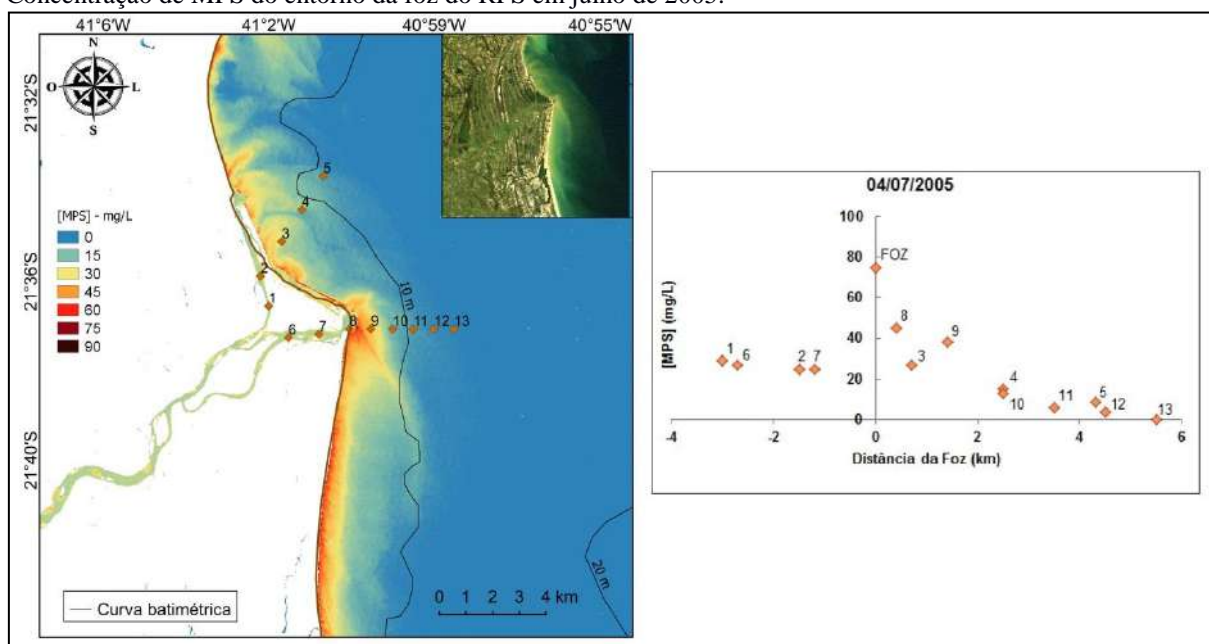
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em setembro de 2004.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

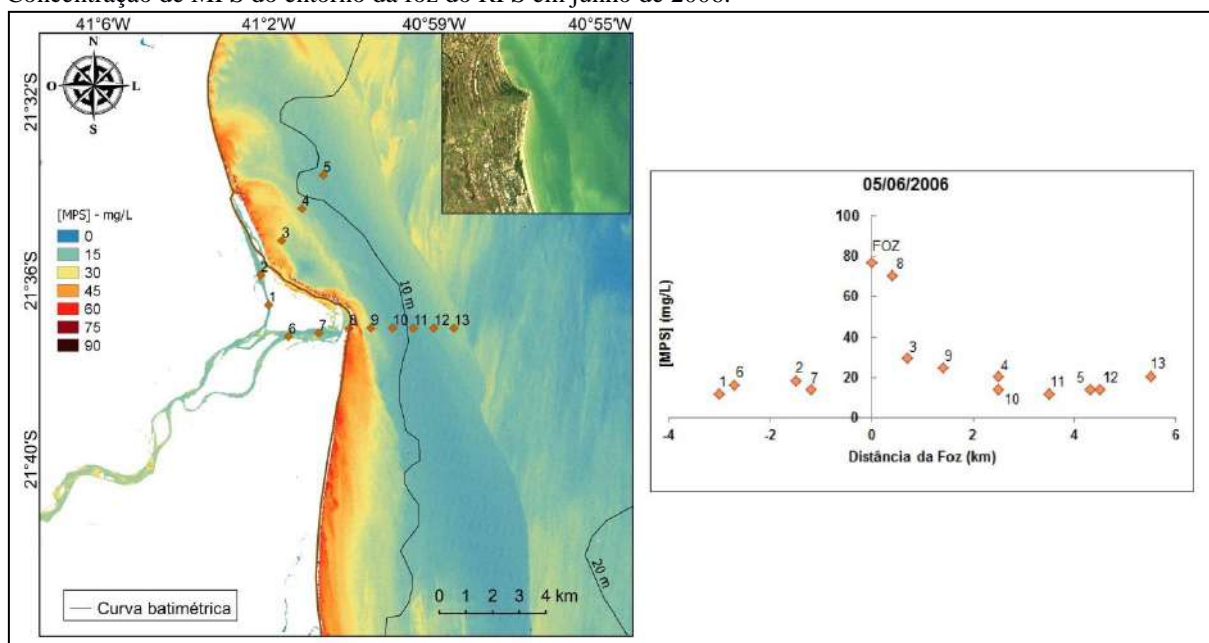
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 2005.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

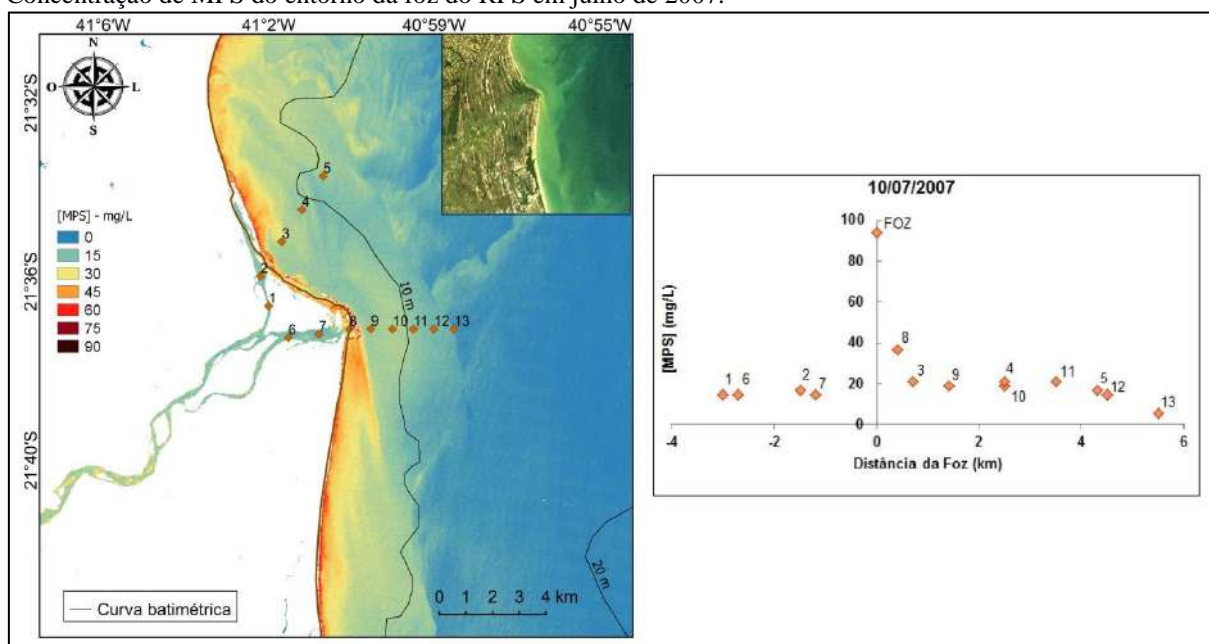
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em junho de 2006.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

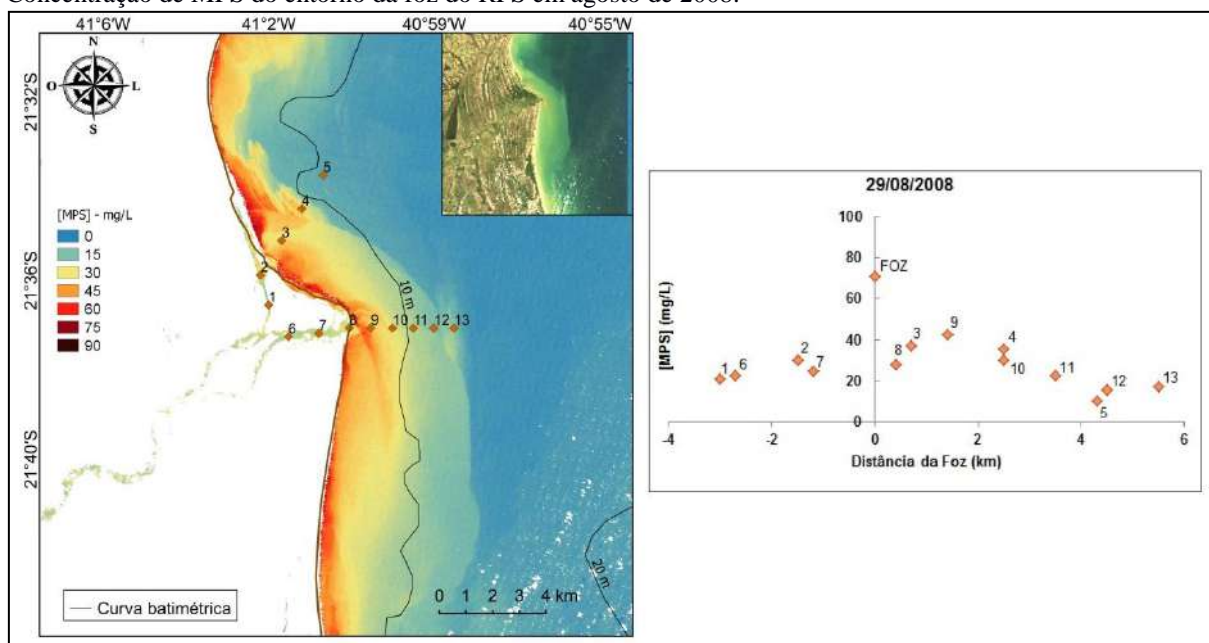
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 2007.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

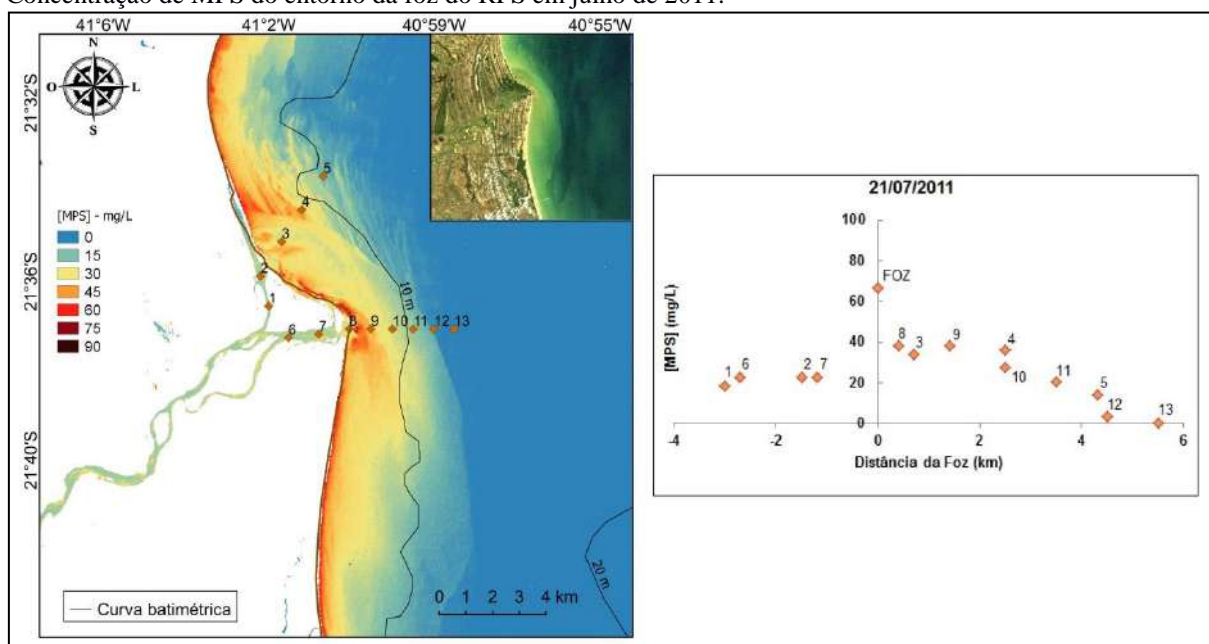
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em agosto de 2008.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

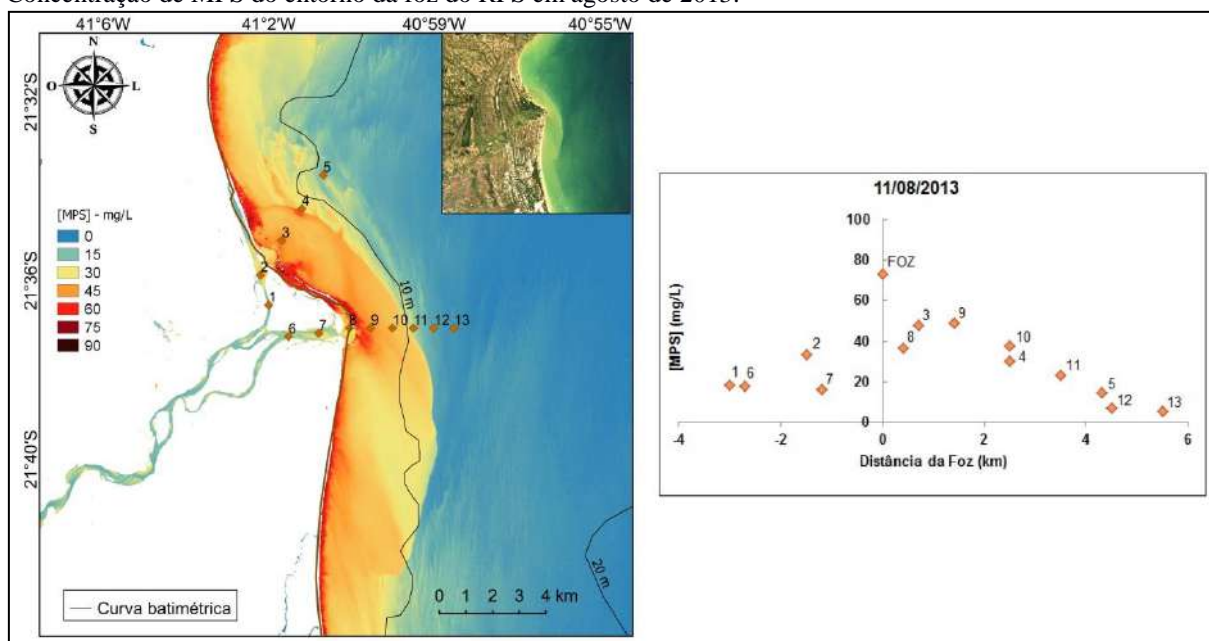
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 2011.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 5/Banda 3 (canto superior da imagem), de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

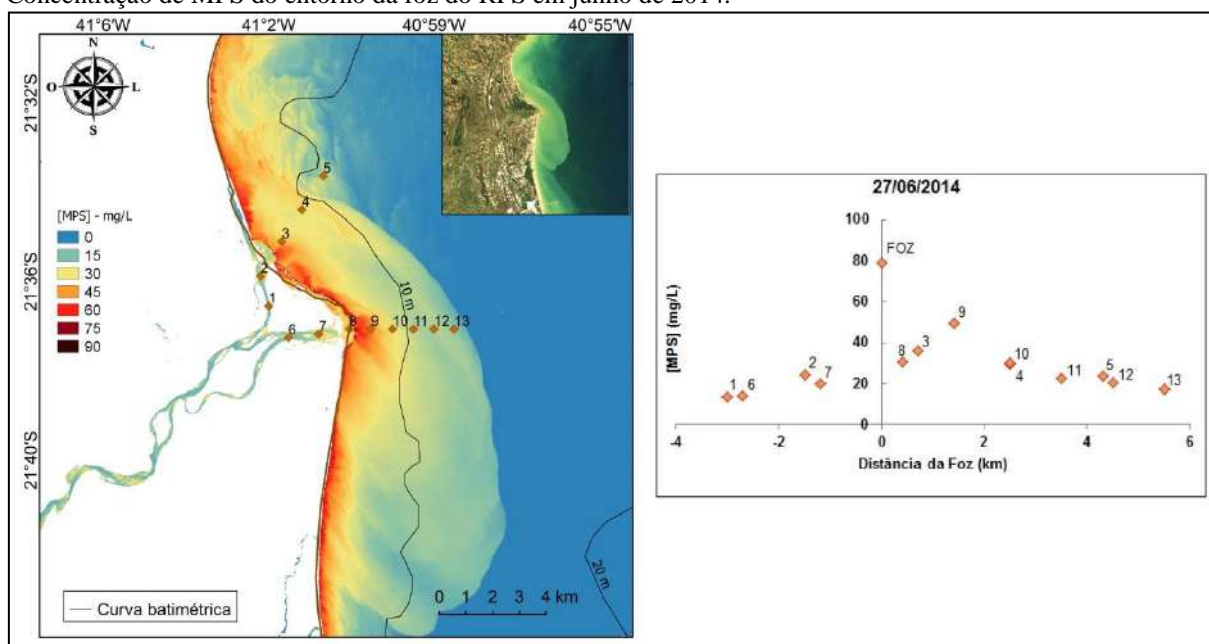
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em agosto de 2013.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 8/Banda 4 (canto superior da imagem) de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

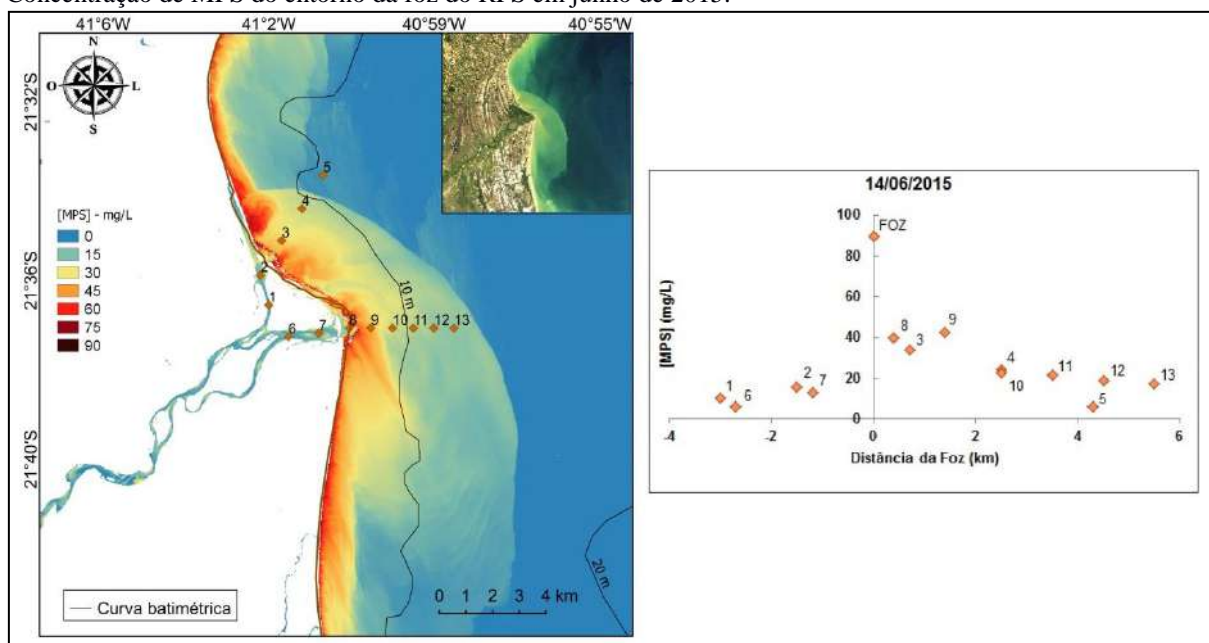
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em junho de 2014.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 8/Banda 4 (canto superior da imagem) de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

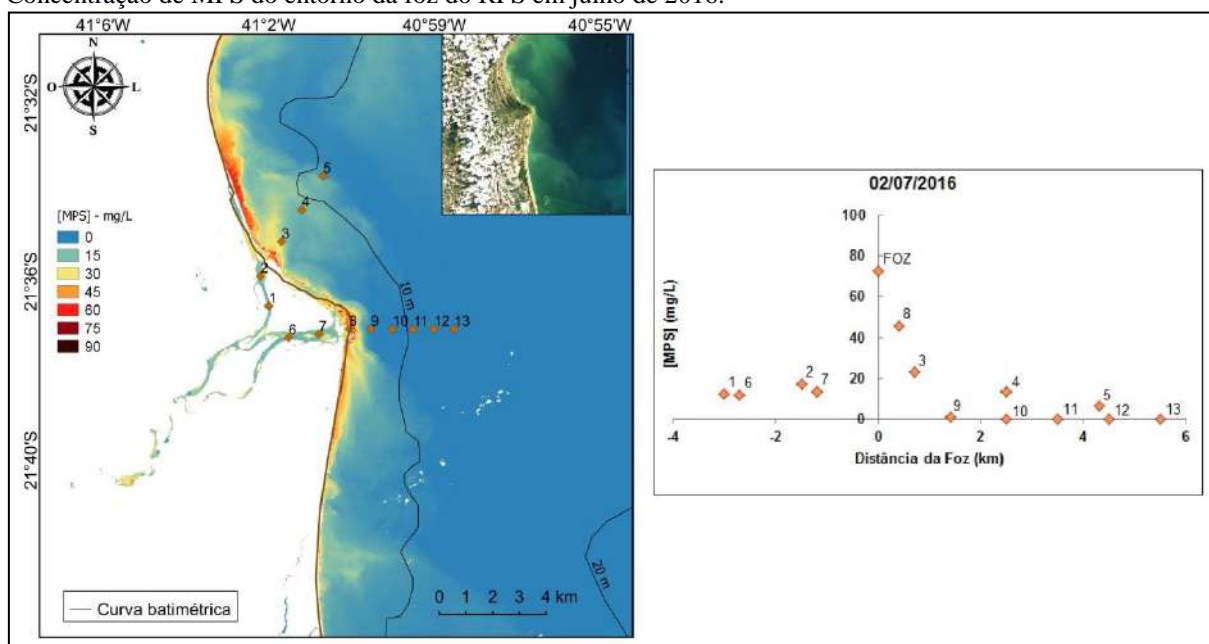
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em junho de 2015.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 8/Banda 4 (canto superior da imagem) de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

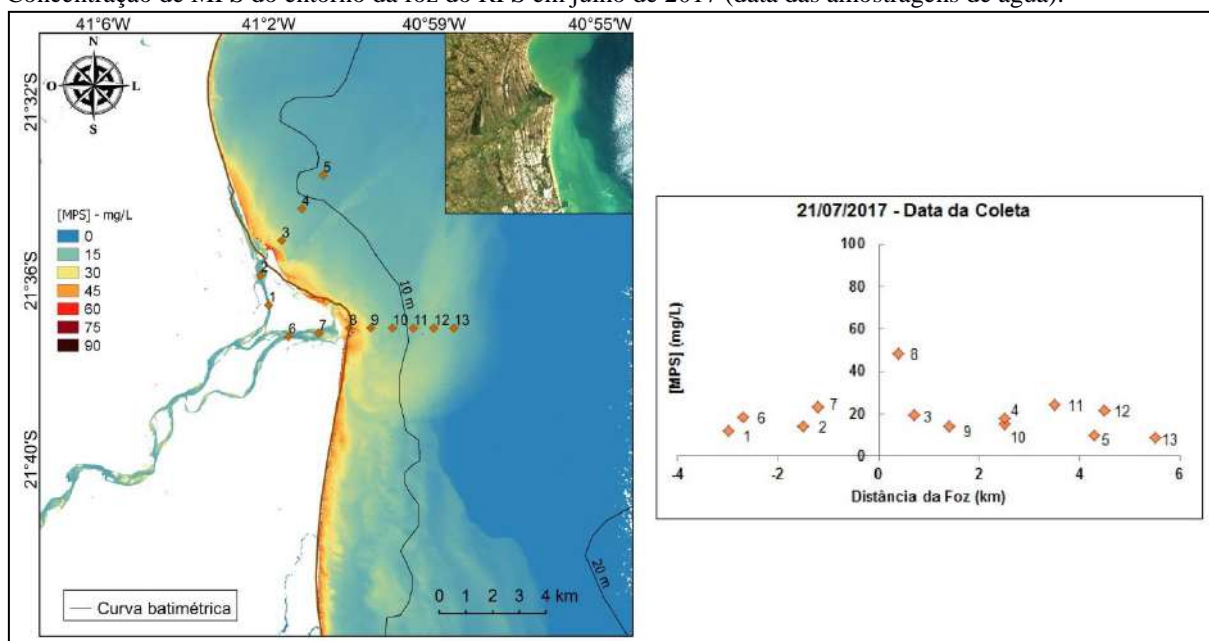
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 2016.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 8/Banda 4 (canto superior da imagem) de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.

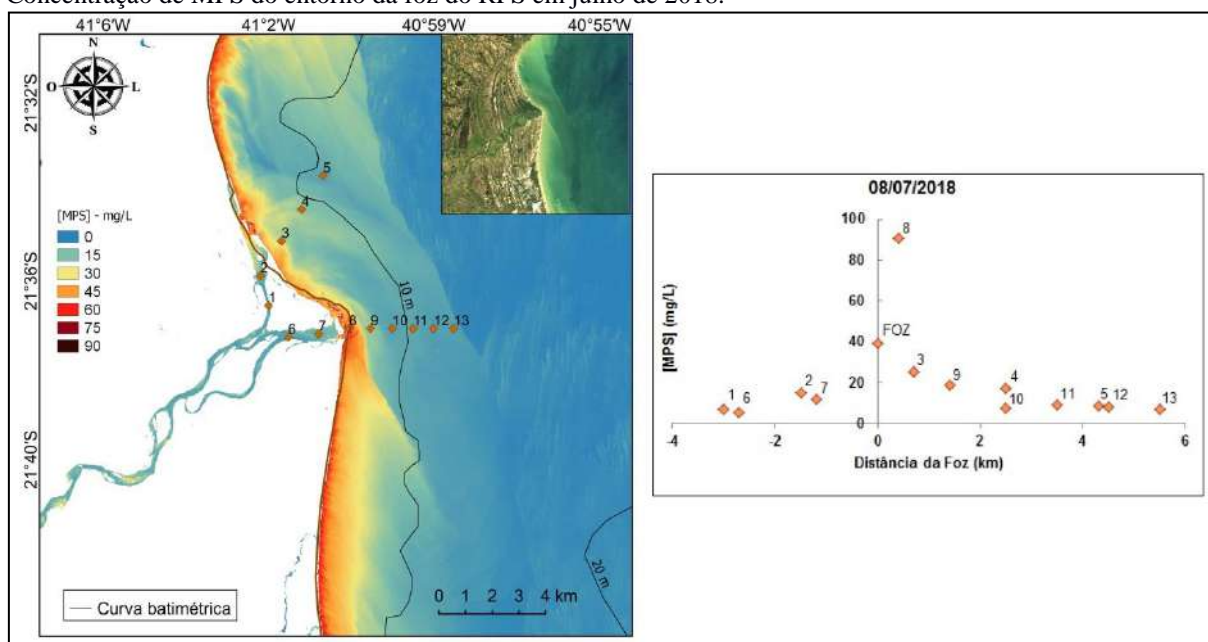
Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 2017 (data das amostragens de água).



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada por filtração das 13 amostras de água realizadas em 21 de julho de 2017 (gráfico à direita); à esquerda, concentração estimada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido neste trabalho aplicado sobre imagem Landsat 8/Banda 4 (canto superior da imagem), de USGS, 2018, do mesmo dia para a porção final do canal e o entorno da pluma do RPS.

Fonte: A autora, 2019.

Concentração de MPS do entorno da foz do RPS em julho de 2018.



Legenda: [MPS] - concentração de material particulado em suspensão determinada pelo modelo matemático (Equação 22) desenvolvido aplicado sobre imagem Landsat 8/Banda 4 (canto superior da imagem) de USGS, 2018.

Fonte: A autora, 2019.