GEOTECNOLOGIAS COMO SUPORTE AO DIAGNÓSTICO DA DINÂMICA GEOMORFOLÓGICO-FLUVIAL DO BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA DO SUL

GEOTECHNOLOGIES TO SUPPORT THE DIAGNOSIS OF GEOMORPHOLOGICAL AND FLUVIAL DYNAMICS OF THE LOW COURSE OF PARAIBA DO SUL RIVER

DHIEGO DA SILVA SALES | IFF
VICENTE DE PAULO SANTOS DE OLIVEIRA, PhD. | IFF
JADER LUGON JUNIOR, PhD. | IFF

RESUMO

O Paraíba do Sul é um rio brasileiro de grande extensão que atravessa diversas áreas antropizadas, tendo grande propensão à variação morfológica em seu curso baixo. O presente estudo teve como objetivo verificar a ocorrência de modificações morfológicas nos 65 km finais de seu curso devido às forças geomorfológicas. Foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2, de 2017, associadas ao levantamento aéreo do IBGE realizado na região em 2005. As imagens foram utilizadas para classificar, vetorizar e posteriormente obter a quantificação e espacialização dos processos geomorfológicos fluviais. Para garantir que a variação do nível da água não interferisse na análise, foram observadas as medidas obtidas na estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA) em Campos dos Goytacazes. Portanto, as imagens utilizadas neste trabalho foram escolhidas para corresponder às mesmas medidas de nível de no rio. Foi possível perceber que entre 2005 e 2017 houve uma perda significativa na largura média do rio na ordem de 34,75 m e na área total na ordem de 2,26 km². Além disso, o satélite Sentinel-2 foi considerado satisfatório para os propósitos da metodologia utilizada neste estudo.

PALAVRAS CHAVE: Geomorfologia fluvial; Assoreamento; Sensoriamento remoto; Monitoramento ambiental; SIG.

ABSTRACT

The Paraíba do Sul is a Brazilianriver of large extension that goes through several anthropic areas.Then, it has a great propensity to the morphological variation in its low course. The present research aimed to verify the occurrence of morphological modifications in the final 65 km of its course due to the geomorphological forces. It was used images from the Sentinel-2 satellite, from 2017, associated to the IBGE aerial survey carried out in the region in 2005. The images were used to classify, to vectorize and subsequently to obtain the quantification and spatialization of fluvial geomorphological processes.To ensure the variation of water level did not interfere in the analysis, the measurements obtained from the ANA (Brazilian Water Agency) fluviometric station in Campos dos Goytacazes were observed. So, the images used in this work were chosen to match the same water level measurements. It was possible to realize that between 2005 and 2017 there was a significant loss in the average width of the river in the order of 34.75 m and in the total area in the order of 2.26 km². Additionally, Sentinel-2 satellite was considered to be satisfactory for purpose of the methodology used in this study.

KEY WORDS: *Fluvial geomorphology; Silting; Remote sensing; Environmental monitoring; GIS.*

http://dx.doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n1.91-103
ISSN: 2447-0899 (IMPRESSA) | 2447-3073 (ONLINE)

https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n1.91-103

1. INTRODUÇÃO

A sociedade contemporânea, fortemente marcada pela intrincada relação do homem com a natureza, tem ampliado sua preocupação com o uso racional dos recursos naturais notadamente dos recursos hídricos. Nesse contexto, temáticas como uso do solo, erosão, captação de água e assoreamento vem sendo amplamente discutidas.

O assoreamento em particular é um fenômeno que ocorre em rios que sofrem intensos processos erosivos ao longo de seu curso. Ele acontece por meio de causas naturais, como o regime de chuvas e os ventos fortes, que transportam os produtos do intemperismo para os rios que, por conseguinte, irão transportar e depositar estes sedimentos em seus baixos cursos, onde a energia, logo a capacidade de transporte, é reduzida (GUERRA, 2005). Este processo pode ser intensificado pela ação humana, na medida em que as matas ciliares são removidas, favorecendo a dinâmica de erosão dos terraços, o que ocasiona a remoção do solo e rochas para os cursos dos rios (RODRIGUES, 2016).

A ausência de um monitoramento dos processos sedimentológicos, bem como da intensidade dos processos erosivos e deposicionais, no baixo curso do Rio Paraíba do Sul, representa um problema de gestão pública, que afeta o equilíbrio entre homem e natureza.

Entender a evolução do sistema deposicional é de grande importância para o contexto geomorfológico da paisagem, mas também, para outras áreas do conhecimento, envolvendo desde os aspectos físicos, que incluem os estudos hidrológicos e de engenharia, aos aspectos ecológicos, que atentam para a estrutura e funcionamento das comunidades biológicas.

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi realizada uma análise quali-quantitativa dos processos geomorfológicos-fluviais do rio, sendo esta análise dividida em dois momentos. Primeiro serão abordados princípios da dinâmica fluvial natural do rio Paraíba do Sul, buscando entender os processos fluviais naturais e, ainda, serão elencadas a natureza das principais intervenções realizadas neste curso, contribuindo para uma reflexão a cerca da diminuição do volume de água. Em seguida pretende-se propor a utilização de geotecnologias, para o monitoramento da dinâmica fluvial, notadamente para a diminuição do espelho d'água e o assoreamento decorrente da perda de capacidade de transporte, uma vez que as imagens de satélites auxiliam na compreensão das complexas relações entre homem e natureza (CARVALHO JÚNIOR, 2018)

Neste sentido, espera-se que este trabalho contribua para a discussão sobre o uso de ferramentas SIG como suporte ao diagnóstico ambientais e tomada de decisão dos agentes públicos, tais como, dos comitês de bacia, contribuindo para uma gestão integrada e responsável das mais variadas instituições que compõe o mosaico heterogêneo de uso dos recursos hídricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Caracterização e localização

A bacia do Rio Paraíba do Sul possui área de drenagem de 62.074 km^2, se estendendo pelo estado de São Paulo (14.510 km^2), Rio de Janeiro (26.851 km^2) e Minas Gerais (20.713 km^2), (CEIVAP, 2019). Uma vez que atravessa três estados, o Rio Paraíba do Sul é domínio federal. Devido a sua grande importância para manutenção de diversos empreendimentos como parques hidrelétricos, atividades mineradoras, indústrias e agropecuária, seus recursos necessitam de monitoramento frequente, visto que seu uso pode ocasionar diversos impactos na sua qualidade e quantidade disponíveis para abastecimento.

O rio nasce na serra da Bocaina, no estado de São Paulo, a 1.800 m de altitude, e deságua no norte fluminense, no município de São João da Barra, percorrendo uma extensão de aproximadamente 1.180 km. O seu baixo curso estende-se de São Fidélis/RJ à foz, com 95 km de extensão e declividade média de 0,22 m/km, atravessando a Baixada Campista, extensa planície litorânea (MARENGO e ALVES, 2005).

O trecho escolhido para o estudo se estende desde o limite municipal entre Campos dos Goytacazes e São Fidélis, nas coordenadas -41,53688º / -21,62133º, identificado na Figura 1 como o ponto A, até a foz no município de São João da Barra, nas coordenadas -41,04181º / -21,61933º, indicado como ponto B. O rio Paraíba do Sul, no trecho em questão, banha cinco municípios, sendo eles: São Fidélis, Cardoso Moreira, Campos dos Goytacazes, São Francisco do Itabapoana e São João da Barra. A extensão total do trecho delimitado entre os pontos A e B é de 65 km, sendo excluído o trecho final, do delta, para que a dinâmica costeira, provocada pela ação da erosão marinha não comprometesse a análise. A maior parte dessa extensão está localizada dentro dos limites municipais de Campos, correspondendo a aproximadamente 53 km da extensão total.

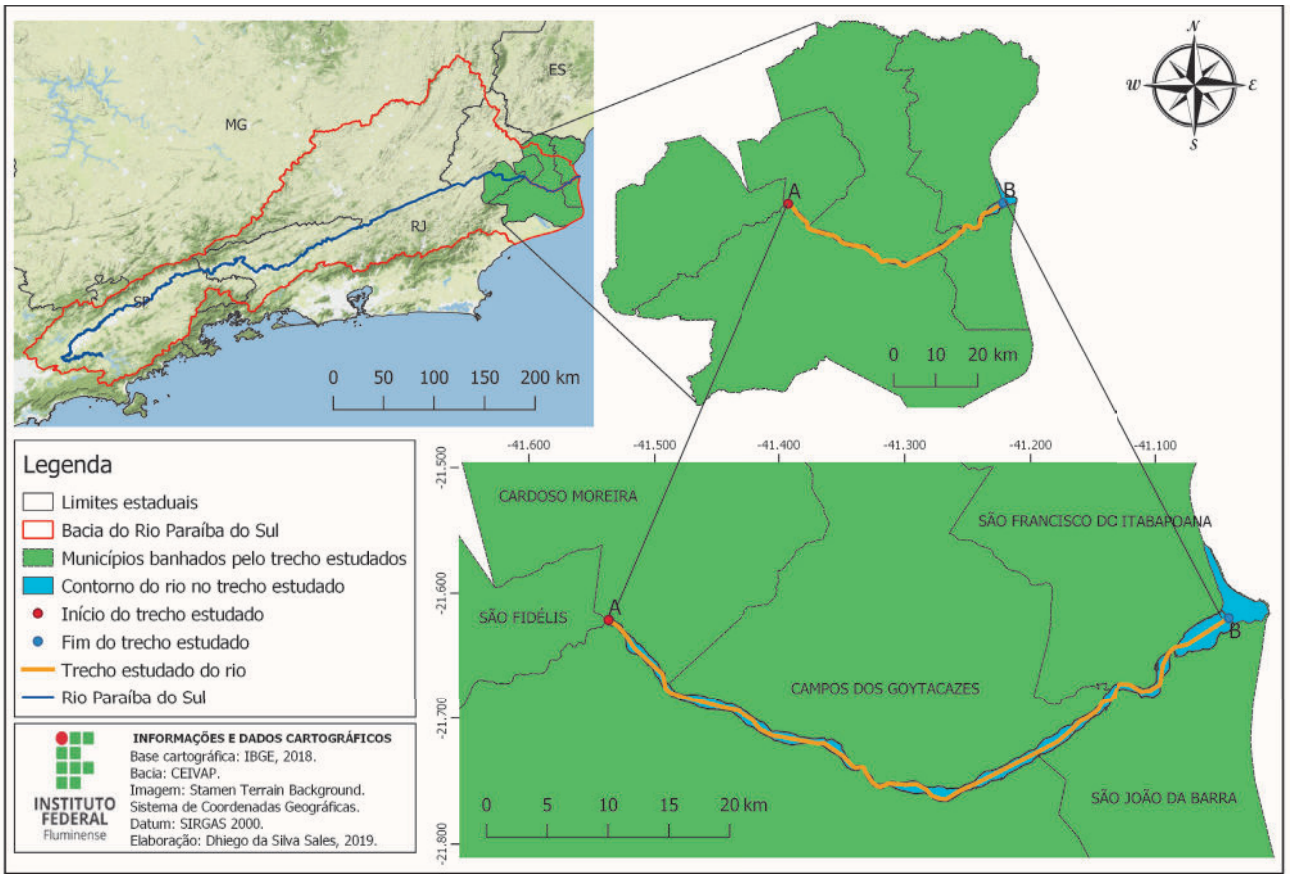

Figura 1 – Delimitação da área de interesse
Fonte: Elaborado pelos autores

2.2. Tipologia do canal no trecho de interesse

A heterogeneidade dos canais vem sendo amplamente estudada no campo da geomorfologia fluvial, tendo a nomenclatura destes, crescido de forma não sistemática, embora algumas dessas classificações tem se apresentando mais frequentemente. As quatro mais usuais são: retilíneo, anastomosado, meândrico e entrelaçado (LEWIN & ASHWORTH, 2014).

O geógrafo brasileiro, Guerra (2005), apresenta três classificações para os canais, sendo eles, canais retilíneos, anastomosados e meandrante. (i) Para os canais retilíneos o autor atribui condições de excepcionalidade na medida em que depende de condições específicas, tais como um embasamento rochoso homogêneo e às vezes associados a linhas tectônicas. O canal retilíneo também pode estar associado a ações antrópicas, que com o objetivo de aumentar o escoamento e promover uma melhor drenagem da região, tem sido muito utilizado em áreas urbanas e de baixada constantemente alagadas. O autor também classifica retilíneo como sendo um seguimento com extensão 10 vezes maior que a largura; (ii) os canais anastomosados são classificados como canais que se caracterizam por apresentar grande volume de carga de fundo que, conjugado com as flutuações de descargas, ocasionam sucessivas ramificações, ou múltiplos canais que se subdividem e se reencontram, separados por ilhas assimétricas e barras arenosas; (iii) os canais mendrantes estão associados a áreas de baixa declividade onde a energia do fluxo de descarga de água é reduzida, típicos de regiões estuarinas. Apresentam condições de erosão específicas, sendo caracterizado pela zona de deposição na margem convexa (progradação das praias) e em áreas de degradação na superfície côncava.

Além da tipologia acima descrita é recorrente na literatura o canal entrelaçado. Este é definido como sendo rio permeado por ilhas e barras, decorrentes do assoreamento do material transportado em suspensão por suas próprias águas, e é caracterizado por apresentar pouca ou nenhuma mata ciliar no solo ao redor, pois a ausência ou baixo volume de raízes das plantas favorece a erosão, devido à instabilidade do solo exposto, sendo o produto desta erosão carreada para o rio (TEIXEIRA, 2009). Lorang & Hauer (2017), o descreve a partir de um processo que ocorre quando a capacidade do fluxo de transportar sedimentos é excedida pelo volume de sedimento sendo transportado como carga de leito, evidenciando perda da capacidade de transporte de sedimentos. As tipologias descritas podem ser observadas na Figura 2.

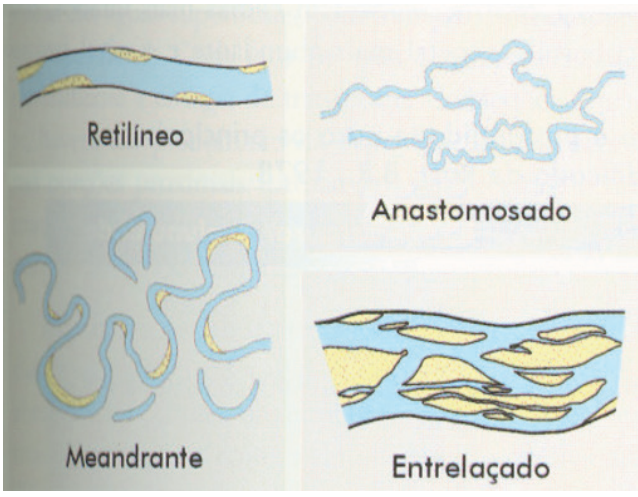

Figura 2 – Principais tipologias dos canais fluviais
Fonte: Teixeira (2009)

Acerca da fisionomia do curso fluvial do Rio Paraíba do Sul no trecho de interesse, o relatório da ENGECORPS (2010) classifica a morfologia, como entrelaçada e com maior sinuosidade do que as regiões a montante (alto e médio curso), logo apresentando uma tendência meândrica associada. Pode-se observar que o rio apresenta diversas ilhas principalmente à jusante do perímetro urbano de Campos dos Goytacazes, corroborando para a classificação entrelaçada do canal. Na área urbana percebem-se os meandros, onde se observa a progradação das praias da margem convexa. Os diques produzidos pela ação antrópica, para o desenvolvimento da cidade, que se encontra nas margens do rio, impedem o processo de escavação da margem côncava dos meandros, fazendo assim que os mesmos não tendam a aumentar a sinuosidade. Em contrapartida a deposição na margem convexa do meandro, tende a promover um afunilamento do leito do rio.

2.3. Uso do solo, processo erosivo e produção de sedimentos.

A intervenção humana nas áreas adjacentes aos cursos dos rios, seja na construção de diques ou na remoção de cobertura vegetal nativa, em razão da expansão da atividade agropecuária, ou mesmo para a expansão das cidades, vem contribuindo para o processo de erosão acelerada. A impermeabilização do solo, em função do crescimento das cidades, atua no sentido de dificultar o processo de infiltração, o que acarreta no transporte de sedimentos para os corpos hídricos, que contribuirão para a deposição e consequente assoreamento (OLIVEIRA; BEZERRA, 2017).

A remoção da mata ciliar contribui para o processo de erosão que pode ocorrer de duas formas: (i) a erosão laminar, onde o escoamento difuso das águas pluviométricas removem a camada superficial do solo, conduzindo-a para o curso d'água, ou (ii) pode ser erosão linear, quando as águas se concentram em linhas de fluxo, resultando em incisões na superfície do terreno, tendendo, neste contexto a ser muito mais agressiva e mudando a geomorfologia fluvial consideravelmente. As águas oriundas das chuvas representam o mais expressivo agente erosivo (MORAIS; SALES, 2017).

A questão dos assoreamentos nos rios está diretamente relacionada aos processos erosivos na medida em que é a erosão que fornece os materiais (sedimentos) que darão origem ao assoreamento. Quando não há energia suficiente para transportar o material erodido, este material é depositado (GUERRA, 2005). A erosão e o assoreamento trazem também como consequências uma maior frequência e intensidade de enchentes e alterações ecológicas, na medida em que o acúmulo de material no fundo do rio diminui o tirante hídrico do curso do rio, deixando-o vulnerável ao transbordamento quando ocorre uma elevação do volume de águas (ABDON, 2014).

Conforme relatório realizado pela COHIDRO (2014), o trecho de estudo representa área de grande potencial de erodibilidade, devido à baixa densidade vegetal nativa, que teria a capacidade de reter os sedimentos, diminuindo a erosão laminar oriunda das precipitações. Os fatores antrópicos desencadeiam um processo de desequilíbrio, sendo estes observados a partir do uso e ocupação do solo, como pode ser observado na Tabela 1.

Classes	Área (%)
Área Agrícola	9,60
Área não classificada	0,01
Área Urbanizada	5,03
Campos/ Pastagens	39,94
Corpo Hídrico	2,14
Floresta Estacional / Vegetação Arbórea Densa	5,53
Floresta Estacional / Vegetação Arbórea Esparsa	0,58
Floresta Ombrófila / Vegetação Arbórea Densa	11,55
Floresta Ombrófila / Vegetação Arbórea Esparsa	0,85
Florestamento / Reflorestamento	0,28
Restinga/ Mangue	1,07
Vegetação Arbórea Densa	10,62
Vegetação Arbórea Esparsa	12,80

Tabela 1– Uso do solo na bacia
Fonte: Adaptado de CEIVAP (2014)

https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n1.91-103

A partir da análise da Tabela 1 é possível observar a predominância de Campos e Pastagens, na ordem de 40% da área total da bacia. Este tipo de ocupação é caracterizado pelo intenso antropismo e tem a predominância a vegetação herbácea. Este tipo de vegetação é responsável por grandes perdas de solo intensificando os processos erosivos ao longo da bacia, sendo o produto deste processo carreado pela ação, principalmente das chuvas, para os rios. Destaca-se ainda a compactação do solo oriundo do pisoteamento do gado, que resulta em uma menor capacidade de infiltração, logo um maior runoff.

Somadas as áreas florestadas e de vegetação observa-se a ocupação na ordem de 40%. Os processos erosivos são menos intensos em área com cobertura vegetal preservada, sendo sempre mais intensa em áreas desmatadas, pois a velocidade de escoamento é maior do que em áreas com cobertura vegetal, na medida em que a vegetação além de fornecer um obstáculo ao fluxo de água favorece a fixação do solo na encosta, além ainda, de permitir que a água infiltre, diminuindo assim à velocidade do fluxo superficial (RODRIGUES, 2016).

As áreas agrícolas formam a terceira grande classe, na ordem de 10%. Esta modalidade de uso do solo representa outra intensa intervenção antropogênica. As diferentes culturas apresentam formas distintas de suscetibilidade à erosão, mas também representa uma intensa modificação da paisagem e intensa produção de sedimentos.

Uma vez que em uma bacia hidrográfica os fluxos de água tendem a se direcionar para o curso principal, e, por conseguinte, para o exutório, todas as atividades a montante deste são importantes para o entendimento da dinâmica hidrológica da bacia como um todo. Neste sentido os dados apresentados indicam uma intensa atividade antrópica, materializada na atividade agropecuária, na ordem de 50% da área total, indicando que a bacia do Paraíba do Sul possui uma forte tendência a produção de sedimentos.

2.4. Geotecnologias, geomorfologia fluvial e modelagem computacional.

O monitoramento tanto hidrológico, a partir de medições in loco, quanto espacial, por meio de sensoriamento remoto e aerofotogrametria, tem papel relevante no diagnóstico das variações morfológico-fluviais. Neste sentido sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas com fotografias aéreas tem sido usado para diagnósticos de processos erosivos, uso e ocupação do solo, mapeamento de massas d'água, entre outros.

A atividade de mapeamento de modificações antrópicas em cursos de rios tem sido amplamente utilizada no mundo. Langat et al. (2018) propõe a utilização de fotografias aéreas de alta resolução de 1975 e imagens do satélite Landsat de 2017 para estudo multitemporal da geomorfologia do rio Tana, no Quênia. Batalla et al. (2017) utilizou de imagens de alta resolução do Google Earth Pro, entre 2003 e 2016 para a caracterização do rio Ñuble no Chile.

No Brasil, o estudo da Coopetec (2013), que utiliza de modelagem computacional, por meio do modelo SisBaHiA, para realizar diagnóstico e prognóstico da intrusão salina no estuário rio Paraíba do Sul, utilizou de técnica de SIG (Sistema de Informação Geográfica), a partir das imagens do Google Earth Pro, para a obtenção dos contornos do rio e posterior implementação no modelo. O mesmo trabalho tendo identificado trechos de rio modificados, observa que o levantamento das ilhas tende a enriquecer modelo e sugere que estes dados sejam implementados em trabalhos futuros, validando assim a iniciativa deste trabalho.

Outras aplicações das geotecnologias em monitoramentos e prognósticos ambientais, diz respeito à estimação de variáveis fisiográficas e hidrológicas em bacias hidrográficas, tais como: altitude, declividade, área e perímetro da bacia, uso e ocupação do solo, construção do modelo digital de elevação, coeficiente de rugosidade (manning), isoietas de precipitação, tipos e textura de solo, densidade de drenagem, seções transversais, delimitação de bacias e construção vetorial da rede de drenagem. Todos estes dados são gerados a partir de ferramental de geoprocessamento e pelo menos um deles (variando do modelo e aplicação) serve como entrada em modelos diversos. TAVARES et al. (2019), utilizou o modelo MOHID Land para verificar o desempenho de instalação de um reservatório para controle de cheias na Bacia do Rio Macaé, no Rio de Janeiro, sendo às variáveis de modelo digital de elevação, seções transversais, delimitação da bacia e rede de drenagem, coeficiente de manning e processos de infiltração a partir das cartas de uso e ocupação do solo e tipos de solo, estimadas com ferramental de SIG.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente trabalho avalia as tendências hidrológicas do rio Paraíba do Sul e utiliza de técnicas de SIG, sendo necessário imagens históricas de alta resolução espacial para a vetorização do curso do rio e ilhas, com a finalidade de identificar a área do espelho d'água que foi decrescida do rio e as mudanças morfológicas no leito, que incluem o aumento do processo de sedimentação e deslocamento das margens. O processo de vetorização leva em consideração a interpretação visual do executante e pressupõe, além do conhecimento sobre

o ferramental de geoprocessamento, o conhecimento do local estudado. Por meio dessa vetorização é possível gerar mapas temáticos, extração de dados para operações estatísticas e informações de área do leito do rio preenchida pelo rio e ilhas. Todo o processo de vetorização e estatística foi realizado no software QGIS 3.8.0.

3.1. Séries históricas de vazão e nível

A fim de se avaliar quantitativamente as tendências hidrológicas de redução no rio, foram extraídas as séries históricas de vazão e nível, coletadas na estação fluviométrica da ANA em Campos dos Goytacazes (58974000), a partir do portal HidroWeb (http://www.snirh.gov.br/hidroweb/), entre os anos de 1990 e 2019. Para ambas as curvas foram estabelecidas uma linha de tendência linear, cujo objetivo é verificar o comportamento das variáveis hidrológicas de nível e vazão ao longo do tempo.

3.2. Determinação das datas de análise e sensor orbital

Para a escolha das cenas e garantia de que a variação o leito não corresponderia à sazonalidade do regime das chuvas (cheia e vazante do rio), foi estabelecido como parâmetro para escolha das cenas a proximidade das cotas médias do rio nas datas de interesse.

A primeira imagem escolhida é oriunda da campanha de aerolevantamento realizada pelo IBGE, entre junho e agosto de 2005, disponíveis no site oficial (https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/arquivos-raster.html) e que possui uma resolução espacial de 0,7m, sendo cada foto na escala 1:25.000. A cota média registrada na estação da ANA, citada anteriormente, foi de 609 cm.

A segunda imagem a ser escolhida para comparação necessita ser atual e preferencialmente de alta resolução espacial, para o estabelecimento de uma comparação com maior riqueza de detalhes em relação a primeira imagem. A melhor opção seria uma imagem oriunda de aerofogrametria, mas devido ao elevado custo associado a uma campanha com aeronave ou drone, esta não se apresenta como uma opção viável. Neste sentido uma opção viável seria o uso de sensores orbitais.

Dentre as opções mais recorrentes na literatura, destacam-se as imagens do Google Earth Pro, tal como o trabalho de Batalla et al. (2017), que apesar de alta resolução espacial, inferior a 1m, possuem a limitação de utilização para a grande extensão da área de estudo – 65 km – pois são utilizadas imagens de diferentes datas para compor o mosaico da região, o que inviabiliza a sua utilização para a metodologia imposta nesse trabalho, que necessita de padronização de cota no ponto de controle. Outra limitação diz respeito à possibilidade de substituição das imagens do banco de dados do Google sem aviso prévio, o que impossibilita a reprodução do estudo a qualquer tempo.

A utilização de satélites se configura como a melhor opção para atendimento a metodologia apresentada, pois minimiza a problemática de se obter uma imagem com a mesma cota da primeira imagem, devido à frequência de revisita mensal, que varia conforme o satélite. Outro positivo dessa técnica se refere à área de cobertura de uma única cena ser de algumas dezenas de quilômetros, o que torna um estudo de geomorfologia fluvial viável, pois grandes extensões do rio estão inseridas na mesma cena, ou seja, a cena representa o rio sob as mesmas condições. Um ponto negativo associado a esta técnica se refere ao fato que em condições atmosféricas adversas, tais como a presença de nebulosidade, chuvas ou grande incidência de nuvens, a imagem não é aproveitada, pois não é possível alcançar os alvos na superfície (LIU, 2006).

Foram buscados os satélites disponíveis com imagens gratuitas e de alta resolução espacial, para uma equiparação com a imagem de alta resolução do IBGE. Uma opção amplamente difundida na literatura é o Landsat-8, tal como utilizado no trabalho de Langat et al. (2018). Este é um satélite bastante versátil e gratuito, o que o torna amplamente difundido para uma grande variedade de estudos. Possui uma resolução temporal de 16 dias e uma resolução espacial de 30 m, não sendo a melhor opção para quantificação de variações morfológicas devido ao erro associado à resolução espacial (cada pixel deste satélite possui 900 m^2).

Devido à resolução espacial, este trabalho optou por utilizar o satélite Sentinel-2, cujas imagens são disponibilizadas de forma gratuitas no site Earth Explorer do Serviço Geológico Americano (https://earthexplorer.usgs.gov/).

A missão Sentinel-2, vinculado ao programa Copernicus, desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA), e é composta de 2 satélites (2A e 2B) defasados 180° na mesma órbita, o que permite uma revisita de 5 dias no equador. O satélite 2A foi lançado pela Comunidade Européia e a ESA, em junho de 2015 e 2B em março de 2017, estando os dois em operação. Este satélite é do tipo multiespectral e possui 13 bandas, as quais dispõem a seguinte distribuição de resoluções espaciais: 4 bandas de 10m, 6 bandas de 20m e 3 bandas de 60m, como descreve a Tabela 2 (ESA, 2015).

Bandas	Comprimento de onda central [µm]	Resolução [m]
B01 - Aerossol	0.443	60
B02 - Azul	0.490	10
B03 - Verde	0.560	10
B04 -Vermelho	0.665	10
B05 - Red Edge	0.705	20
B06 - Red Edge	0.740	20
B07 - Red Edge	0.783	20
B08 - NIR (Infravermelho próximo)	0.842	10
B08A - Red Edge	0.865	20
B09 - Vapor de água	0.945	60
B10 - Cirrus	1.375	60
B11 - SWIR	1.610	20
B12 - SWIR	2.190	20

Tabela 2 – Resolução espacial e espectral das 13 bandas
Fonte: Adaptado de ESA (2015)

A data da imagem escolhida do satélite foi de 26/01/2017, que possuía uma cota média de 602 cm no dia da passagem do satélite, no ponto de controle. Esta data foi escolhida tendo em vista necessidade de se manter o nível médio do rio próximo ao nível da campanha do IBGE que foi de 609 cm.

3.3. Processamento das imagens orbitais

As imagens do Sentinel-2 são disponibilizadas como produto Top-Of-Atmosphere (TOA) no nível 1C (L1C) com correção radiométrica e geométrica no sistema de projeção UTM/WGS84 (ESA, 2015). Foi aplicada a correção atmosférica DOS1, DarkObjectSubtraction, cuja finalidade é a redução da influência da atmosfera na qualidade da imagem. Para etapa de pré-processamento, foi utilizado o plugin do SCP, Semi-AutomaticClassification, disponível no catálogo de complementos do QGIS.

A fim de se realizar a vetorização do leito do rio foi utilizada a técnica de classificação supervisionada, que consiste no agrupamento de pixels com assinaturas espectrais semelhantes, para identificação dos pixels que correspondem ao espelho d'água e ao contorno das ilhas. Para classificação este trabalho optou pela banda 8, infravermelho próximo. A escolha dessa banda se deu em função do comportamento do infravermelho na água tendendo a absorção, logo, uma menor reflexão na faixa do 0.842 µm. Este comportamento é ilustrado na Figura 3.

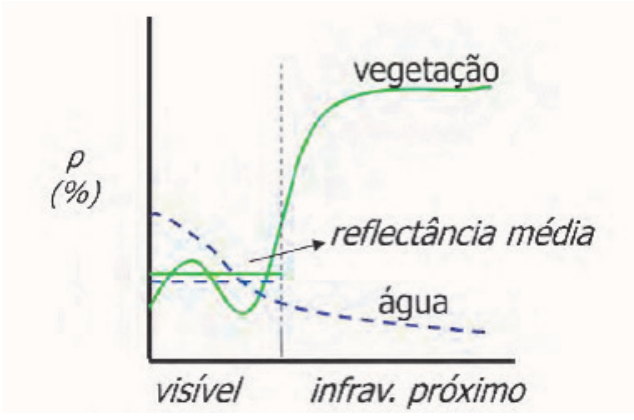

Figura 3 – Assinatura espectral da água e vegetação.
Fonte: Meneses et. al. (2012).

Antes da escolha, foi realizado um experimento de utilização do índice NDWI (Normalized Difference Water Index), que foi concebido com a finalidade de delinear ambientes de águas abertas, automatizando a determinação do limiar entre água e terra (vegetação terrestre e solos) (BRENNER e GUASSELLI, 2015) e pode ser obtido por meio de operações entre as bandas espectrais do verde e infravermelho próximo, conforme Mcfeeters (1996):

$$NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR) \quad (1)$$

O NDWI vem amplamente sendo utilizado em trabalhos de mapeamento de corpos hídricos (CARVALHO JÚNIOR (2018); MARTH, MOURA, KOESTER (2016); BRENNER, GUASSELLI (2015)), no entanto, neste trabalho, o resultado do infravemelho próximo se mostrou mais adequado para o monitoramento de pequenas variações morfológicas. Na Figura 4, pode-se observar que a resposta do NDWI apresenta pequenas variações na margem e no contorno das ilhas, ocasionando em erro de interpretação no sentido de diminuição do espelho d'água, talvez pelo fato da grande presença de material particulado e da pequena lâmina d'água associada nas margens do rio e ilhas. Uma vez que o infravermelho próximo é absorvido pela água, a resposta visual tende a ser bem mais coerente com a realidade, apresentando uma resposta satisfatória em pequenas profundidades e com intensa presença de material particulado. Segundo Meneses et al. (2012), a reflectância média da água é muito próxima na região do visível e são facilmente discriminadas na imagem do infravermelho próximo de um sensor multiespectral. Ainda destaca-se a interpretação visual do operador como sendo de vital importância ao êxito da análise.

Adicionalmente à análise acima descrita foi observada a composição colorida fornecida pelo software Google Earth Pro, na data de interesse, de forma a corroborar com

a escolha do infravermelho próximo. A interpretação visual da composição colorida associada à cena do satélite apresentou maior semelhança de contorno do infravermelho próximo que o NDWI.

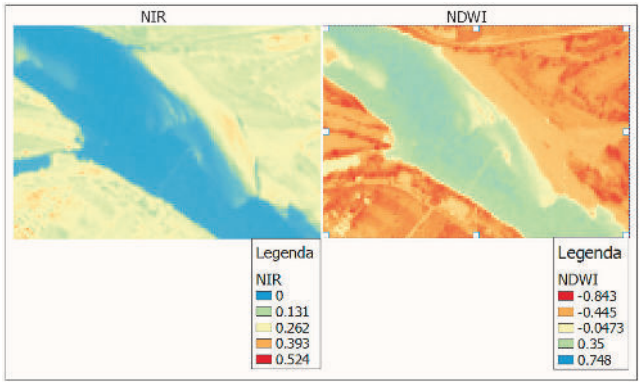

Figura 4 – Comparação NIR x NDWI.
Fonte: elaborado pelos autores.

3.4. Validação: Comparação Google Earth x Sentinel-2

A fim de validar o uso do satélite Sentinel-2, foram buscadas no software Google Earth Pro imagens de alta resolução que dispusessem da mesma cota do rio em uma data próxima do satélite.

Neste sentido, foi utilizada uma imagem do Google Earth Pro de 11/08/2016 (acessada em 02/12/2018) com uma cota do rio em 468 cm. Foi vetorizado no software de geoprocessamento QGIS um trecho de 8,3 km do rio, que corresponde a 12,7 % do curso total de interesse, constituindo assim um trecho de controle para validação.

A cena do Sentinel-2 escolhida para a comparação foi de 29/08/2016, sendo a cota do rio encontrada nesta data de 468 cm (mesmo valor da imagem do Google de 11/08/2016). A banda escolhida para vetorização do leito do rio foi a 8, com resolução espacial de 10 m e que corresponde ao infravermelho próximo – NIR (Near-infrared), de comprimento de onda central de 0,842 µm.

Após a classificação foi realizada a vetorização da imagem, no mesmo trecho, referente à imagem do Google Earth Pro utilizada, sendo obtidos os valores conforme Tabela 3.

Foi possível observar que a vetorização da imagem do Google Earth Pro apresentou uma área de 3,433 km², enquanto à imagem do Sentinel-2, apresentou uma área de 3,49 km² resultando em uma diferença de 1,69%. A sobreposição dos contornos das duas imagens associadas à baixa diferença descrita resultou na validação da imagem do satélite Sentinel-2 para a metodologia proposta.

	Data	Nível (cm)	Área vetorizada (km²)
Google Earth Pro	11/08/2016	468	3,433
Sentinel-2	29/08/2016	468	3,491
		Diferença	1,69%

Tabela 3 – Validação da imagem do Sentinel-2 a partir da imagem do Google Earth Pro
Fonte: elaborado pelos autores.

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Tendências hidrológicas

O perfil altimétrico da região de Campos dos Goytacazes é modesto e plano, sendo de origem geológica recente. O volume de água ocupado regularmente no rio Paraíba do Sul, tem decrescido ao longo do tempo, fruto principalmente, das diversas obras de intervenção antrópica a montante. Conforme Marengo e Alves (2005),

> a bacia do rio Paraíba do Sul tem sido palco para a implantação de uma série de aproveitamentos de usos múltiplos da água (...) dentre as possíveis causas desta redução sistemática nas vazões e cotas do Paraíba do Sul, temos: (a) efeitos antropogênicos de uso da água para abastecimento e geração de energia, com a construção de barragens e açudes; (b) desvio de rios para usos na agricultura e que pode aumentar a evaporação; (c) mudanças no uso da terra que pode afetar todo o ciclo hidrológico; (d) mudanças gradativas no canal do rio devido à sedimentação e deposição de sedimentos que podem não ter sido considerado no momento de calcular vazões usando a curva chave; e, finalmente, (e) mudanças gradativas no regime e distribuição de chuvas na bacia, decorrentes de mudanças climáticas regionais (MARENGO e ALVES, 2005, p3-4)

Os autores apresentam as diversas possibilidades de alterações na bacia, que irão implicar na diminuição no fluxo de água. Há de se notar que a maior parte das razões diz respeito a ações antropogênicas, sendo a gestão integrada das bacias hidrográficas uma ação que vai além dos limites municipais ou divisas estaduais.

As Figuras 5 e 6 representam as curvas de nível e vazão e suas respectivas linhas de tendência linear. Em ambos os casos foram identificadas tendências de redução, notadamente a partir de 2012.

Corroborando com esta tese, o estudo de Barroso et al. (2019) descreve a influência direta da vazão no processo de salinização da foz, estabelecendo um vínculo entre a intrusão salina e a diminuição da vazão no rio. Os autores

https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n1.91-103

apresentam que o fluxo sustentável de vazão na foz do rio Paraíba do Sul, para manter uma condição de equilíbrio seria de 567.45 m³/s. Ao se observar as tendências de vazão (Figura 3), especialmente a partir de 2012, é possível observar que as vazões se encontram na média sempre abaixo do limiar de 500 m³/s, e os picos superiores a este limiar são referentes a sazonalidade dos regimes pluviométricos, que no clima tropical, estão no período de verão (período de cheia).

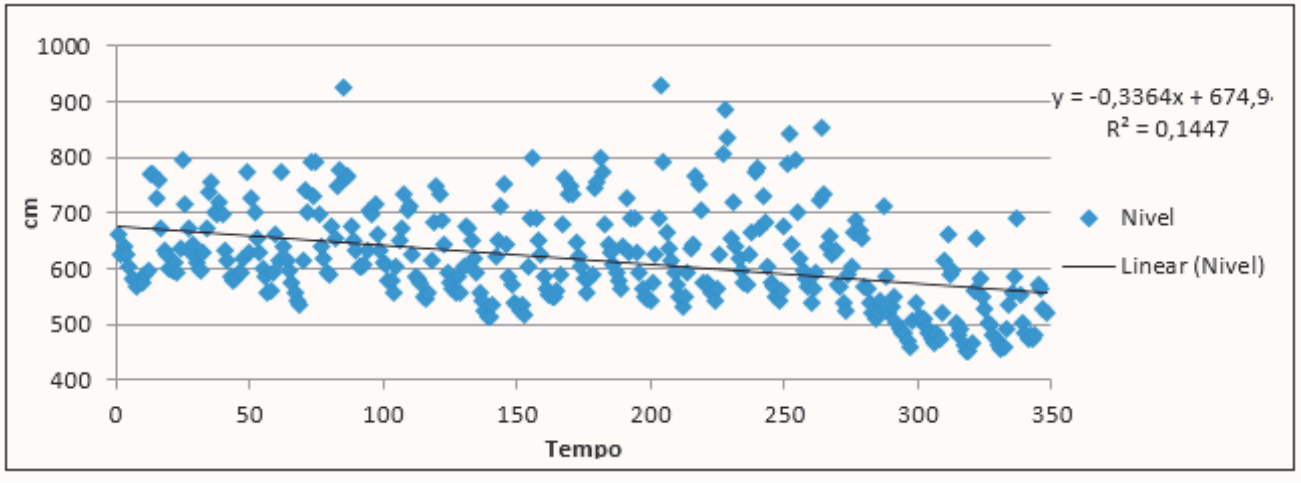

Figura 5 – Evolução do decréscimo dos valores de nível do Rio Paraíba do Sul, coletados na estação fluviométrica da ANA, em Campos dos Goytacazes, entre 1990 e 2019.
Fonte: Elaborado pelos autores

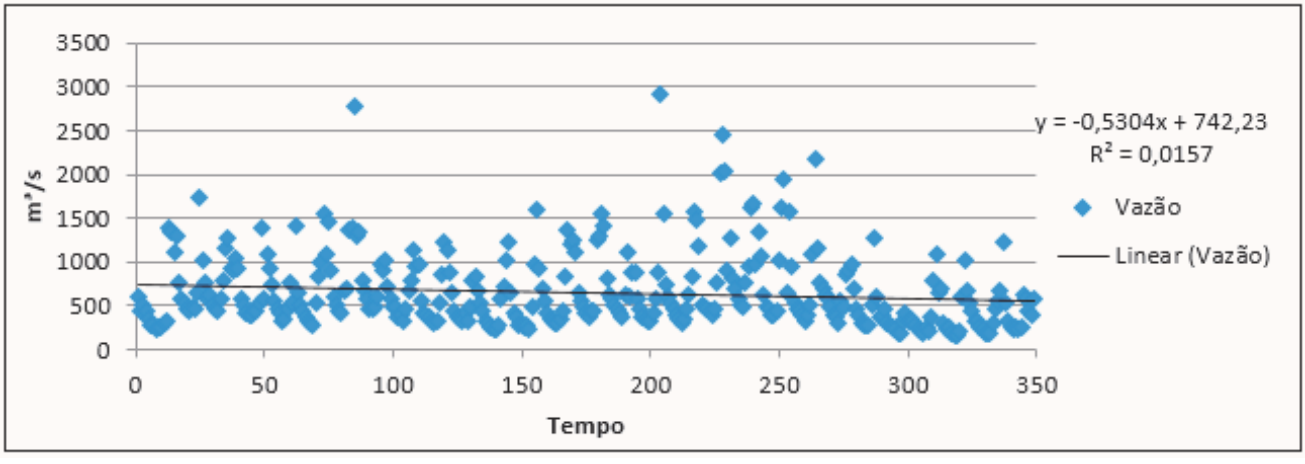

Figura 6 – Evolução do decréscimo dos valores de nível do Rio Paraíba do Sul, coletados na estação fluviométrica da ANA, em Campos dos Goytacazes, entre 1990 e 2019.
Fonte: Elaborado pelos autores

Os pontos mais elevados, em ambos os gráficos, representam a sazonalidade do regime de chuvas na extensa bacia do Rio Paraíba do Sul, entretanto as maiores concentrações de pontos indicam uma tendência de queda, tal como, evidencia a linha de tendência linear.

A partir desses dados, é possível observar uma forte tendência à diminuição do volume de água no rio, implicando na possibilidade de levar o curso à exaustão se não forem buscadas alternativas para as sucessivas intervenções no rio.

4.2. Variações morfológicas ocorridas entre junho de 2005 e janeiro de 2017

Após validação da imagem do Sentinel-2 para observação de pequenas variações na geomorfologia fluvial, foi realizada a vetorização de todo o trecho de 65 km, representando na Figura 1, tanto a partir da imagem do aerolevantamento do IBGE, quanto do Sentinel-2.

As datas e cotas médias são expressas na Tabela 4.

https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n1.91-103

Fonte da imagem	Data	Nível (cm)
Aerolevantamento do IBGE	Jun a ago/2005	609
Sentinel-2	26/01/2016	602

Tabela 4 – Condições de cota no período de análise
Fonte: elaborado pelos autores.

A tentativa de se obter a mesma cota média evidenciou a diminuição do volume do rio. A Tabela 4 mostra que a obtenção de cotas semelhantes se deu em épocas diferentes do ano, onde o inverno (aerolevantamento do IBGE) representa o período de vazante do rio devido à baixa pluviosidade e o verão (imagem do Sentinel-2) representa o período de cheia devido à alta pluviosidade. Uma vez que a equiparação das cotas se deu em estações do ano diferentes e as curvas históricas mostram a mesma tendência, é possível inferir uma diminuição do volume total do rio.

A perda de volume do rio está associada à perda da capacidade de transporte, que além dos processos estuarinos de intrusão salina, também representam um problema de gestão de recursos hídricos associados à disponibilidade hídrica ao longo de seu curso, bem como aos processos sedimentológicos.

A vetorização do leito do rio e a sobreposição dos contornos nos permitem observar consideráveis variações geomorfológicas no curso do rio, conforme evidencia a Figura 7.

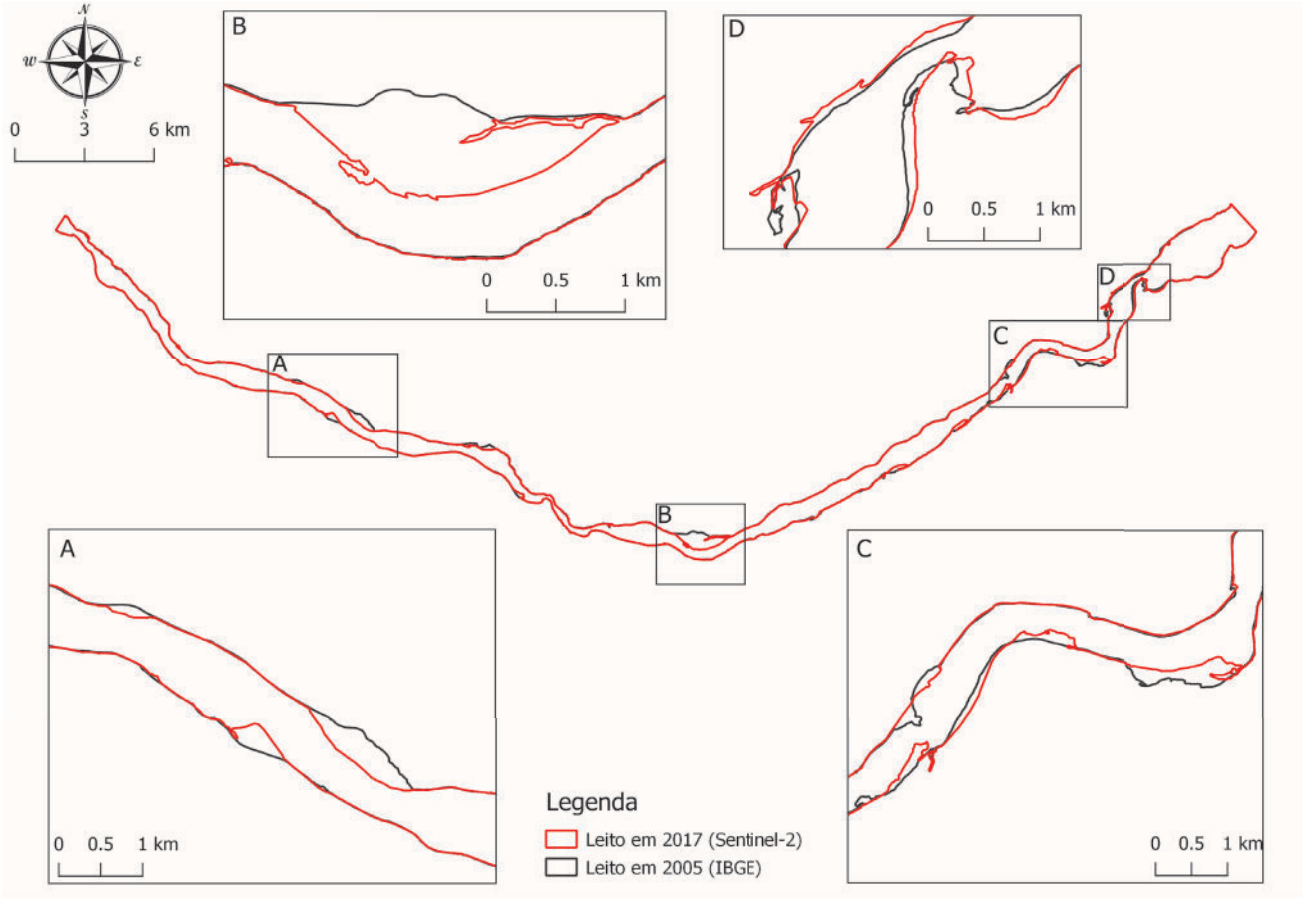

Figura 7 – Variações morfológicas no trecho de interesse entre os anos de 2005 e 2017.
Fonte: elaborado pelos autores.

Estas variações refletem espacialmente as modificações que ocorreram e continuam ocorrendo na morfologia do rio Paraíba do Sul, ao longo dos últimos 12 anos. É possível, por meio de ferramentas de geoprocessamento, realizar a quantificação dessas mudanças, sendo estas expressas conforme a Tabela 5.

Variações morfológicas	Jun a Ago/2005	26/01/2017	2017/2005 (Absoluto)	2017/2005 (%)
Área total das ilhas (km^2)	16,30	14,30	-2,00	-12,27%
Área total do leito do rio (km^2)	49,92	47,66	-2,26	-4,53%
Largura média (m)	766,84	732,09	-34,75	-4,53%

Tabela 5 – Estatísticas das variações morfológicas no trecho de interesse entre os anos de 2005 e 2017.
Fonte: elaborado pelos autores.

No que se refere à largura média no trecho estudado, a Tabela5 apresenta uma perda de 34,75m ou 4,53%, facilmente observada na espacialização das variações morfológicas expressas na Figura 7, onde é possível notar que o contorno indicado como sendo do ano de 2017 se encontra quase sempre inserido no contorno referente ao ano de 2005. Esse afunilamento demonstra espacialmente essa perda de largura média no rio.

A partir desse afunilamento é possível observar que o rio está gradativamente perdendo área, sendo quantificado neste estudado o valor de 2,26 km², expresso na Tabela 5, que representou a área de espelho d'água que foi decrescida em 2017, quando comparada com 2005.

Outro dado de relevância diz respeito ao processo de incorporação de ilhas às margens do rio. Este comportamento pode ser observado no ponto B da Figura 7, que representa uma ilha que existia em 2005, mas que foi incorporada a margem devido à redução do volume de água, possivelmente ocasionada pela ação antrópica no sentido de intensificação do uso da água. O valor de 2 km², expresso na Tabela 5, referente a perda de área das ilhas, são ocasionadas pelas incorporações destas a margem.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho evidenciou significativas mudanças na geomorfologia fluvial do baixo curso do rio Paraíba do Sul, onde foi possível perceber, que entre os anos de 2005 e 2017, houve perda significativa na largura média do rio na ordem de 34,75m e na área total na ordem de 2,26 km². Estes dados são de relevância e contribuem para o diagnóstico dos processos geomorfológicos do rio Paraíba do Sul. Recomenda-se para trabalhos futuros o comparativo com outros métodos para confrontação desses valores, uma vez que não há dados para comparação disponível na literatura.

A utilização das imagens do satélite Sentinel-2, mostrou-se eficaz no processo de monitoramento e quantificação da dinâmica geomorfológico fluvial do rio Paraíba do Sul, configurando-se como uma ferramenta de baixo custo para subsidiar ações de gestão dos comitês de bacias hidrográficas. Foi possível espacializar e quantificar as modificações na geomorfologia fluvial, aonde ilhas vêm sendo incorporadas às margens, o leito principal está perdendo largura e as ilhas restantes estão aumentando extensão ao longo de seu curso.

Do ponto de vista hidrológico, este trabalho fez uma breve discussão sobre a diminuição das vazões, e, por conseguinte, da capacidade de transporte do rio a partir da série histórica (1990 – 2019) medidos na estação fluviométrica da ANA, no município de Campos dos Goytacazes. Trabalhos prévios no rio como o de Morengo e Alves (2005) e Barroso et al. (2019) identificaram essa tendência de queda na vazão, onde o segundo associou a intrusão salina, temática estratégica para o comitê de bacia, a diminuição da vazão no rio.

No que se refere ao nível à série histórica observou (1990 – 2019) uma tendência significa de redução a partir de 2012, indicando uma perda de volume no rio. Um estudo mais detalhado de caráter de disponibilidade hídrica, transposição, captações, associado às tendências de precipitação na bacia pode indicar as causas.

Especificamente sobre o processo de sedimentação, a metodologia utilizada nesta pesquisa não se mostrou conclusiva, deixando para um próximo trabalho a iniciativa de quantificação dos processos sedimentológicos. Não há a princípio evidências conclusivas de que a progradação da margem convexa dos meandros a o alongamento das ilhas sejam oriundas diretamente de um processo de assoreamento crescente ou se apenas ocorreu uma redução do espelho d'água devido ao aumento da captação a montante.

REFERÊNCIAS

ABDON, M. M. **Os impactos ambientais no meio físico, erosão e assoreamento na bacia hidrográfica do Rio Taquari, MS.** 2014. 319p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos: USP.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Sistema Nacional de Informações sobre Recuros Hidricos, Portal HidroWeb.** Disponível em: < http://www.snirh.gov.br/hidroweb> Acesso em: 5 de dezembro de 2018.

BARROSO, G. L.; SILVA, L B. C.; OLIVEIRA, V, P. S. Analysis of the correlation between salinity and environmental variables in the estuary of the Paraiba do Sul river – Brazil. In RODRIGUES, T. A.; LENDRO NETO, J.; GALVÃO, D. O. (org). ***As ciências do mar em todos os seus aspectos.*** *1ed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019, p. 103-117.*

*BATALLA, R. J; IROUMÉ, A; HERÁNDEZ, M; LLENA, M.; MAZZORANA, B; VERICAT, D. R****ecent geomorphological evolution of a natural river channel in a Mediterranean Chilean basin.*** *Geomorphology, v. 303, p. 322-337, 2018.*

BRENNER, V. C.; GUASSELLI, Laurindo Antônio. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí/RS–Brasil.In: **ANAIS XVII SIMPÓSIO**

BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO-SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, v. 25, 2015.

CARVALHO JÚNIOR, O. A. **Aplicações e perspectivas do sensoriamento remoto para o mapeamento de áreas inundáveis.**Revista de Geografia (Recife), v. 35, n. 4, 2018.

COHIDRO. Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio paraíba do sul e planos de ação de recursos hídricos das bacias afluentes, **r3-b: relatório de diagnóstico.** CEIVAP, Rio de Janeiro, 226 p, 2014.

COMITÊ PARA INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). **Dados geoambientais,** 2019. Disponível em: < www.ceivap.org.br/dados-gerais.php>. Acesso em: 26 de junho de 2019.

COPPETEC (Fundação Coppetec, Laboratório de Hidrologia). Plano estadual de recursos hídricos do estado do Rio de Janeiro, r3-b: temas técnicos estratégicos, rt-07 – **estudos de avaliação de intrusão salina.** Governo do Estado do Rio de Janeiro/Secretaria de Estado do Ambiente/INEA, Rio de Janeiro, 75 p, 2013.

ENGECORPS. **Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul,** R 02 – Coleta de Dados Engecorps - Brasília: ANA, SUM, 2010. 285p.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Sentinel-2 User Handbook.** 2015. 64p. Disponível em: < https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook>. Acesso em: 21 de dezembro de 2018.

GUERRA, A. J. T. (org).**Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. 6.ed. Bertrand Brasil: 2005. 472p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Ortofotos da Bacia do Rio Paraíba do Sul.** Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e--referenciais/arquivos-raster.html> Acesso em: 23 de setembro de 2018.

LANGAT, P. K.; KUMAR, L.; KOECH, R. ***Monitoring river channel dynamics using remote sensing and GIS techniques.****Geomorphology, v. 325, p. 92-102, 2019.*

LEWIN, J., & ASHWORTH, P. J. ***Defining large river channel patterns:*** *Alluvial exchange and plurality. 2014. Geomorphology, 215, 83–98.*

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. 908p.

LORANG, M. S.; HAUER, F. R. Fluvial geomorphological processes. In: ***Methods in Stream Ecology****, Volume 1 (Third Edition). 2017. p. 89-107.*

TAVARES, LUIZA PAULA DA SILVA ; LUGON JÚNIOR, JADER ; RODRIGUES, P. P. W. ; KALAS, F. A. ; WASSERMAN, J. C. . Reservoir Implantation for Flood Dampening in the Macaé River Basin Using the MOHID Land Model. CIÊNCIA E NATURA, v. 41, p. 1-10, 2019.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. T**endências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.

MARTH, J. D.; MOURA, N. S. V.; KOESTER, E. **Localização e mapeamento de áreas úmidas na Sub-bacia hidrográfica Arroio Santa Isabel, através do método NDWI.** Geografia (Londrina), v. 25, n. 1, p. 23-41, 2016.

MENESES, P. R. et. al. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.**v. 11, 2012. Brasília, DF: Universidade de Brasília– CNPq.

McFEETERS, S. K. (1996). ***The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features.*** *InternationalJournalof Remote Sensing, 17(7), 1425–1432.*

MORAIS, R. C. S; SALES, M. C. L. **Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica.** Caderno de Geografia, v. 27, n. 1, p. 84-105, 2017.

OLIVEIRA, T. C. E.; BEZERRA, M. C. L. **Manejo Sustentável da Água no Meio Urbano:** O Caso de Brasília. In: Anais [do] ENSUS 2017 - V Encontro de Sustentabilidade em Projeto. Florianópolis: UFSC/ VIRTUHAB, 2017. v. 1. p. 1-1702

RODRIGUES, J. P. S. **Avaliação da qualidade ambiental urbana na bacia hidrográfica do Córrego das Lajes em Uberaba (MG).** 2016. 127p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geografia: UFG.

TAVARES, L. P. S.; LUGON JR., J.; RODRIGUES, P. P. W.; KALAS, F. A.; WASSERMAN, J. C. ***Reservoir Implantation for Flood Dampening in the Macaé River Basin Using the MOHID Land Model.*** *CIÊNCIA E NATURA, v. 41, p. 1-10, 2019.*

TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009, 557p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. ***Earth Explorer, Sentinel-2****. Disponível em: < https://earthexplorer.usgs.gov/> Acesso em: 30 de novembro de 2018.*

AUTORES

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6541-4720
DHIEGO DA SILVA SALES | Instituto Federal Fluminense | Graduado em Geografia - IFF / Mestrando em Engenharia Ambiental – IFF | Endereço: Rua Antuerpio Soares Young, 109 – Residencial Kopenhagen, Apto 102, Jardim Flamboyant, Campos dos Goytacazes/RJ - CEP: 28015-220 | e-mail: dhiego.sales@outlook.com

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5981-0345
VICENTE DE PAULO SANTOS DE OLIVEIRA, PhD. | D.Sc. Eng. Agrícola- UFV | Instituto Federal Fluminense | Endereço: Rua Visconde de Itaboraí, 561 - Cond. San Remo casa 52 Parque Rosário Campos dos Goytacazes – RJ |e-mail: vsantos@iff.edu.br

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8030-0713
JADER LUGON JUNIOR, PhD. | Modelagem Computacional | Instituto Federal Fluminense | Endereço: Rua Maria D'Angelo Magliano, 159 bloco 7 apto 302 | e-mail: jlugon-jr@gmail.com

COMO CITAR ESTE ARTIGO

SALES, Dhiego da Silva; OLIVEIRA, Vicente de Paulo Santos de; LUGON JUNIOR, Jader. Geotecnologias como Suporte ao Diagnóstico da Dinâmica Geomorfológico-Fluvial do Baixo Curso do Rio Paraíba do Sul. **MIX Sustentável, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 91-103, mar. 2020**. ISSN 24473073. Disponível em:<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>. Acesso em: dia mês. ano. doi:https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n1.91-103.

DATA DE ENVIO: 04/10/2019
DATA DE ACEITE: 15/01/2020