

ALTERAÇÕES DE LINHA DE COSTA, EM ESCALA MULTIDECADAL, NO FLANCO NORTE DO DELTA DO RIO PARAÍBA DO SUL ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO NDWI NA PLATAFORMA GOOGLE EARTH ENGINE

André Paulo Ferreira da Costa¹

Karina Costa de Almeida¹

Sílvio Roberto Oliveira¹

Thaís da Silva Dornellas¹

Thaís Baptista da Rocha¹

1. Universidade Federal Fluminense – Programa de Pós-Graduação em Geografia - R. Passo da Pátria, 152-470 - São Domingos, Niterói – RJ, Brasil (costa_andre@id.uff.br, karinacosta@id.uff.br, silviooliveira@id.uff.br, thaisdornelas@id.uff.br, thaisbaptista@id.uff.br)

ABSTRACT

Several automated methods have been developed based on the historical series of orbital images on the Google Earth Engine platform. In this sense, the objective of the present work is to monitor the dynamics of the shoreline through the application of a method developed on the Google Earth Engine platform and to compare the results obtained from this method with results obtained through topographic surveys and the Aqua Monitor Shoreline platform. The developed method is based on the application of the Normalized difference Water Index (NDWI) in two transects in the study area. It was possible to observe different behaviors between the north and south transects. It was possible to observe lapses in the advance of the shoreline in the northern transect, which until then were not demonstrated in the literature. It was also possible to observe consonance between the results obtained through the method developed with data obtained from topographic monitoring and the Aqua Monitor Shoreline platform.

Keywords: shoreline monitoring, google earth engine, change detection.

INTRODUÇÃO

O cenário de mudanças globais projetadas para o próximo século acendeu um alerta especial sobre as zonas costeiras densamente povoadas. A projeção de intensificação de eventos extremos poderá desencadear grandes perdas humanas e econômicas nessas áreas, dentro das quais se encontram a maior parte das grandes cidades do mundo (LUIJENDIJK *et al.*, 2018; DONCHYTS *et al.*, 2016; MMA, 2002). Diante disso, o monitoramento das alterações ocorridas nesses ambientes tem sido integrado a modelos de previsão de mudanças por pesquisadores e gestores em escalas globais e locais (RANASINGHE, 2016; BOAK & TURNER, 2005; LI *et al.*, 2001).

Para tanto, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos em escalas temporais e espaciais diversas. A partir de 2008, com a liberação de imagens pré-processadas da série histórica Landsat por parte do serviço geológico norte-americano (USGS), o

entendimento detalhado de diversos processos, incluindo variações de área de corpos d'água, ocorridos nas últimas quatro décadas tornou-se possível (BANSKOTA, 2014; PANTOJA *et al.*, 2009). Particularmente, a partir de 2016, com o desenvolvimento da plataforma *Google Earth Engine* (GEE), o fácil acesso e a grande capacidade de processamento dessas imagens em conjunto com dados climáticos variados elevaram o patamar dessas pesquisas (LUIJENDIJK *et al.*, 2018; KENNEDY *et al.*, 2018; GORELICK *et al.*, 2017; DONCHYTS *et al.*, 2016).

Atualmente, existem muitos algoritmos desenvolvidos para detecção de mudanças da superfície terrestre na linguagem *Javascript* disponíveis no *Google Earth Engine*. Kennedy *et al.* (2018), por exemplo, adaptou o algoritmo *Landtrendr* originalmente desenvolvido em IDL (*Interface Description Language*) para *Javascript* permitindo a sua implementação no GEE. O *Landtrendr* é um método de detecção de mudança baseado na segmentação da trajetória temporal espectral da superfície analisada. O algoritmo foi desenvolvido para a detecção de tendências e sub-tendências em coberturas florestais (BANSKOTA, 2014; KENNEDY *et al.*, 2010).

No que tange especificamente aos estudos relacionados as áreas costeiras, Donchyts *et al.* (2016) desenvolveu um método de detecção de mudanças baseado na demarcação de limites dinâmicos que mostra em escala global todas as mudanças na superfície de área emersa para água. Luijendik *et al.* (2018), partindo do mesmo princípio, desenvolveu um novo método baseado em transectos espaçados por 500 metros para identificar o estado das praias arenosas em escala global. A partir desse novo método, Luijendijk *et al.* (2018) estimou as taxas de avanço ou recuo da linha de costa para as praias arenosas de todo mundo nos últimos 33 anos. Os resultados de ambos os trabalhos deram forma a interface *Deltares Aqua Monitor* onde as alterações de área dos corpos hídricos e taxas de alteração da linha de costa podem ser consultadas online.

Há, nesse sentido, grandes possibilidades do desenvolvimento de novos métodos, integração e refinamento de métodos já desenvolvidos. Esses novos métodos têm como desafio processar de forma rápida e integrada grande quantidade de dados geográficos, ampliando a capacidade de obtermos informações em múltiplas escalas espaciais e temporais, as quais servirão de base para obtenção de respostas a problemas e a orientação de tomadas de decisões (CHI *et al.*, 2016).

No flanco norte do delta do rio Paraíba do Sul se observa a formação e crescimento de barreiras arenosas na forma de *spits* (pontais arenosos) (Figura 1). Esse processo, registrado na literatura desde 1926 por Lamego (1945) e, posteriormente, por Dias (1984) e Vasconcelos *et al.* (2016), possui grande repercussão local, levando a formação de extensos sistemas barreira-laguna e alterações abruptas da linha de costa.

Costa & Rocha (2018) a partir da análise de imagens Landsat perceberam que a dinâmica evolutiva desses *spits* é complexa e ainda não totalmente compreendida. Faltam informações acerca da periodicidade dos processos envolvidos, bem como o detalhamento de parte desses processos.

Nessa esteira, o presente trabalho tem por objetivo monitorar alterações ocorridas em dois transectos (Figura 1) presentes na área através da aplicação de um método desenvolvido na plataforma *GEE* em escala sazonal. Como objetivo secundário, esse trabalho busca avaliar o método aplicado através da comparação com dados obtidos em levantamentos topográficos e na plataforma *Aqua Monitor Shoreline*.

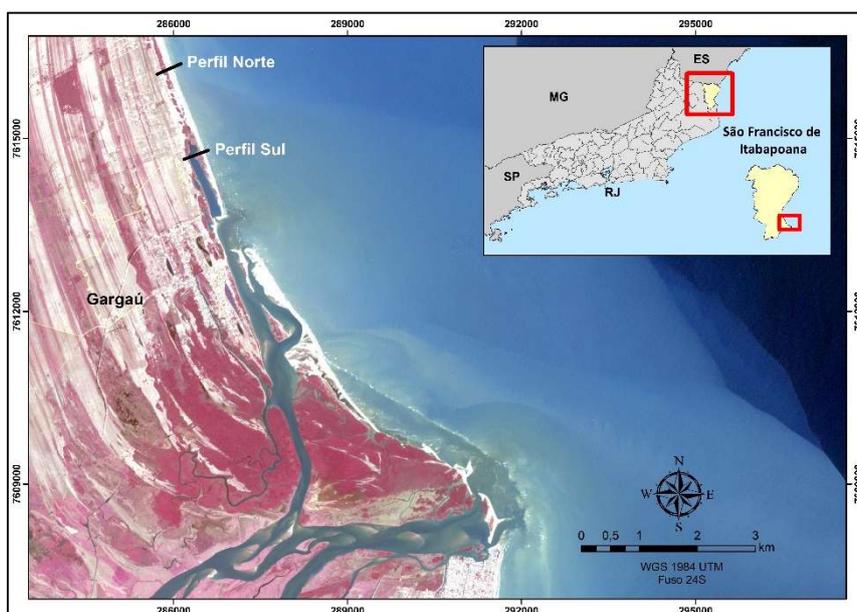


Figura 1. Localização da área de estudos. Imagem RapidEye-4. Composição RGB 432.

METODOLOGIA

A rotina desenvolvida no presente trabalho tem por objetivo analisar as repercussões da dinâmica das barreiras sobre o comportamento da linha de costa partindo de uma análise pixel por pixel em dois trechos que coincidem com perfis topográficos monitorados pelo Laboratório de Geografia Física da UFF desde 2008. A análise pixel a pixel engloba o período de monitoramento topográfico de forma que analisaremos comparativamente os resultados obtidos por ambos os métodos. Em complemento, ambos os resultados serão ainda comparados com dados obtidos na plataforma *Aqua Monitor Shoreline*.

Em síntese, a rotina desenvolvida pode ser dividida em três partes principais (Figura 1). A primeira delas diz respeito à obtenção de mosaicos sazonais entre o outono de 1984 e a primavera de 2019 através de imagens Landsat 5, 7 e 8 (sensores LT5, LE7 e LC8, respectivamente). Esta parte da rotina foi adaptada a partir da rotina desenvolvida por

Kennedy *et al.* (2018), responsável por gerar mosaicos anuais para análise de alterações em coberturas florestais.

As imagens utilizadas na composição dos mosaicos pertencem à camada coleção Landsat 1 em nível e categoria 1 de processamento (Landsat Collection 1, Level 1, Tier 1), ou seja, os produtos que atingem os mais altos critérios de qualidade radiométrica e geométrica. Segundo a *United States Geological Survey* (USGS, 2019), esses produtos foram submetidos a calibração radiométrica e ortorretificação usando modelos digitais de elevação e pontos de controle do terreno, garantindo assim, correção de deslocamentos de imagens e erro médio quadrático menor que 12 m. Tal processamento (L1TP) propicia, de acordo com a instituição, produtos com qualidade suficiente para serem utilizados em análises de séries temporais a nível de pixels.

Na composição dos mosaicos foram calculados, para cada pixel, os valores do índice de diferença normalizada da água, NDWI (*Normalized Difference Water Index*) como proposto por McFeeters (1996). A banda verde dos sensores Landsat foi normalizada com a banda relativa ao infravermelho próximo (NIR – *Near Infrared*). Segundo McFeeters (1996), valores maiores que zero (>0) são representativos da presença de corpos hídricos enquanto valores menores que zero (<0) marcam alvos característicos de áreas emersas.

No entanto, as diversas composições de cobertura em escala subpixel podem gerar flutuações no limite de separação teórico entre corpos hídricos e alvos de área emersa (Ji *et al.*, 2009). Visando avaliar a separação dos principais tipos de alvos presentes na área, foi obtido neste trabalho o NDWI para a série histórica em 5 alvos de água, 5 de areia/solo exposto e 5 de vegetação. A distribuição dos valores relativos a cada tipo de alvo foi plotada em um diagrama de caixa (*boxplot*) através do programa *Excel*. Há uma faixa de transição entre +0,1 e -0,1 que separa a distribuição dos valores de água e a distribuição dos valores de área emersa (areia e vegetação).

Os “espumeiros” gerados pela quebra das ondas representam um outro tipo de alvo muito presente nas imagens da área de estudos. Esses espumeiros são, no entanto, de difícil caracterização uma vez que são extremamente variáveis em termos de posição e extensão. Portanto, foram obtidos isoladamente os valores do NDWI relativos a espumeiros observados em um dos mosaicos compostos. Os valores obtidos isoladamente para os “espumeiros” se concentram entre 0 e +0,1. Desse modo, buscando evitar a interpretação incorreta de “espumeiros” como marcadores da linha de costa, estabelecemos a faixa de -0,1 e 0 como zona de transição entre corpos hídricos e área emersa. De acordo com Ji *et al.* (2009), esses pixels possuem uma constituição subpixel variada, ou seja, são compostos de misturas de água, areia e, por vezes, vegetação.

A segunda parte da rotina é responsável pela construção de uma lista única de mosaicos e pareamento consecutivo dos mesmos (Figura 1). Foi criada uma lista com 143 mosaicos, contabilizados entre o outono de 1984 e primavera de 2019. Uma vez obtida a lista de mosaicos e a zona de transição entre água e alvos de área emersa, foi realizado mascaramento para obtenção dos pixels relativos à zona de transição. A obtenção desses pixels possibilitou a demarcação da linha de costa relativa a cada mosaico.

A partir da delimitação da linha de costa, foram elaborados dois transectos (linhas norte e sul), transversais à costa, seguindo o alinhamento de perfis topográficos monitorados, de 2008 até o presente, pelo Laboratório de Geografia Física da UFF (LAGEF). A linha de costa referente ao outono de 1984 foi estabelecida como referência para as demais. O ponto de intersecção entre a linha de costa do outono de 1984 e o transecto foi determinado como ponto de referência (0 metros). As demais posições da linha de costa foram obtidas a partir da distância do ponto de referência com o ponto de intersecção dessas linhas e o transecto através do GEE. De posse das posições de linha de costa foram construídos gráficos no programa *Excel* para análise do comportamento da linha de costa nos dois transectos (norte e sul).

Os perfis utilizados no presente trabalho são monitorados desde 2008, seguindo métodos tradicionais através da utilização nível óptico e estação total. Ambos os perfis foram amarrados em referenciais de nível (RN's) fixos de com posição e altitude conhecidas.

Os dados obtidos em campo foram devidamente transpostos para ambiente digital e processados no software *Excel*. Uma vez processados os dados, foram construídos gráficos de linhas para observação dos perfis. Todos os cálculos realizados a partir dos perfis obtidos tiveram como referência o nível médio do mar fornecido pelo Centro de Hidrografia da Marinha para o Porto de Açu (+0,9m). A cota de zero metros foi utilizada como marcador da posição da linha de costa para esses perfis.

RESULTADOS

A distribuição dos valores do NDWI para os três tipos de alvo mostrou haver uma boa separação entre eles. Os valores relativos as amostras de água apresentaram o maior desvio-padrão (0,140) em comparação às distribuições de areia (0,053) e vegetação (0,063). Da mesma forma, a distribuição relativa à água mostrou a maior oscilação em torno da mediana quando comparada as demais distribuições (Figura 1A). Muito provavelmente essas oscilações se devam as modificações sazonais na vazão e carga sedimentar do rio Paraíba do Sul, uma vez que a banda NIR, utilizada na normalização do NDWI, é sensível à variação de sedimentos em suspensão. O gráfico presente na

(Figura 1B) mostra a variação do NDWI médio para cada estação do ano. Para as amostras de água os valores do índice mostram-se menores nas estações chuvosas (verão e primavera) e maiores nas estações secas (outono e inverno).

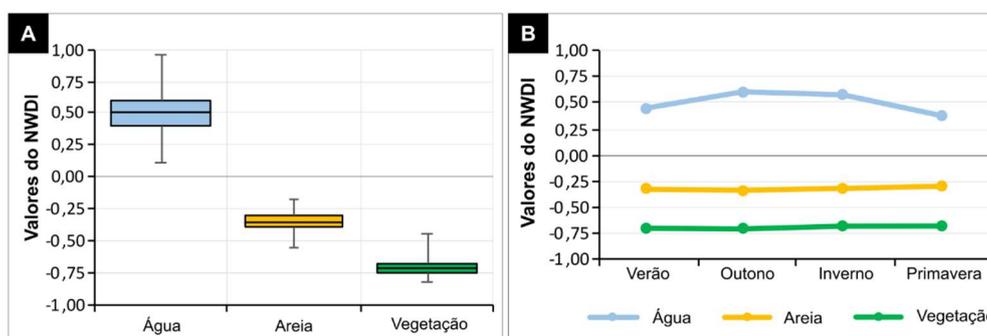


Figura 2. Caracterização dos tipos de alvo. A) Diagrama de caixa mostrando a distribuição dos valores do NDWI assumidos pela água, areia e vegetação. B) Gráfico de linhas que mostra a variação dos valores médios do NDWI para os três tipos de alvo.

Uma vez caracterizados os tipos de alvo presentes na área (Figura 1), foi possível analisarmos o comportamento da linha de costa. A análise do gráfico de variação para o transecto norte mostra tendência geral de acreção da linha de costa que, na escala geológica, resulta na progradação do delta. Esta tendência já havia sido demonstrada em trabalhos anteriores através do uso de técnicas e escalas temporais variadas (COSTA & ROCHA, 2017; VASCONCELOS et al. (2016); FERNANDEZ & ROCHA, 2015).

Além de reforçar as observações sobre tais tendências, o transecto norte do presente trabalho sugere a ocorrência de oscilações curtas e episódicas de erosão e/ou recuo da linha de costa na escala interanual. Esses momentos de oscilações são marcados por “estabilidade dinâmica” ou leve recuo da linha de costa e, em geral, são seguidos de momentos intensos de avanço (Figura 2A). Os dados de Luijendijk *et al.* (2018) acerca das taxas de alteração das linhas de costa em praias arenosas mostram uma tendência muito similar para um transecto próximo ao transecto norte. No gráfico gerado pela plataforma *Aqua Monitor Shoreline* (Figura 2B), é possível observarmos pulsos intensos de avanço da linha de costa interrompidos por breves episódios de estabilidade ou recuo.

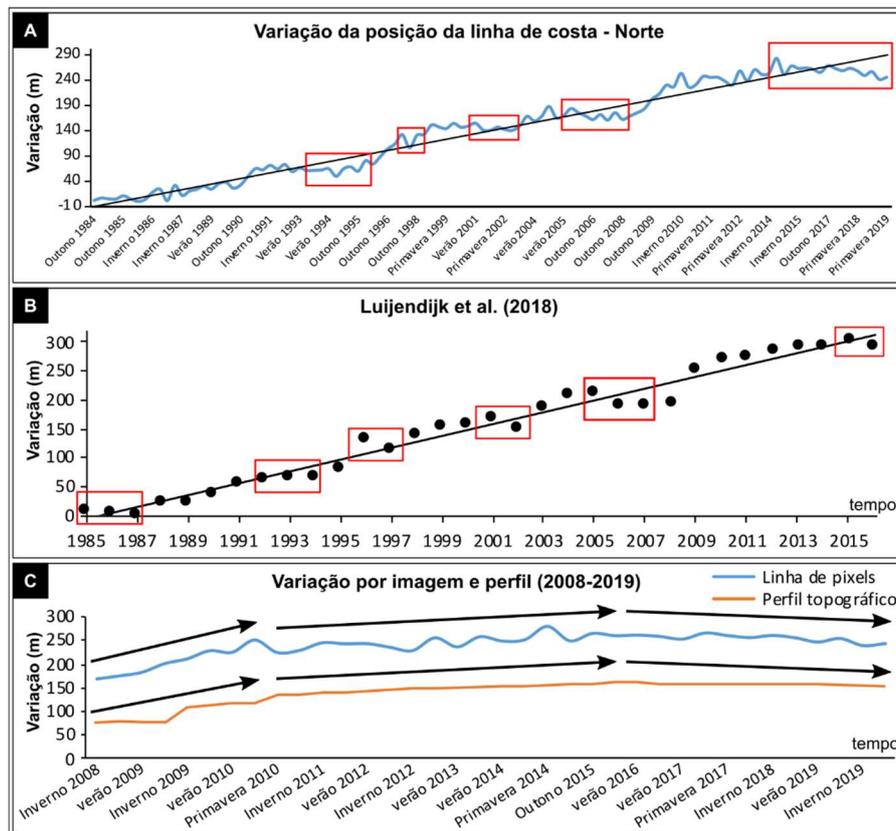


Figura 3. Gráficos contendo as curvas de variação da linha de costa. A) Gráfico de variação da linha de costa obtido a partir de mosaicos sazonais para o transecto norte. Os quadrados vermelhos apontam momentos de oscilação no avanço da linha de costa. B) Gráfico de variação da linha de costa para um trecho próximo ao transecto norte, obtido na plataforma *Aqua Monitor Shoreline*. C) Gráfico comparativo da variação da linha de costa a partir de 2008 obtida através da curva presente em 2A e de monitoramento topográfico.

Ao comparar o monitoramento topográfico da linha de costa a partir de 2008 com a curva de variação da posição da linha de costa obtida nesse trabalho (Figura 2C), percebemos tendências muito similares entre ambas as curvas. Em suma, é possível notar 3 períodos semelhantes. O primeiro se estende de 2008 a 2011 e se caracteriza por intenso avanço da linha de costa. O segundo período se estende de 2011 a 2015 e se caracteriza por diminuição no ritmo de avanço da linha de costa. O terceiro momento se estende de 2015 a 2019 e se caracteriza pela ocorrência de leve recuo da linha de costa. Em termos gerais, entre outono de 1984 e primavera de 2019 a curva de variação obtida através dos mosaicos evidenciou avanço de 244 m, resultando em uma taxa de crescimento aproximada de 7 m/ano. Luijendijk *et al.* (2018) encontrou para um transecto, próximo ao perfil norte, taxa de crescimento da ordem de $8,4 \pm 0,3$ m/ano entre 1984 e 2016. Ao calcularmos taxa de variação entre outono de 1984 e primavera de 2016 encontramos valor aproximado de 8,1 m/ano, compatível ao valor calculado por Luijendijk *et al.* (2018). Nessa mesma esteira, a taxa de avanço calculada entre 2008 e

2020 pelo monitoramento topográfico se apresentou na ordem de 7,5 m/ano, enquanto a taxa calculada através da curva da linha de pixels se apresentou na ordem de 6,9 m/ano.

A análise do gráfico de variação do transecto sul (Figura 3A) mostra, por outro lado, tendência marcadamente irregular de avanço da linha de costa. A observação do gráfico (Figura 3A) mostra que esses pulsos de acreção podem chegar a 400 m entre uma estação e outra. Esses pulsos aparentemente coincidem com os momentos de crescimento longitudinal das barreiras arenosas e da formação do sistema barreira-laguna descritos por Costa & Rocha (2018).

Os dados de Luijendijk *et al.* (2018) acerca das taxas de alteração das linhas de costa em escala global mostram um padrão muito similar para um trecho próximo ao transecto sul. No gráfico gerado pela plataforma *Aqua Monitor Shoreline* (Figura 3B), é possível observarmos avanços grandes e repentinos da linha de costa em 1994, 2002 e 2010. Tais avanços são seguidos por períodos de recuo progressivo da linha de costa.

Nessa esteira, ao comparar o monitoramento topográfico da linha de costa a partir de 2008 com a curva de variação da posição da linha de costa obtida nesse trabalho (Figura 3C), percebemos novamente tendências similares entre ambas as curvas.

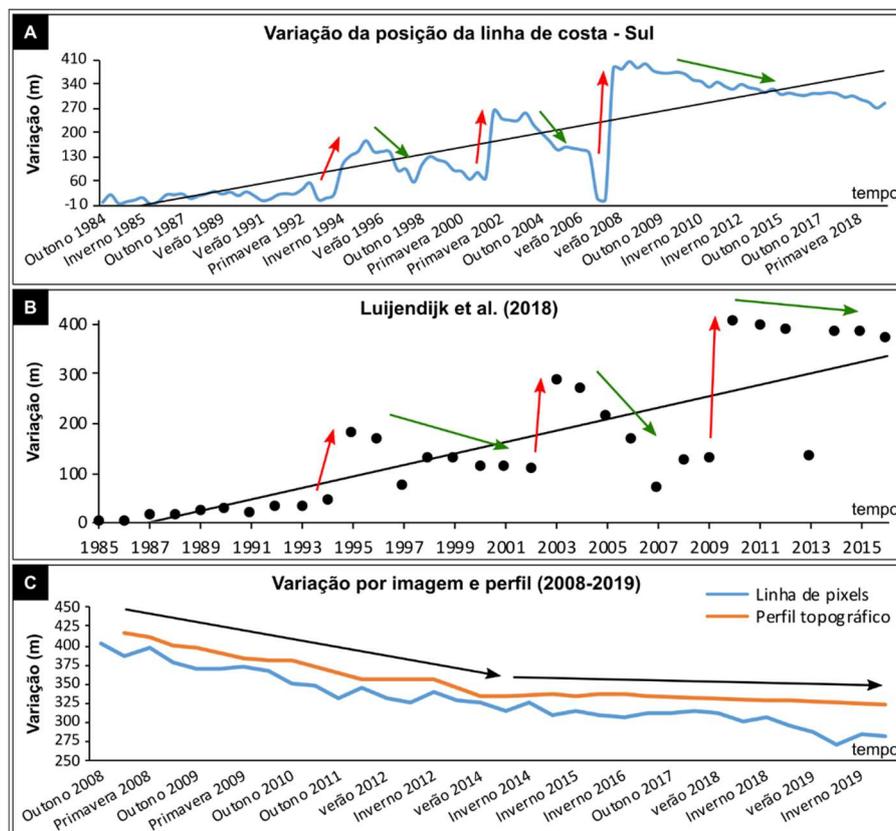


Figura 4. Gráficos contendo as curvas de variação da linha de costa. A) Gráfico de variação da linha de costa obtido a partir de mosaicos sazonais para o transecto sul. B) Gráfico de transecto próximo ao transecto sul obtido na plataforma Aqua Monitor Shoreline. C) Gráfico

comparativo da variação da linha de costa a partir de 2008 obtida através da curva presente em 3A e de monitoramento topográfico.

Em termos gerais, entre o outono de 1984 e a primavera de 2019 a curva de variação para o transecto sul evidenciou avanço aproximado de 282 m, resultando em uma taxa de avanço na ordem de 8 m/ano. Luijendijk *et al.* (2018) encontrou para um transecto próximo ao perfil sul taxa de crescimento da ordem de $10,8 \pm 1,2$ m/ano entre 1984 e 2016. A taxa de variação entre o outono de 1984 e a primavera de 2016 apresentou valor aproximado de 9,5 m/ano, próximo ao limiar mínimo do valor calculado por Luijendijk *et al.* (2018). Similarmente, a taxa de recuo calculada entre 2008 e 2020 pelo monitoramento topográfico se apresentou na ordem de 8,5 m/ano, enquanto a taxa calculada através da linha de pixels se apresentou na ordem de 9,4 m/ano.

É interessante notar que há coincidência entre os períodos onde se observou alterações nas taxas de recuo e avanço, a norte e a sul. Nesse sentido, ao correlacionarmos as taxas de variação calculadas para os perfis norte e sul, observamos relação linear inversa muito forte (rho de Pearson = -0,99). Isto sugere que o avanço da linha de costa a norte está intimamente ligado ao recuo da barreira a sul. É provável que esses lapsos no avanço da linha de costa a norte estejam relacionados com o desenvolvimento das barreiras arenosas a sul.

CONCLUSÕES

Os resultados reforçam observações feitas em trabalhos anteriores acerca da tendência de acreção da linha de costa local e, conseqüentemente, da progradação do delta, bem como dos distintos comportamentos que ocorrem ao norte e ao sul. Além disso, o trabalho contribuiu demonstrando a ocorrência de breves interrupções no avanço da linha de costa ao norte, os quais ainda não haviam sido demonstrados na literatura. Ao correlacionarmos as taxas de alteração obtidas pelos perfis de praia norte e sul, observamos relação inversa muito forte. Esse fato demonstra que os pulsos de acreção ao norte estão intimamente relacionados com o recuo da barreira arenosa/*spit* a sul. Além disso, sugere que os lapsos no avanço da linha de costa a norte podem estar relacionados com a incorporação de sedimentos arenosos nas fases de formação e crescimento das barreiras arenosas que ocorrem a sul.

A relativa consonância dos resultados obtidos a partir da rotina desenvolvida, bem como da plataforma *Aqua Monitor Shoreline* e do monitoramento dos perfis topográficos de praia sugere que o método desenvolvido no presente trabalho é aplicável à estudos que buscam avaliar alterações pontuais de linha de costa sob dinâmicas variadas. Esse método é capaz de fornecer o histórico de alterações da linha de costa em escalas

temporais diversas, as quais podem ser adequadas de acordo com os objetivos do monitoramento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Banskota, A.; Kayastha, N.; Falkowski, M.J.; Wulder, M.A.; Froese, R.E.; White, J.C. Forest Monitoring Using Landsat Time Series Data: A Review. *Can. J. Remote Sens.*, v.40, p. 362–384, 2014.
- Boak, E.H. & Turner, I.L. (2005) Shoreline definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, v.21, p. 688-703, 2005.
- Chi, M.t al. Big Data for Remote Sensing: Challenges and Opportunities. *Proceedings of the IEEE*, v. 104, n. 11, 2016.
- Costa, A. P. F. & Rocha, T. B. Evolução da linha de costa no flanco norte do delta do Rio Paraíba do Sul (RJ) a partir de registros históricos. In: *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. Campinas (SP), v.1, 2017.
- Costa, A. P. F. & Rocha, T. B. Evolução de spits arenosos no flanco norte do delta do rio Paraíba do Sul (RJ), entre 1984 e 2017. In: *Anais do XII Simpósio nacional de Geomorfologia*. Crato (CE), v.1, 2018.
- Donchyts, G. *et al.* Earth's surface water change over the past 30 years. *Nat. Clim. Chang.*, v.6, p.810–813, 2016.
- Evans, G. Deltas: the fertile dustbins of the world. *Proceedings of the Geologists Association*, v.123, pp. 397–418, 2012.
- Fernandez, G. B. & Rocha, T. B. da. Barreiras costeiras holocênicas: geomorfologia e arquitetura deposicional no litoral do rio de janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.16, n.2, p.301-319, 2015.
- Gorelick, N. *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, v.202, p. 18-27, 2017.
- Ji, L.; Zhang, L. & Wylie, B. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, p. 1037-1317, 2009.
- Kennedy, E. R. *et al.* Implementation of the LandTrendr Algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, v.691, 2018.
- Kennedy, E. R.; Cohen, W.B.; Schroeder, T.A. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics. *Remote Sens. Environ.*, v.110, p. 370–386, 2007.
- Kennedy, E. R.; Yang, Z.; Cohen, W.B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr—Temporal segmentation algorithms. *Remote Sens. Environ.*, v.114, p. 2897–2910, 2010.
- Lamego, A. R. O Homem e o Brejo. Conselho nacional de geografia, 1945.
- Li, D.; Di, K. & Ma, R. A Comparative Study of Shoreline Mapping Techniques. *The 4th International Symposium on Computer Mapping and GIS Coastal Zone Management*, Halifax, Nova Scotia, Canada, 18-20 de Junho 2001.
- Luijendijk, A. *et al.* The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, v.8, n.6641, p.1-11, 2018.
- Mcfeters, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote sensing*, v.17, n.7, p. 1425-1432, 1996.
- Ministério do Meio Ambiente (MMA). Projeto orla: fundamentos para gestão integrada. Brasília, 2002. 78p.
- Pantoja, N. V. *et al.* Detecção de mudanças a partir de imagens TM/Landsat na Amazônia Sul Ocidental. In: *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, INPE, p. 6037-6044, 25-30 abril 2009.
- Ranasinghe, R. Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. *Earth-Science Reviews*, v.160, p. 320-332, 2016.
- USGS. Landsat Collection 1 Level 1 Product Definition version 2. South Dakota. 2019.
- Vasconcelos, S. C. de; *et al.* Gênese e morfodinâmica das barreiras arenosas no flanco norte do delta do Rio Paraíba do Sul (RJ). *Revista brasileira de Geomorfologia*, v.17, n. 3, p. 481-498, 2016.