

Estudo das mudanças na linha de costa e vulnerabilidade costeira associada no litoral sul do Rio de Janeiro (SE Brasil)

Study of shoreline changes and associated coastal vulnerability in the southern coast of Rio de Janeiro (SE Brazil)

Breylla Campos Carvalho¹

Josefa Varela Guerra²

Recebido 31 de agosto de 2022; aceito 25 de fevereiro de 2023

RESUMO

O comportamento da linha de costa é um indicativo das tendências à que o sistema costeiro está submetido, pois é a interface de contato da transição continente-oceano. Neste sentido, a Restinga da Marambaia e os arcos praias Macumba/Recreio-Barra da Tijuca (SE do Brasil) foram avaliados quanto à resposta da linha de costa às forçantes meteo-oceanográficas nas escalas temporais de longo e médio prazo, bem como foram mapeados seus graus de vulnerabilidade. Na escala de longo prazo (1986-2018), foram utilizadas imagens de satélite Landsat, dados de reanálise de ondas do modelo WaveWatch3, registros meteorológicos e medições do nível médio do mar. Na escala de médio prazo (2016-2018), foram levantados onze perfis topográficos, com coleta de amostras de sedimentos, nas praias Macumba/Recreio-Barra, além da análise dos registros de boias oceanográficas em águas profundas e rasas. Por fim, estas informações permitiram elaborar um Índice de Vulnerabilidade Costeira à erosão e inundação. De modo geral, 18% da linha de costa encontra-se sob erosão, 52% encontra-se estável e 30% está avançando. No período analisado, foram contabilizados cerca de 400 eventos de tempestade, que durante os anos de La Niña foram mais energéticos e culminaram em uma erosão mais severa. O nível do mar na região apresenta tendência de aumento (1,93 mm/ano). O reflexo destes resultados, somado aos graus de ocupação urbana nas praias estudadas,

¹ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: breylla.carvalho@uerj.br.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5131-6177>

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: josefa@uerj.br.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9406-6470>

exibem baixa vulnerabilidade no setor oeste da Marambaia, enquanto que os setores central e extremo leste configuram-se como altamente vulneráveis. Na Macumba o setor oeste exibe baixa vulnerabilidade, em contraste com o setor leste que é muito vulnerável. No arco Recreio-Barra nota-se o aumento da vulnerabilidade de oeste para leste. Estes resultados indicam que a influência antrópica tem um papel importante em áreas que são naturalmente propensas à alta vulnerabilidade, exigindo uma maior compreensão das condições naturais associadas às intervenções antrópicas.

Palavras chave: *praias arenosas, condicionantes meteo-oceanográficos, análise de séries temporal, teleconexões climáticas, vulnerabilidade costeira.*

ABSTRACT

The coastline pattern is indicative of the trends to which the coastal system is subjected, since it is the contact interface of the continent-ocean transition. In this context, the Restinga da Marambaia and the Macumba/Recreio-Barra da Tijuca beach arcs (SE Brazil) were evaluated as to shoreline response to meteo-oceanographic forcings at the long and medium term time scales, as well as their vulnerability degrees were mapped. On the long-term scale (1986-2018), Landsat satellite imagery, wave reanalysis data from the WaveWatch3 model, meteorological records, and mean sea level measurements were used. At the medium-term scale (2016-2018), eleven topographic profiles were surveyed, with sediment sampling, at Macumba/Recreio-Barra beaches, in addition to the analysis of oceanographic buoy records in deep and shallow waters. Finally, this information allowed the elaboration of a Coastal Vulnerability Index to erosion and flooding. In general, 18% of the coastline is eroded, 52% is stable, and 30% is advancing. In the analyzed period, about 400 storm events were accounted for, which during the La Niña years were more energetic and culminated in more severe erosion. The sea level in the region shows a tendency to increase (1.93 mm/year). The combination of these results and the degree of urban occupation of the studied beaches show low vulnerability in the western sector of Marambaia, while the central and extreme eastern sectors are highly vulnerable. In Macumba the western sector exhibits low vulnerability, in contrast with the eastern sector that is very vulnerable. In the Recreio-Barra arc, vulnerability increases from west to east. These are indicative that human influence plays an important role in areas that are naturally prone to high vulnerability, requiring a greater understanding of the natural conditions associated with human interventions.

Key words: *sandy shores, meteo-oceanographic conditions, time series analysis, climatic teleconnections, coastal vulnerability.*

RESUMEN

El modelado de la línea de costa es indicativo de las tendencias a las que está sometido el sistema costero, ya que es la zona de contacto de la transición continente-océano. En este contexto, los arcos de las playas de Restinga

de Marambaia y Macumba/Recreio-Barra da Tijuca (SE de Brasil) fueron evaluados en cuanto a la respuesta de la línea de costa a los forzamientos meteoceanográficos en las escalas temporales de largo y medio plazo, así como se mapearon sus grados de vulnerabilidad. En la escala de largo plazo (1986-2018), se utilizaron imágenes satelitales Landsat, datos de reanálisis de olas del modelo WaveWatch3, registros meteorológicos y mediciones del nivel medio del mar. En la escala de mediano plazo (2016-2018), se levantaron once perfiles topográficos, con muestreo de sedimentos, en las playas de Macumba/Recreio-Barra, además del análisis de registros de boyas oceanográficas en aguas profundas y poco profundas. Por último, estas informaciones permitieron la elaboración de un Índice de Vulnerabilidad de la Costa a la erosión y a las inundaciones. En general, el 18% de la línea de costa está erosionada, el 52% está estable y el 30% avanza. En el periodo analizado, se contabilizaron unos 400 eventos de tormentas, que durante los años de La Niña fueron más enérgicos y culminaron en una erosión más severa. El nivel del mar en la región muestra una tendencia al aumento (1,93 mm/año). La combinación de estos resultados y el grado de ocupación urbana de las playas estudiadas muestran una baja vulnerabilidad en el sector occidental de Marambaia, mientras que los sectores centrales y extremo oriental son altamente vulnerables. En Macumba, el sector oeste presenta una baja vulnerabilidad, en contraste con el sector este que es muy vulnerable. En el arco Recreio-Barra, la vulnerabilidad aumenta de oeste a este. Esto indica que la influencia humana desempeña un papel importante en las zonas que son naturalmente propensas a una alta vulnerabilidad, lo que requiere una mayor comprensión de las condiciones naturales asociadas a las intervenciones humanas.

Palabras clave: playas arenosas, condicionantes meteoceanográficos, análisis de series temporales, teleconexiones climáticas, vulnerabilidad costera.

1. Introdução

As zonas costeiras, ambientes de interface entre continente e oceano, são áreas densamente ocupadas (Masselink & Hughes, 2003), em que com o aumento de eventos extremos (Reguero *et al.*, 2019; Rey *et al.*, 2021; Young & Ribal, 2019), a crescente subida do nível do mar (Losada *et al.*, 2013) e o aumento da erosão costeira (Mentaschi *et al.*, 2018; Payo *et al.*, 2018) demandam um melhor conhecimento do comportamento morfodinâmico destes ambientes. Recentemente, Vousdoukas *et al.* (2020) verificaram que uma proporção substancial da costa arenosa do mundo está sofrendo erosão, uma situação que pode ser acentuada pelas mudanças climáticas. Eles mostraram que as tendências ambientais na dinâmica da linha de costa, combinadas com a erosão costeira impulsionada pela elevação do nível do mar, podem resultar na quase extinção de quase metade das praias arenosas do mundo até o final do século. Em contraponto a este trabalho Cooper *et al.* (2020) apontam que mesmo que uma praia esteja sofrendo erosão, havendo espaço para acomodação, as praias

migram para a terra à medida que o nível do mar sobe e a costa recua. Eles ainda destacam que muitas praias contemporâneas foram formadas há milhares de anos e migraram para a terra durante o aumento do nível do mar pós-glacial.

Para compreender a evolução da linha de costa e seu grau de vulnerabilidade diante dos processos costeiros existem diferentes abordagens e técnicas que podem ser aplicadas. Com o crescente avanço tecnológico, que facilita tanto a obtenção e o armazenamento de imagens de satélite, quanto o processamento e análise das mesmas, inúmeros trabalhos que avaliam a mudança na posição da linha de costa, em especial com uso de imagens de satélite gratuitas (p. ex. Landsat e Copernicus Sentinel), têm sido cada vez mais publicados (Benkhattab *et al.*, 2020; McAllister *et al.*, 2022; Nguyen Hao & Takewaka, 2022; Spinosa *et al.*, 2021). Além de permitir a análise pretérita do comportamento morfológico das áreas costeiras, esses resultados podem auxiliar na elaboração de modelos de previsão da linha de costa futura (Aladwani, 2022; Barik *et al.*, 2021).

Para avaliar o grau de vulnerabilidade costeira que uma área está exposta, os principais métodos utilizados são: (1) os índices, (2) os indicadores, (3) os sistemas de informação geográfica e (4) os modelos dinâmicos computadorizados (Berger, 1997; Bevacqua *et al.*, 2018; Noor & Abdul Maulud, 2022; Satta, 2014). Um dos métodos mais utilizados é o índice de vulnerabilidade costeira (IVC), tendo sido utilizado pioneiramente por (Gornitz *et al.*, 1990) para avaliar a vulnerabilidade à inundação da costa leste dos Estados Unidos. Devido à facilidade de aplicação e customização das variáveis usadas na construção do índice, esse método tem sido aplicado em diferentes áreas costeiras do mundo (Hzami *et al.*, 2021; López Royo *et al.*, 2016; Oloyede *et al.*, 2022; Sekovski *et al.*, 2020; Solari *et al.*, 2018).

Tanto a mobilidade da linha de costa ao longo do tempo, quanto a vulnerabilidade à erosão e à inundação costeira são temas interligados e de certa forma indissociados, assim torna-se importante analisar a zona costeira de maneira integral, incluindo as mudanças na posição da linha de costa na análise da vulnerabilidade costeira (Mahendra *et al.*, 2021; Nazeer *et al.*, 2020; Velasquez-Montoya *et al.*, 2021; Wiles *et al.*, 2022).

No Brasil, de acordo com o panorama mais recente sobre a erosão costeira no país, verificou-se que entre 60 e 65 % da linha de costa das regiões Norte e Nordeste encontravam-se sob erosão, enquanto que nas regiões Sul e Sudeste o percentual erosivo era ligeiramente menor, cerca de 15% (Brasil, 2018). No caso do estado do Rio de Janeiro (SE do Brasil), verificou-se uma tendência erosiva em 38% de sua linha de costa (Brasil, 2018), que devido a sua configuração natural, acaba apresentando risco natural alto e muito alto (Tessler, 2008). A dinâmica do litoral do Rio de Janeiro, em especial seu compartimento oeste-leste, que é voltado para o quadrante sul, tem sido objeto de estudos geológico-geomorfológicos nas últimas décadas (p. ex. Criado-Sudau *et al.*, 2019; Dadalto *et al.*, 2021; Friederichs *et al.*, 2013; Muehe, 1971; Muehe *et al.*, 2018; Muehe & Carvalho, 1993; Muehe & Corrêa, 1989, 1988; Nemes *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 1973), bem como trabalhos sobre o clima de ondas na região também têm sido desenvolvidos (p. ex. Carvalho *et al.*, 2002; Lins-de-Barros *et al.*, 2018; Nascimento, 2013; Parente *et al.*, 2015; Pena & Lins-

de-Barros, 2015; Santos *et al.*, 2004; Violante-Carvalho, 1998). Contudo, estes estudos acabam não analisando as formas e os processos de maneira integrada, e muitas vezes são realizados de maneira pontual, no tempo e no espaço.

Desta forma, para compreender melhor o comportamento da linha de costa e o grau de vulnerabilidade das praias arenosas do Rio de Janeiro, este trabalho analisou dois setores costeiros em conjunto com seus processos modeladores, em escalas temporais de longo (décadas) e médio (anos) prazos. A área de estudo compreende a margem oceânica da restinga da Marambaia (Figura 1A) e os arcos praias Macumba e Recreio-Barra da Tijuca (Figura 1B). Um ponto relevante deste trabalho é o uso de um extenso banco de dados oceanográficos georreferenciados, imagens de satélite gratuitas e pontos de monitoramento *in situ* para acessar o comportamento dinâmico da linha de costa, a partir de metodologias que podem ser aplicadas em outras praias arenosas do mundo que tenham características similares as apresentadas neste estudo.

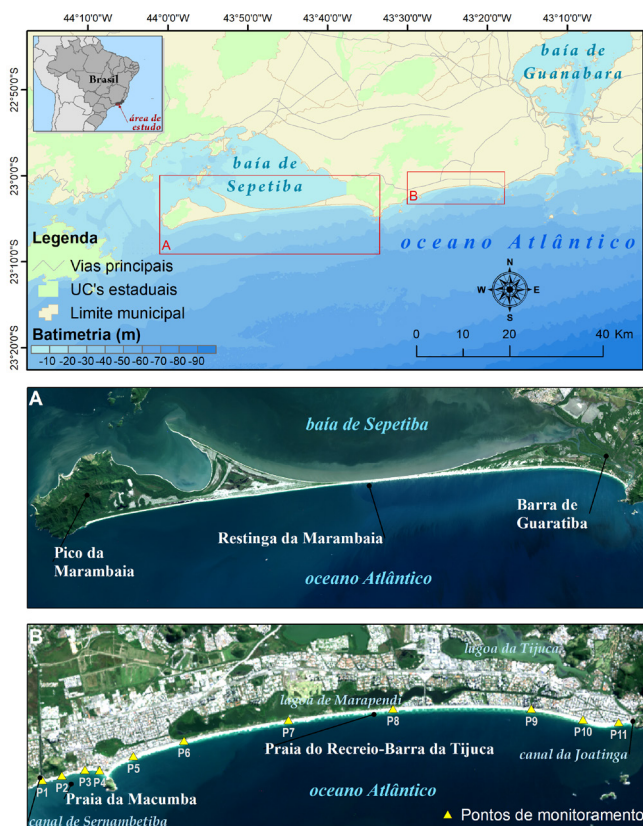


Figura 1. Localização da área de estudo no litoral sul do estado do Rio de Janeiro (painel superior). A: Restinga da Marambaia; B: Praias da Macumba e do Recreio-Barra da Tijuca. Imagem de satélite Landsat 8 de 12 de maio de 2018, na composição 4R3G2B.

2. Área de estudo

Os setores costeiros onde a pesquisa foi realizada estão localizados no litoral sul do Rio de Janeiro: na restinga da Marambaia, uma ilha barreira de 40 km, e nas praias urbanas da Macumba e Recreio-Barra da Tijuca, com aproximadamente 20 km de extensão (Figura 1). Este setor do litoral do RJ é caracterizado por longos e retilíneos depósitos arenosos dispostos como barreiras duplas (Muehe & Valentini, 1998), exceto na Marambaia (Dadalto *et al.*, 2022). Na área há dois tipos de climas atuantes: tropical sem estação seca (Af) e tropical de monção (Am) (Alvares *et al.*, 2013), com temperaturas médias variando entre 22 e 24°C e precipitação anual entre 1300 e 1600 mm. As ondas variam de leste a sudoeste, sendo que as ondas de leste são mais frequentes (condição de tempo bom) e as de sul, mais intensas (Carvalho *et al.*, 2020; Nascimento, 2013; Parente *et al.*, 2015), com alturas superiores a 5 m e períodos de 16 s em alguns episódios. A zona está sob regime de micromaré, com valores variando entre 0,3 e 1,2 m (Criado-Sudau *et al.*, 2019).

3. Materiais e Métodos

3.1 Longo prazo

O clima de ondas da região foi avaliado a partir dos dados de reanálise do modelo WaveWatch3 (WW3) para um ponto de extração próximo à área de estudo, para o período de 1986 a 2018 (detalhes em Carvalho *et al.*, 2020). Além da análise geral dos dados, foi aplicada uma filtragem para caracterizar os eventos de tempestade, usando o método do Índice de Energia da Tempestade (SPI) (Dolan & Davis, 1992) e Energia Total das Ondas (E) (Molina *et al.*, 2019).

Para acessar as oscilações do nível do mar (NM) na costa do Rio de Janeiro, os registros de maré da Ilha Fiscal (GOOS-Brasil, 2019), de 1986 a 2017, foram processados usando as rotinas T-Tide e T-Predict (Pawlowicz *et al.*, 2002), nas quais o nível não astronômico foi extraído. A partir de regressão linear, foi calculada a taxa de subida do NM.

A quantificação da variação da linha de costa foi realizada a partir de 39 cenas (órbita/ponto 217/76) Landsat 5 e 8, entre os anos de 1986 e 2018. A extração da linha de costa, definida como linha seca/úmida (Boak & Turner, 2005), foi realizada por meio do Índice de Diferença Normalizada da Água (McFeeters, 1996). Usando a ferramenta DSAS (Thieler *et al.*, 2017), no ArcMap® 10.5, o envelope da variação da linha de costa (SCE) e as taxas de regressão linear (LRR) foram calculados para 426 transectos, equi-espaçados em 150 m (detalhes em Carvalho *et al.*, 2020).

Valores do Índice de Oscilação Sul (SOI), para detectar anos de *El Niño* e *La Niña*, entre os anos de 1986 a 2018, foram utilizados para detectar possíveis teleconexões climáticas.

3.2 Médio prazo

Informações como altura, período e direção das ondas, entre 2016 e 2018, foram extraídas dos registros das bóias oceanográficas de águas profundas (CF2) e águas rasas (RJ-3 e RJ-4) dos programas PNBOIA e SiMCosta, respectivamente.

Durante 22 campanhas amostrais, entre 2016 e 2018, em onze pontos distribuídos ao longo dos arcos praias Macumba e Recreio-Barra da Tijuca (localização no painel B da Figura 1), foram coletadas amostras de sedimentos da face de praia, processadas em laboratório (Krumbein & Pettijohn, 1938) e tiveram seus parâmetros estatísticos calculados conforme (Folk & Ward, 1957).

O levantamento topográfico dos onze perfis praias (localização no painel B da Figura 1) foi realizado com um par GNSS pós-processado (Hemisphere GNSS, n.d.), sendo que um equipamento foi usado como estação base e o outro como estação móvel (*rover*) para realizar o caminhamento ao longo do perfil (detalhes em Carvalho *et al.*, 2021). Esses dados foram processados como programa GNSS Solutions TM. Os dados da estação base foram processados em relação à estação Observatório Nacional da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e os dados da estação móvel processados em relação à estação base corrigida. Com os dados corrigidos tabulados foi possível elaborar os perfis topográficos e calcular as variações de largura praias nos pontos de monitoramento. As medições aconteceram independentes do nível da maré (baixa ou alta) e sempre foram utilizados os mesmos pontos de referência, para garantir que os perfis fossem sempre medidos no mesmo local, garantindo a comparação entre eles (detalhes nas Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Localização do ponto de referência dos perfis praias

<i>Perfis</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>
P1	-43,4921	-23,0348
P2	-43,4826	-23,0325
P3	-43,4726	-23,0319
P4	-43,4799	-23,0318
P5	-43,4618	-23,0273
P6	-43,4332	-23,0196
P7	-43,4043	-23,0148
P8	-43,3751	-23,0118
P9	-43,3458	-23,011
P10	-43,3168	-23,014
P11	-43,3006	-23,0154

Legenda: Localização dos perfis na Figura 1B.

Tabela 2. Condições da maré durante a medição dos perfis praias entre os anos de 2016 e 2018

<i>Data (dd/mm/aa)</i>	<i>Preia e baixa-mares</i>	<i>Tipo</i>
27/07/16	Vazante	Quadratura
27/09/16	Enchente / Estofa	Quadratura
12/12/16	Enchente / Vazante	Sizígia
30/01/17	Vazante / Enchente	Quadratura
13/02/17	Vazante / Enchente	Quadratura
16/03/17	Vazante / Enchente	Quadratura
20/04/17	Vazante	Quadratura
18/05/17	Vazante	Quadratura
29/06/17	Vazante	Quadratura
20/07/17	Enchente / Vazante	Quadratura
10/08/17	Vazante / Enchente	Quadratura
15/08/17	Vazante	Quadratura
15/09/17	Enchente / Vazante	Quadratura
17/10/17	Enchente / Vazante	Quadratura
23/11/17	Vazante	Quadratura
04/12/17	Vazante / Enchente	Sizígia
08/02/18	Vazante	Quadratura
20/03/18	Vazante / Enchente	Quadratura
18/06/18	Vazante / Estofa	Quadratura
25/07/18	Enchente / Vazante	Sizígia
15/08/18	Vazante / Enchente	Quadratura
11/10/18	Vazante / Enchente	Quadratura

3.3 Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC)

Os níveis de vulnerabilidade foram avaliados a partir da modificação do índice proposto por Gornitz *et al.* (1990). Doze variáveis (apresentadas na Tabela 3) foram avaliadas ao longo de 426 transectos, distantes 150 m: seis geológicos e geomorfológicos, três oceanográficos, um ecológico e dois antrópicos. Três classes de vulnerabilidade foram atribuídas a cada variável: (1) baixa, (2) média e (3) alta (detalhes em Carvalho & Guerra, 2020). Posteriormente, para cada transecto foi calculado o IVC por meio da seguinte equação (Eq. 1; Gornitz *et al.*, 1990):

$$IVC = \sqrt{\frac{a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f \cdot g \cdot h \cdot i \cdot j \cdot k \cdot l}{12}} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde cada letra (a, b, c...) representa o nível de vulnerabilidade de cada variável e o denominador indica o número de variáveis. Para finalizar, classificou-se o IVC

em quatro classes (baixa a muito alta) usando os percentis como limites (Carvalho & Guerra, 2020). A construção das classes de vulnerabilidade foi projetada de forma que pudesse ser aplicada a linhas costeiras com características diferentes das da área de estudo e, por esta razão, algumas variáveis apresentam apenas um nível de vulnerabilidade. Todo o processamento foi realizado no ArcMap® 10.5.

Tabela 3. Variáveis utilizadas na confecção do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC)

Tipo	Variável
Geológica-Geomorfológica	Geomorfologia
	Declividade (°)
	Varição da largura da faixa de areia (m)
	Altitude (m)
	Erosão / Acreção (m/ano)
Oceanográfica	Tamanho médio do grão (Φ)
	Elevação do nível do mar (mm/ano)
	Altura de onda significativa (m)
Ecológica	Amplitude da maré (m)
Antrópica	Vegetação
	Estruturas costeiras
	Densidade populacional (habitantes/km ²)

4. Resultados

4.1 Longo Prazo

Entre os anos de 1986 e 2018, a altura das ondas oscilou entre 0,4 e 5 m, sendo que as alturas entre 1 e 2 m foram as mais frequentes (~33%). O período variou entre 3 e 18 s, com valores mais frequentes entre 6 e 9 s. A direção média das ondas foi de SE, com ondas de L e S mais frequentes (Figura 2).

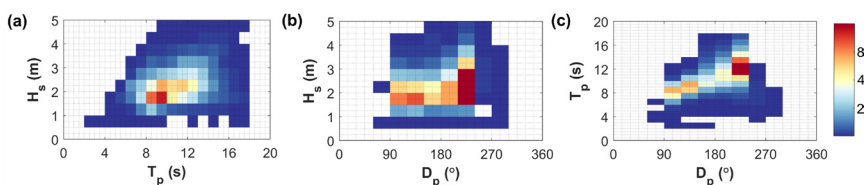


Figura 2. Climatologia de ondas entre 1986 e 2018 no litoral sul do Rio de Janeiro: (a) período de pico e altura significativa; (b) direção de pico e altura significativa; (c) direção de pico e período de pico. A barra lateral indica a frequência de ocorrência em percentual (%).

Após a filtragem dos dados para detecção dos eventos de tempestade, nota-se a maior frequência de ondas de SSW, com predomínio de 10 s. Há uma maior concentração dos eventos entre abril e setembro, em especial os eventos severos e extremos e nota-se o aumento no nº e na magnitude dos eventos a partir de 2006. Pelo Índice de Energia da Tempestade (SPI) foram contabilizados 419 eventos, sendo que os eventos que ocorreram durante os anos de *La Niña* foram mais intensos. A partir da Energia Total das Ondas (E) foram contabilizados 429. Ao longo de toda série, os meses que tiveram as maiores magnitudes acumuladas pelo SPI não foram correspondentes aos meses com os maiores acumulados calculados pelo E. Por exemplo, no ano de 2002, de acordo com o cálculo do SPI, o mês de março foi o que apresentou maior magnitude acumulada (511 m² h), ao passo que pelo cálculo do E, o mês de maior magnitude acumulada foi junho (1455,9 kJ/m). Na Tabela 4 é possível ver os meses com maior número de eventos, bem como àquelas com maior magnitude acumulada, entre os anos de 1986 e 2018. Em contrapartida, a detecção dos meses com maior número de eventos foi similar para 85% dos casos.

Tabela 4. Meses com maior número de eventos de tempestade e maior magnitude acumulada

Ano	SPI (m ² h)				E (kJ/m)			
	N.E.	Mês	M.A.	Mês	N.E.	Mês	M.A.	Mês
1986	4	Jul	739	Mai	4	Jul	2859	Jul
1987	4	Jun	788	Mar	3	Mai	3591	Ma
1988	4	Jul	881	Ago	4	Jul	3522	Ago
1989	4	Jun	665	Set	4	Jun, Set	3568	Set
1990	3	Set	1003	Abr	3	Abr, Ago, Set, Out	2590	Abr
1991	3	Out	736	Ago	3	Out	2346	Out
1992	3	Jul	747	Jun	2	Jul, Ago	1969	Jun
1993	2	Mai, Jun, Jul	842	Ago	2	Mai, Jun, Jul	3054	Jul
1994	4	Abr	800	Jul	4	Abr	4239	Abr
1995	3	Set	681	Ago	5	Mai	2784	Mai
1996	3	Jun	606	Jul	5	Jun	3982	Jun
1997	3	Mai	824	Mai	3	Abr, Mai	4596	Mai
1998	3	Set	450	Ago	4	Set	1558	Abr
1999	2	Abr, Mai, Ago	1190	Set	3	Ago	2678	Ago
2000	3	Jul	438	Mai	2	Mai, Jul, Ago	1682	Jul
2001	5	Set	863	Mai	6	Set	2973	Set
2002	3	Jun, Set	511	Mar	3	Jul	1456	Jun
2003	3	Mai	389	Ago	4	Mai	2261	Mai

Ano	SPI ($m^2 h$)				E (kJ/m)			
	N.E.	Mês	M.A.	Mês	N.E.	Mês	M.A.	Mês
2004	3	Mai, Jul, Ago	653	Nov	3	Mai, Jul, Ago	3565	Mai
2005	2	Jul, Set	696	Jul	3	Jul	2616	Jul
2006	3	Abr, Jun, Set	647	Jun	4	Jun, Set	4963	Jun
2007	5	Jul	715	Mai	5	Jul	3800	Jul
2008	3	Abr, Nov	493	Dez	5	Mai	1629	Mai
2009	4	Jun, Jul	476	Set	4	Jun	2514	Jul
2010	4	Jun	1745	Abr	6	Jun	4911	Jun
2011	4	Mai	755	Ago	5	Mai	4287	Mai
2012	3	Jun, Jul	317	Set	3	Jun, Jul	1928	Jul
2013	4	Ago	732	Set	4	Ago	1882	Ago
2014	2	Mai, Ago	292	Abr	3	Ago	1439	Ago
2015	2	Jul, Set	260	Jun	2	Ago, Set	1406	Set
2016	3	Jul	513	Jun	4	Jul	2880	Jul
2017	2	Ago, Set	657	Mai	2	Jul, Set	2298	Ago
2018	1	Mai	444	Jul	2	Mai	1130	Jul

Legenda: SPI: índice de energia da tempestade; E: fluxo de energia da tempestade integralizado no tempo; N.E.: número de eventos; M.A.: magnitude acumulada.

Entre os anos de 1989 e 2017, o nível variou entre 1,9 e 2,6 m, assim tendo uma amplitude de 70 cm. Nos anos de 1994 e 1995, houve um aumento nos valores medianos, com posterior queda nos anos seguintes, voltando a subir a partir de 2009. Vemos que durante os anos de *El Niño*, o nível é afetado positivamente, enquanto que durante a *La Niña*, a amplitude dos valores é maior, ver Figura 3. Por meio da regressão linear, para o período de 1989 a 2016, observou-se uma taxa de subida do nível do mar a 1,93 mm/ano.

A partir do mapeamento da linha costa, foi possível verificar que entre 1986 e 2018 as maiores variações estão localizadas nos setores leste da restinga e do arco praial Recreio-Barra da Tijuca, com pontos de mais de 100 m de envelope praial. Nos outros setores, o envelope médio é de aproximadamente 60 m (Figura 4). Relativo ao recuo e avanço da linha de costa, nota-se que nos setores oeste e extremo leste da restinga predomina o recuo, com taxas médias de -0,12 m/ano, enquanto que nos arcos Macumba e Recreio-Barra da Tijuca predomina o avanço, com taxas médias de 0,20 m/ano. Em resumo, em toda a área de estudo verificou-se que 18% encontra-se em recuo, 52% estável e 30% em avanço.

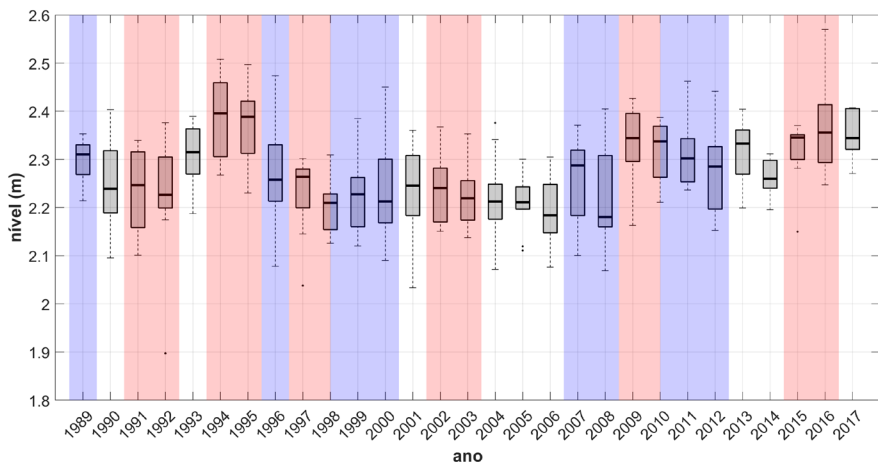


Figura 3. Variação anual do nível médio do mar no marégrafo da Ilha Fiscal, entre 1989 e 2017. As cores em vermelho e azul representam, respectivamente, anos de ocorrência de El Niño e de La Niña.

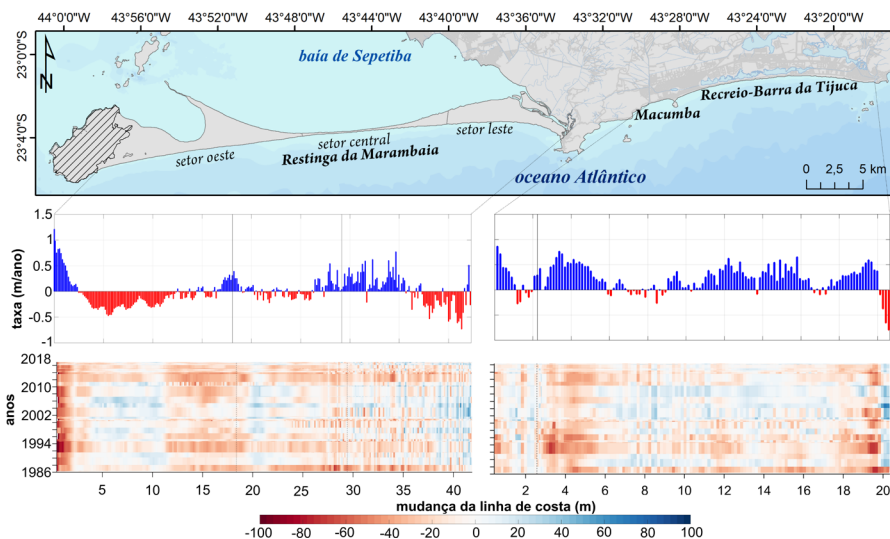


Figura 4. Variação da posição da linha de costa entre 1986 e 2018.

Ao analisar as taxas por décadas, verifica-se que entre 1986 e 1996 os pontos de maior erosão encontravam-se nas extremidades oeste e leste da restinga da Marambaia (Figura 5a), com taxas de até $-2,8$ m/ano e na extremidade oeste do arco Recreio-Barra da Tijuca (Figura 6a), com taxas de até 3 m/ano. No período seguinte, entre 1997 e 2007, os pontos de maior erosão encontravam-se nas

extremidades do setor oeste da Marambaia (até $-2,7$ m/ano; Figura 5b) e no setor leste da praia da Macumba ($-1,4$ m/ano; Figura 6b). Entre os anos de 2008 e 2018, verificam-se pontos de erosão ao longo de toda a linha, em especial nos setores central e leste da Marambaia (Figura 5c) e do arco Recreio-Barra da Tijuca (Figura 6c), até $-4,1$ m/ano.

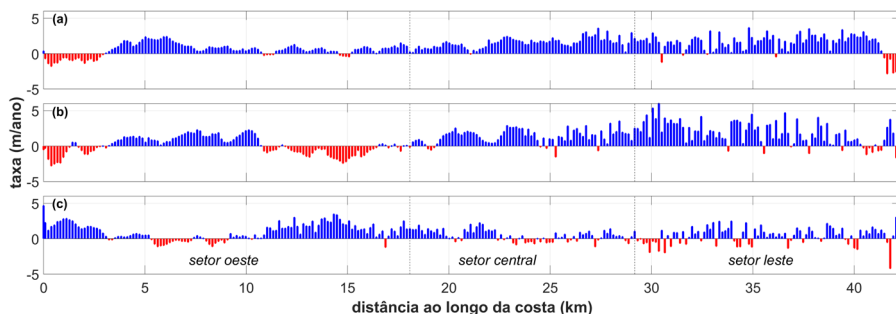


Figura 5. Taxa de variação da posição da linha de costa na restinga da Marambaia por década: (a) 1986 a 1996; (b) 1997 a 2007; (c) 2008 a 2018. As barras azuis (valores positivos) e vermelhas (valores negativos) indicam, respectivamente, mudanças em direção ao mar – avanço da linha de costa – e em direção ao continente – recuo da linha de costa.

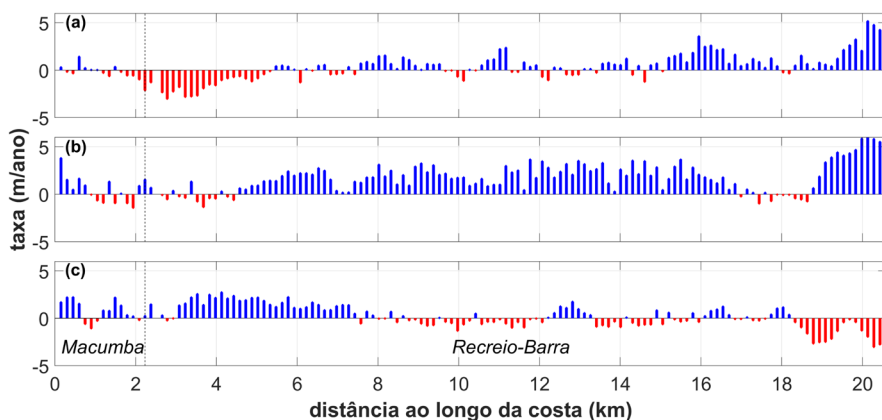


Figura 6. Taxa de variação da posição da linha de costa nas praias da Macumba e Recreio-Barra da Tijuca por década: (a) 1986 a 1996; (b) 1997 a 2007; (c) 2008 a 2018. As barras azuis (valores positivos) e vermelhas (valores negativos) indicam, respectivamente, mudanças em direção ao mar – avanço da linha de costa – e em direção ao continente – recuo da linha de costa.

4.2 Médio Prazo

Entre 2016 e 2018, as ondas da boia CF2 variaram entre L e SO, sendo mais frequentes as ondas de L e mais intensas as ondas do quadrante S. Nas boias de Copacabana, as ondas variaram entre SE e SO. Em ambos os registros as alturas máximas foram de ~4 m e período máximo de 17 s, em condições mais energéticas. Ao longo deste período, foram contabilizados 21 eventos de tempestade sendo que foi realizado o monitoramento no início de dois eventos (18 de maio de 2017 e 10 de agosto de 2017) e após quatro eventos (27 de setembro de 2016, 20 de julho de 2017, 15 de agosto de 2017 e 18 de junho de 2018).



Figura 7. Série temporal e histograma das condições hidrodinâmicas entre julho de 2016 e outubro de 2018: (painel superior) altura de onda significativa; (painel intermediário) período da onda; (painel inferior) direção da onda. As linhas cinzas indicam as datas em que houve levantamento de campo.

A partir da análise sedimentológica, verificou-se que o tamanho médio dos grãos diminui de oeste para leste, de areia grossa para areia média (Figura 8). As amostras variaram de muito bem a moderadamente selecionadas, predominantemente positivas e quase simétricas e com curtose variada (sem padrão definido tanto espacial, quanto temporalmente).

A partir dos perfis topográficos foi possível avaliar a variação da largura de cada ponto de monitoramento. Na praia da Macumba as maiores variações foram registradas no setor oeste, no P1, com largura máxima de 110 m, enquanto que nos outros perfis, as variações não ultrapassaram 60 m. Já no arco Recreio-Barra da Tijuca, as extremidades exibem grande variabilidade, variando de 50 a 125 m de largura. Também foi observada a diminuição da declividade e da altitude (não apresentado em gráfico) de oeste para leste. Destaca-se no P11, extremo leste da área de estudo, a diminuição de 45 m de largura após um evento de tempestade, que ocorreu em agosto de 2017,

em que sua recuperação em relação a largura média só aconteceu após 1 ano. Neste mesmo período, no outro extremo da área de estudo, no P1, verificou-se comportamento oposto, com aumento da largura após o evento e posterior diminuição gradativa da largura ao longo de um ano. Na Tabela 5 são apresentados os valores de largura registrados em cada perfil para cada data em que houve o levantamento topográfico.

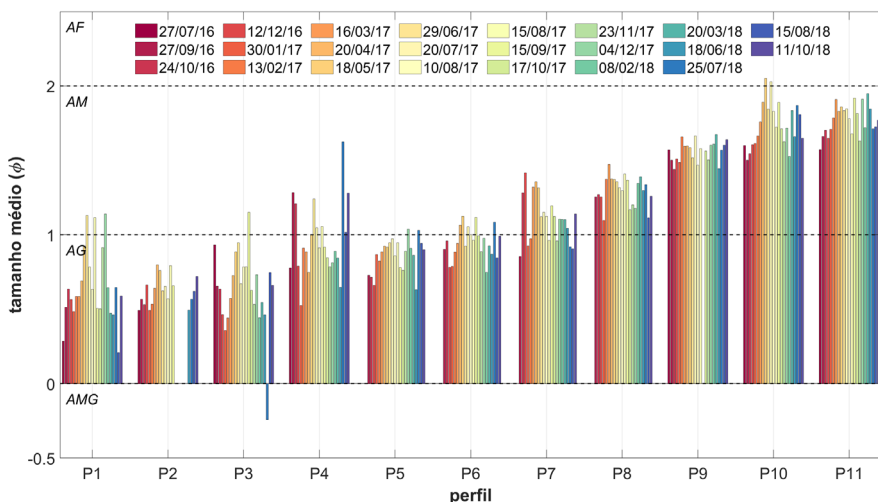


Figura 8. Tamanho médio dos grãos, em cada data de monitoramento, nos onze perfis praias monitorados.

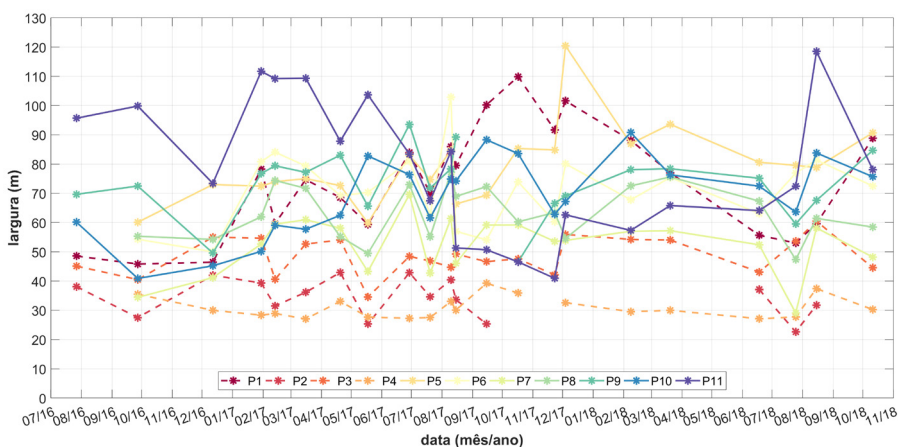


Figura 9. Variação da largura praias, em cada data de monitoramento, nos onze perfis praias monitorados.

Tabela 5. Medições da largura dos perfis praias entre os anos de 2016 e 2018

Data (dd/ mm/aa)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
27/07/16	48.6	38.1	45.1	-	-	-	-	-	69.7	60.1	95.7
27/09/16	45.8	27.5	40.5	35.5	60.1	54.3	34.4	55.3	72.5	40.9	99.8
12/12/16	46.5	42.0	55.0	30.0	73.0	50.0	41.2	54.2	49.6	45.2	73.4
30/01/17	78.3	39.3	54.7	28.3	72.5	80.8	52.7	62.0	76.8	50.2	111.7
13/02/17	59.7	31.5	40.6	28.9	74.0	84.1	59.5	74.4	79.4	59.1	109.2
16/03/17	74.7	36.2	52.6	27.0	75.0	79.3	61.0	71.7	77.2	57.7	109.4
20/04/17	68.6	42.9	54.1	33.1	72.6	69.2	58.1	55.2	83.0	62.5	87.8
18/05/17	59.3	25.3	34.5	27.7	59.8	70.3	43.3	49.5	65.6	82.8	103.7
29/06/17	83.9	42.9	48.4	27.3	83.0	81.0	69.6	73.0	93.6	76.4	83.4
20/07/17	70.0	34.7	46.9	27.6	74.7	62.8	42.7	55.1	71.8	61.6	67.5
10/08/17	86.0	40.4	44.7	33.0	84.7	102.9	61.4	77.2	78.4	74.9	84.3
15/08/17	79.5	33.7	49.2	30.1	66.4	57.0	46.1	68.9	89.2	74.2	51.3
15/09/17	100.2	25.3	46.7	39.3	69.4	54.1	59.2	72.3	-	-88.3	50.7
17/10/17	109.9	-	47.6	35.9	85.3	73.9	59.2	60.3	46.6	83.6	46.6
23/11/17	91.7	-	42.1	-	84.8	60.3	53.6	63.4	66.6	62.8	40.9
04/12/17	101.6	-	55.9	32.6	120.4	80.1	53.9	54.6	69.1	67.2	62.6
08/02/18	88.1	-	54.2	29.5	87.0	67.8	57.0	72.6	78.1	90.8	57.3
20/03/18	77.0	-	54.0	30.0	93.6	75.4	57.2	75.6	78.4	76.3	65.8
18/06/18	55.7	37.1	43.1	27.1	80.6	63.1	52.4	67.3	75.1	72.5	64.1
25/07/18	53.0	22.6	53.6	27.7	79.6	76.9	29.1	47.3	59.6	63.6	72.4
15/08/18	59.6	31.8	60.5	37.4	78.8	81.4	58.2	61.4	67.6	83.8	118.5
11/10/18	88.8	-	44.6	30.3	90.7	72.5	48.2	58.5	84.7	75.7	78.1

Legenda: Localização dos perfis na Figura 1B.

4.3 Vulnerabilidade à erosão e inundação costeira

Os graus de vulnerabilidade da área de estudo são apresentados na Figura 10. Ao longo de toda área de estudo, há predomínio das classes de vulnerabilidade moderada e alta (> 60%). Na restinga da Marambaia, 9% da área encontra-se sob vulnerabilidade muito alta, 35% sob alta, 36% sob moderada e 20% sob baixa vulnerabilidade. Ao longo dos arcos Macumba e Recreio-Barra da Tijuca, há o predomínio da vulnerabilidade muito alta em 54% da linha de costa, 15% da área apresenta alta vulnerabilidade, 21%, moderada e 9% baixa. Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros estatísticos das variáveis utilizadas neste estudo.

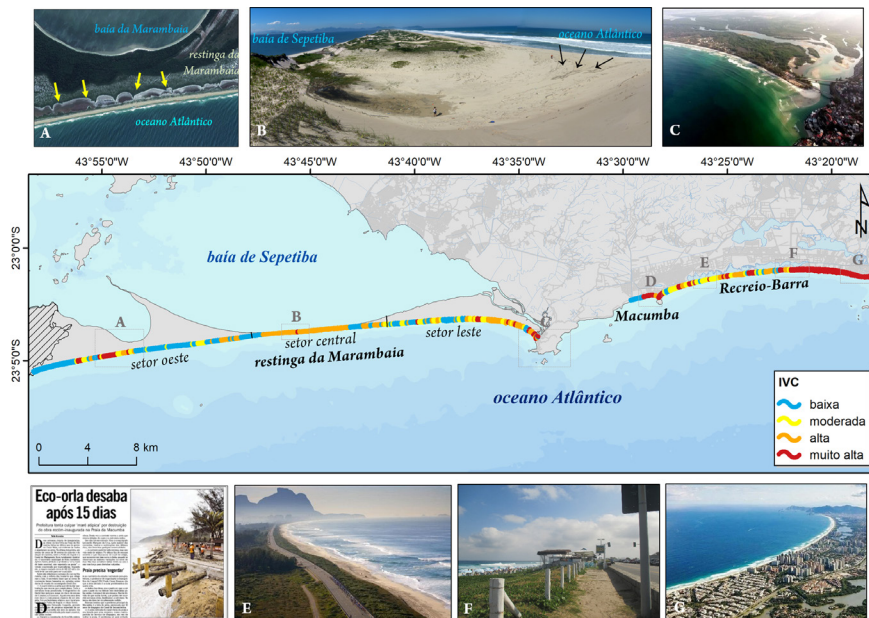


Figura 10. Índice de vulnerabilidade à erosão e à inundação costeira na restinga da Marambaia e nos arcos praias Macumba e Recreio-Barra da Tijuca. Fonte das imagens: A: Google Earth Pro, 09 de maio de 2017; B: Rafael Cortez, 16 de abril de 2013; C: Felipe Lucena, 25 de agosto de 2018; D: Jornal O Globo, janeiro de 2005; E: Orla Rio, 2022; F: Breylla Carvalho, 25 de julho de 2018; G: Wikimedia Commons.

Tabela 4. Parâmetros estatísticos das variáveis quantitativas utilizadas no Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC)

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-padrão
Declividade (°)	0.00	14.52	1.16	1.04
SCE (m)	32.19	145.19	58.62	12.05
Elevação (m)	0.28	2.60	1.29	1.00
LRR (m/ano)	-0.79	1.21	0.07	0.29
Tamanho médio do sedimento (Φ)	0.05	3.19	1.42	0.43
SLR (mm/ano)	-	-	2.38	-
Hs (m)	1.43	1.53	1.53	0.01
Amplitude da maré (m)	-	-	0.5	-
Densidade populacional (hab/km ²)	0	23447.00	1155.70	1915.85

Legenda: SCE: envelope da mudança da linha de costa; LRR: taxa de erosão/acreção; SLR: taxa de elevação do nível do mar; Hs: altura significativa da onda.

5. Discussão

No que diz respeito a análise dos dados de longo prazo, a influência da *La Niña* (fase positiva do SOI) se mostrou importante para o aumento na intensidade das condições meteo-oceanoográficas e consequente agravamento da erosão costeira. Tal característica já foi observada em outras praias do hemisfério sul, pioneiramente por Short *et al.* (2000) na praia de Narrabeen na Austrália, por Barnard *et al.* (2015) em praias australianas e neo-zelandesas, por Dutra *et al.* (2014) nas praias de Salvador e por Gutiérrez *et al.* (2016) e Orlando *et al.* (2019) nas praias uruguaias. Além disto, as taxas calculadas para as oscilações do nível do mar são condizentes com valores calculados para outros pontos da América Latina, como em Salvador e Mar del Plata, em que a taxa média é de 2 mm/ano.

Relativo aos dados de médio prazo, o registro das boias mostrou que as ondas mais energéticas foram observadas entre abril e outubro associadas ao quadrante S, assim como o que foi observado nos dados de longo prazo. Relativo à topografia, nota-se a tendência de acreção ou estabilidade da largura e do volume de novembro a março e de erosão entre abril e outubro, apontando para uma possível resiliência destes perfis em uma escala de médio prazo. A gradação lateral dos sedimentos parece indicar a direção predominante do transporte longitudinal para leste, tendo sido reportada para o arco Recreio-Barra por Coutinho (2007) e para outros setores do litoral fluminense voltados para o sul, como nas restingas da Marambaia e Massambaba (Borges, 1990; Muehe & Carvalho, 1993; Muehe & Corrêa, 1989).

Todo este mapeamento oceanográfico e geológico-geomorfológico da área de estudo, em escalas temporais distintas, permitiu detectar as vulnerabilidades e compreender quais características e processos são responsáveis por esta configuração. Na Marambaia, o alto grau de vulnerabilidade está associado aos seus aspectos físicos, geológicos e ecológicos (Tessler, 2008). No setor oeste, onde há áreas de vulnerabilidade muito alta, verificam-se pequenas lagoas próximas à linha de costa e o início de um setor mapeado como de transposição/canais de drenagem por Dadalto *et al.* (2022). No setor central, o rebaixamento topográfico e o estreitamento da restinga culminam em alta vulnerabilidade, expressas pelo recuo da linha de costa e na propensão a ruptura diante de cenários de elevação do nível do mar. Na extremidade leste, a alta variabilidade da linha de costa influenciada pela dinâmica dos canais de maré, torna a área suscetível à erosão.

A praia da Macumba apresenta setores erosivos em sua área central, que aliada a implementação de estruturas urbanas que não levaram em consideração a dinâmica costeira, tem sido frequente eventos erosivos, com prejuízos da ordem de milhões de reais e evidentemente exibindo uma vulnerabilidade muito alta (Lins-de-Barros *et al.*, 2019).

Ao longo do arco Recreio-Barra da Tijuca há a gradação de oeste para leste da vulnerabilidade, de moderada a muito alta. A vulnerabilidade moderada se deve em parte a setores da linha de costa com baixa ocupação urbana, por conta da faixa de areia em frente à lagoa de Marapendi fazer parte de uma Área

de Preservação Ambiental. Do centro para leste, há o aumento das intervenções urbanísticas e, conseqüentemente, o aumento da vulnerabilidade. Em especial neste setor, a concentração populacional aumentou muito desde a década de 1970, devido à especulação imobiliária na região e ao aumento da mancha urbana da cidade do Rio de Janeiro (Lins-de-Barros *et al.*, 2019).

Analisando os padrões encontrados neste trabalho com trabalhos realizados em outras praias do mundo, percebe-se um aumento nas taxas erosivas e conseqüente exposição à riscos costeiros, deixando-as mais vulneráveis. Nos últimos anos analisados (2008 a 2018) nota-se o aumento nas taxas erosivas entre os setores central e leste (máximo de $-4,1$ m/ano), coincidindo com um leve aumento nas taxas de elevação do nível do mar, culminando no maior grau de vulnerabilidade à erosão e inundação costeira. Tendências similares são observadas em outras praias do mundo, sendo, em geral, agravadas pela influência antrópica. No Kuwait, foram registradas taxas erosivas de $9,73$ m/ano e de acreção de $10,88$ m/ano, sendo que os processos erosivos ocorreram em áreas que passaram por mudanças em sua morfologia (engordamento de praia) (Aladwani, 2022). Na costa de Tetouan, no Marrocos, a área que se encontra sob erosão é resultado de efeitos cumulativos de processos naturais e atividades antropogênicas (Benkhatab *et al.*, 2020). Um outro exemplo de costa com tendência erosiva é Nam Dinh, no Vietnã, que apresenta taxas altas (20 m/ano) que se iniciaram no final do século 18 e são resultado dos efeitos combinados de diminuição da carga sedimentar fluvial e de processos de subsidência/elevação do nível do mar (Nguyen Hao & Takewaka, 2022).

6. Conclusões

O mapeamento de diferentes parâmetros oceanográficos e geológico-geomorfológicos em diferentes escalas temporais leva a uma melhor compreensão da dinâmica e dos processos costeiros a que as praias arenosas estão expostas. Neste trabalho, observou-se que cada setor analisado mostrou um comportamento diferente na variabilidade da linha costeira. As teleconexões climáticas interanuais influenciaram as condições meteo-oceanográficas e conseqüentemente a resposta da linha de costa, onde os anos de *La Niña* são os mais energéticos com erosão mais intensa. Além disto, nos últimos 18 anos houve o aumento na frequência e magnitude dos eventos de tempestade e elevação do nível do mar, ocasionando a erosão das praias da área de estudo. Com os dados de médio prazo, pode-se deduzir que a resultante do transporte sedimentar seja para leste e que há a recuperação dos perfis praias erodidos durante eventos de tempestade. Por fim, a vulnerabilidade ambiental na restinga da Marambaia é influenciada pelos aspectos naturais, enquanto que na Macumba e Recreio-Barra há uma clara influência antrópica. Todos os resultados encontrados neste trabalho vão na mesma direção de outros trabalhos realizados em outras praias arenosas do mundo, mostrando a relevância dos métodos utilizados, bem como a importância de se entender os padrões costeiros, já que as áreas sob erosão vêm aumentando ao longo do tempo.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, como Bolsa de Doutorado (DS) e pelo Programa de Intercâmbio de Doutorado PDSE [processo #88881.132411/206-01, número 19/2016] para a primeira autora. Agradecemos também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro para a realização das pesquisas e trabalhos de laboratório. A todos os estudantes da FAOC/UERJ e IGEO/UFRJ que ajudaram nos trabalhos de campo de 2016 a 2018. E agradecimentos especiais para Leonardo Klumb de Oliveira (UFRB) por compartilhar os registros de onda do modelo WW3, e para Mauro Cirano e Fernando Dix, do programa SimCosta que gentilmente forneceram os registros das bóias de Copacabana. Gostaríamos de agradecer ao revisor por suas sugestões que ajudaram a melhorar substancialmente este manuscrito.

Bibliografia

- Aladwani, N. S. (2022). Shoreline change rate dynamics analysis and prediction of future positions using satellite imagery for the southern coast of Kuwait: A case study. *Oceanologia*, 64 (3), 417-432. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.02.002>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. de M. & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22 (6), 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Barik, G., Guru, B. & Sangma, F. (2021). Shoreline Changes Analysis and Forecast Using Digital Shoreline Assessment System 5.0: Evidences from Parts of East Coast of India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49 (11), 2815-2830. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01424-4>
- Barnard, P. L., Short, A. D., Harley, M. D., Splinter, K. D., Vitousek, S., Turner, I. L., Allan, J., Banno, M., Bryan, K. R., Doria, A., Hansen, J. E., Kato, S., Kuriyama, Y., Randall-Goodwin, E., Ruggiero, P., Walker, I. J., & Heathfield, D. K. (2015). Coastal vulnerability across the Pacific dominated by El Niño/Southern Oscillation. *Nature Geoscience*, 8 (10), 801-807. <https://doi.org/10.1038/ngeo2539>
- Benkhattab, F. Z., Hakkou, M., Bagdanavičiūtė, I., Mrini, A. El, Zagaoui, H., Rhinane, H. & Maanan, M. (2020). Spatial-temporal analysis of the shoreline change rate using automatic computation and geospatial tools along the Tetouan coast in Morocco. *Natural Hazards*, 104 (1), 519-536. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04179-2>
- Berger, A. R. (1997). Assessing rapid environmental change using geoindicators. *Environmental Geology*, 32 (1), 36-44. <https://doi.org/10.1007/s002540050191>
- Bevacqua, A., Yu, D. & Zhang, Y. (2018). Coastal vulnerability: Evolving concepts in understanding vulnerable people and places. *Environmental Science and Policy*, 82 (January), 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.01.006>
- Boak, E. H. & Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 214 (214), 688-703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Borges, H. V. (1990). *Dinâmica sedimentar da Restinga da Marambaia e Baía de Sepetiba*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Brasil, M. do M. A. (2018). *Panorama da erosão costeira no Brasil* (D. Muehe (ed.)). MMA.

- Carvalho, B. C., Dalbosco, A. L. P. & Guerra, J. V. (2020). Shoreline position change and the relationship to annual and interannual meteo-oceanographic conditions in Southeastern Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 235 (January), 106582. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106582>
- Carvalho, B. C. & Guerra, J. V. (2020). Coastal Vulnerability of Rio de Janeiro Shoreline (SE Brazil) due to Natural and Social Impacts. *Journal of Coastal Research*, 95 (sp1), 759. <https://doi.org/10.2112/si95-148.1>
- Carvalho, B. C., Lins-de-Barros, F. M., Silva, P. L. da, Pena, J. do N. & Guerra, J. V. (2021). Morphological variability of sandy beaches due to variable oceanographic conditions: a study case of oceanic beaches of Rio de Janeiro city (Brazil). *Journal of Coastal Conservation*, 25 (2), 28.
- Carvalho, J. L. B., Roberts, P. J. W. & Roldão, J. F. (2002). Field Observations of Ipanema Beach Outfall. *Journal of Hydraulical Engineering*, 128 (February), 151-160. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:2\(151\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:2(151))
- Cooper, J. A. G., Masselink, G., Coco, G., Short, A. D., Castelle, B., Rogers, K., Anthony, E., Green, A. N., Kelley, J. T., Pilkey, O. H. & Jackson, D. W. T. (2020). Sandy beaches can survive sea-level rise. *Nature Climate Change*, 10 (November), 993-996. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00934-2>
- Coutinho, N. M. (2007). [Erosão e deposição de sedimentos no arco de praia da Barra Da Tijuca / Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Criado-Sudau, F. F., Nemes, D. D. & Gallo, M. N. (2019). Rip Currents Dynamic of a Swell Dominated Microtidal Beach. *Journal of Coastal Research*, Special Is, 121-127. <https://doi.org/10.2112/SI92-014.1>
- Dadalto, T. P., Carvalho, B. C., Guerra, J. V., Reis, A. T. dos & Silva, C. G. (2022). Holocene morpho-sedimentary evolution of Marambaia Barrier Island (SE Brazil). *Quaternary Research*, 105, 182-200. <https://doi.org/10.1017/qua.2021.43>
- Dolan, R. & Davis, R. E. (1992). An intensity scale for Atlantic Coast Northeast storms. *Journal of Coastal Research*, 8 (4), 840-853.
- Dutra, F. R. L. S., Cirano, M., Bittencourt, A. C. S. P., Tanajura, C. A. S., & Lima, M. (2014). Meteorological tides and episodes of severe coastal erosion on the coast of Salvador, Bahia State, Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, 32 (4), 615-636.
- Folk, R. & Ward, W. (1957). Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters. In *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 27 (1), 3-26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Friederichs, Y. L., Reis, A. T. dos, Silva, C. G., Toulemonde, B., Maia, R. M. da C. & Guerra, J. V. (2013). Arquitetura sísmica do sistema fluvio-estuarino da Baía de Sepetiba preservado na estratigrafia rasa da plataforma adjacente, Rio de Janeiro, Brasil. *Brazilian Journal of Geology*, 43 (1), 124-138. <https://doi.org/10.5327/Z2317-48892013000100011>
- GOOS-Brasil (2019). *GLOSS Brasil Global Sea Level Observing System*. <http://www.goosbrasil.org/gloss/dados/>
- Gornitz, V., White, T. W. & Cushman, R. M. (1990). Vulnerability of the East coast, U.S.A. to future sea level rise. *Journal of Coastal Research*, 9, 201-237.
- Gutiérrez, O., Panario, D., Nagy, G. J., Bidegain, M., & Montes, C. (2016). Climate teleconnections and indicators of coastal systems response. *Ocean and Coastal Management*, 122, 64-76. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.01.009>
- Hemisphere GNSS (n.d.). *AtlasLink TM Smart Antenna*. 875.
- Hzami, A., Heggy, E., Amrouni, O., Mahé, G., Maanan, M. & Abdeljaouad, S. (2021). Alarming coastal vulnerability of the deltaic and sandy beaches of North Africa. *Scientific Reports*, 11 (1), 2320. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77926-x>

- Krumbein, W. C. & Pettijohn, F. J. (1938). *Manual of Sedimentary Petrography*. *Appleton Century Crofts*. <https://doi.org/10.1017/S0016756800018744>
- Lins-de-Barros, F. M., Klumb-Oliveira, L. A. & Lima, R. de F. (2018). Avaliação histórica da ocorrência de ressacas marinhas e danos associados entre os anos de 1979 e 2013 no litoral do estado do Rio de Janeiro (Brasil). *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 18 (2), 85-102. <https://doi.org/10.5894/rgci-n146>
- Lins-de-Barros, F. M., Sauzeau, T. & Guerra, J. V. (2019). Historical evolution of seafront occupation in France (Bay of Biscay) and Brazil (Rio de Janeiro) face to coastal erosion vulnerability and risks (19th-21th centuries). *Confins*, 39. <https://doi.org/10.4000/confins.18175>
- López Royo, M., Ranasinghe, R. & Jiménez, J. A. (2016). A Rapid, Low-Cost Approach to Coastal Vulnerability Assessment at a National Level. *Journal of Coastal Research*, 320, 932-945. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-14-00217.1>
- Losada, I. J., Reguero, B. G., Méndez, F. J., Castanedo, S., Abascal, A. J. & Mínguez, R. (2013). Long-term changes in sea-level components in Latin America and the Caribbean. *Global and Planetary Change*, 104, 34-50. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.02.006>
- Mahendra, R. S., Mohanty, P. C., Francis, P. A., Joseph, S., Nair, T. M. B. & Kumar, T. S. (2021). Holistic approach to assess the coastal vulnerability to oceanogenic multi-hazards along the coast of Andhra Pradesh, India. *Environmental Earth Sciences*, 80 (18), 651. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09920-z>
- Masselink, G. & Hughes, M. G. (2003). *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Hodder Arnold.
- McAllister, E., Payo, A., Novellino, A., Dolphin, T. & Medina-Lopez, E. (2022). Multispectral satellite imagery and machine learning for the extraction of shoreline indicators. *Coastal Engineering*, 174, 104102. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104102>
- McFeeters, S. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (7), 1425-1432.
- Mentaschi, L., Voudoukas, M. I., Pekel, J. F., Voukouvalas, E. & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8 (1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>
- Molina, R., Manno, G., Lo Re, C., Anfuso, G. & Ciraolo, G. (2019). Storm energy flux characterization along the mediterranean coast of Andalusia (Spain). *Water*, 11 (3), 509. <https://doi.org/10.3390/w11030509>
- Muehe, D. (1971). Subsídios ao estudo da geomorfologia costeira da Praia dos Bandeirantes - restinga de Jacarepaguá. *Revista Brasileira de Geografia*, 33 (2), 103-106.
- Muehe, D. & Carvalho, V. G. De. (1993). Geomorfologia, cobertura sedimentar e transporte de sedimentos na plataforma continental interna entre a Ponta de Saquarema e o Cabo Frio (RJ). *Brazilian Journal of Oceanography*, 41 (1-2), 1-12. <https://doi.org/10.1590/S1679-87591993000100001>
- Muehe, D. & Corrêa, C. H. T. (1989). Dinâmica de praia e transporte de sedimentos na restinga da Maçambaba, RJ. *Revista Brasileira de Geociências*, 19 (3), 387-392.
- Muehe, D. & Corrêa, C. H. T. (1988). Os " arenitos de restinga " do cordão litorâneo da Maçambaba / lagoa de Araruama - RJ. In SBG (Ed.), *Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Geologia*, (2), 553-558. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4043/14008-M5>
- Muehe, D., Lins-de-Barros, F. M., Bulhões, E. M. R., Klumb-Oliveira, L. A., Pinto, N. & Sperle, M. (2018). Rio de Janeiro. In Ministério de Meio Ambiente (Ed.), *Panorama da erosão costeira no Brasil* (pp. 478-545). MMA.

- Muehe, D. & Valentini, E. (1998). *O Litoral do Estado do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental*. FEMAR.
- Nascimento, M. X. do. (2013). *Análise das Condições meteo-oceanográficas na região da baía de Santos*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Nazeer, M., Waqas, M., Shahzad, M. I., Zia, I. & Wu, W. (2020). Coastline Vulnerability Assessment through Landsat and Cubesats in a Coastal Mega City. *Remote Sensing*, 12 (5), 749. <https://doi.org/10.3390/rs12050749>
- Nemes, D. D., Criado-Sudau, F. F. & Gallo, M. N. (2019). Beach Morphodynamic Response to a Submerged Reef. *Water*, 11 (340), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w11020340>
- Nguyen Hao, Q. & Takewaka, S. (2022). Historical reconstruction of shoreline evolution at the Nam Dinh Coast, Vietnam. *Coastal Engineering Journal*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/21664250.2022.2073748>
- Noor, N. M. & Abdul Maulud, K. N. (2022). Coastal Vulnerability: A Brief Review on Integrated Assessment in Southeast Asia. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10 (5), 595. <https://doi.org/10.3390/jmse10050595>
- Oliveira, F. S. C., Kampel, M. & Amaral, S. (2008). Multitemporal assessment of the geomorphologic evolution of the Restinga of Marambaia, Rio de Janeiro, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (19), 5585-5594. <https://doi.org/10.1080/01431160802061696>
- Oloyede, M. O., Williams, A. B., Ode, G. O. & Benson, N. U. (2022). Coastal Vulnerability Assessment: A Case Study of the Nigerian Coastline. *Sustainability*, 14 (4), 2097. <https://doi.org/10.3390/su14042097>
- Orlando, L., Ortega, L., & Defeo, O. (2019). *Multi-decadal variability in sandy beach area and the role of climate forcing*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 218 (December 2018), 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.12.015>
- Parente, C. E., Nogueira, I. C. M. & Ribeiro, E. O. (2015). Climatologia de ondas. In R. P. Martins & G. S. Grossmann-Matheson (Eds.), *Meteorologia e Oceanografia* (pp. 55–96). Elsevier Editora Ltda. <https://doi.org/10.1016/B978-85-352-6208-7.50009-X>
- Pawlowicz, R., Beardsley, B. & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T-TIDE. *Computers & Geosciences*, 28, 929-937.
- Payo, A., Jigena Antelo, B., Hurst, M., Palaseanu-Lovejoy, M., Williams, C., Jenkins, G., Lee, K., Favis-Mortlock, D., Barkwith, A. & Ellis, M. A. (2018). Development of an automatic delineation of cliff top and toe on very irregular planform coastlines (CliffMetrics v1.0). *Geoscientific Model Development*, 11 (10), 4317-4337. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-4317-2018>
- Pena, J. do N. & Lins-de-Barros, F. M. (2015). Gestão de praias urbanas e efeitos de eventos de ressaca: estudo de caso das praias urbanas oceânicas da cidade do Rio de Janeiro. XI Encontro Nacional da ANPEGE, 8122-8133. <http://www.enanpege.ggf.br/2015/anais/arquivos/29/788.pdf>
- Reguero, B. G., Losada, I. J. & Méndez, F. J. (2019). A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. *Nature Communications*, 10 (205), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08066-0>
- Rey, W., Ruiz-Salcines, P., Salles, P., Urbano-Latorre, C. P., Escobar-Olaya, G., Osorio, A. F., Ramírez, J. P., Cabarcas-Mier, A., Jigena-Antelo, B. & Appendini, C. M. (2021). Hurricane Flood Hazard Assessment for the Archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina, Colombia. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.766258>
- Santos, C. L., Silva, M. A. M., Salvador, M. V. S., Luiza, C., Santos, D. O. S., Augusta, M., Da, M., Vinicius, M. & Salvador, S. (2004). Dinâmica sazonal e os efeitos das ressacas nas praias de Niterói/RJ. *Revista Brasileira de Geociências*, 34 (3), 355-360.

- Satta, A. (2014). *An Index-based method to assess vulnerabilities and risks of Mediterranean coastal zones to multiple hazards [Ca' Foscari University of Venice]*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4825.4969>
- Sekovski, I., Del Río, L. & Armaroli, C. (2020). Development of a coastal vulnerability index using analytical hierarchy process and application to Ravenna province (Italy). *Ocean & Coastal Management*, 183, 104982.
- Short, A. D., Trembanis, A., & Turner, I. L. (2000). Beach oscillation, rotation and the Southern Oscillation, Narrabeen Beach, Australia. *27th International Conference on Coastal Engineering*, 2439-2452.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104982>
- Silva, A. L. C. da, Silva, M. A. M. & Santos, C. L. (2008). Comportamento morfológico e sedimentar da praia de Itaipuaçu (Maricá, RJ) nas últimas três décadas. *Revista Brasileira de Geociências*, 38 (1), 87-97.
- Silva, J. X. da, Pereira, M. L. F., Marques, J. S., Muehe, D. & Amador, E. da S. (1973). Análise da variação granulométrica de sedimentos na Barra da Tijuca. *Revista Brasileira de Geografia*, 35 (1), 105-140.
- Solari, S., Alonso, R. & Teixeira, L. (2018). Analysis of Coastal Vulnerability along the Uruguayan coasts. *Journal of Coastal Research*, 85, 1536-1540.
<https://doi.org/10.2112/si85-308.1>
- Spinosa, A., Ziemba, A., Saponieri, A., Damiani, L. & El Serafy, G. (2021). Remote Sensing-Based Automatic Detection of Shoreline Position: A Case Study in Apulia Region. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9 (6), 575.
<https://doi.org/10.3390/jmse9060575>
- Tessler, M. (2008). Potencial de Risco Natural. In MMA (Ed.), *Macrodiagnostico da Zona Costeira e Marinha do Brasil* (pp. 93-103).
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L. & Ergul, A. (2017). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0—an ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change (Ver. 4.4, July 2017). In Report 2008-1278.
- Velasquez-Montoya, L., Sciaudone, E. J., Smyre, E. & Overton, M. F. (2021). Vulnerability Indicators for Coastal Roadways Based on Barrier Island Morphology and Shoreline Change Predictions. *Natural Hazards Review*, 22 (2).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000441](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000441)
- Violante-Carvalho, N. (1998). *Investigação sobre a Evolução do Clima de Ondas na Baía de Campos e a Correlação com as Situações Meteorológicas Associadas*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A. & Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, 10 (March), 260-277. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>
- Wiles, E., Loureiro, C. & Cawthra, H. (2022). Shoreline variability and coastal vulnerability: Mossel Bay, South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 268, 107789.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107789>
- Young, I. R. & Ribal, A. (2019). Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height. *Science*, 9527 (April), eaav9527.
<https://doi.org/10.1126/science.aav9527>