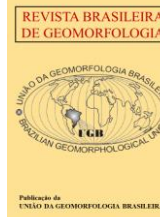


<https://rbgeomorfologia.org.br/rbg>  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 23, nº 4 (2022)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i4.2144>



*Artigo de Pesquisa*

# Análise das variáveis físicas e dinâmicas do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) na enseada da Baía Formosa, Região dos Lagos Fluminense, Estado do Rio de Janeiro

*Analysis of physical and dynamic variables by Coastal Vulnerability Index (CVI) in Formosa Bay cove, Lagos Fluminense Region - Rio de Janeiro State*

Willian Cruz Gouvea Junior <sup>1</sup>, Daniel Fernandes <sup>2</sup> e João Wagner de Alencar Castro <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geologia, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ. CEP: 21941-916. Brasil. [williangouveajr@gmail.com](mailto:williangouveajr@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-2291>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Geologia, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ. CEP: 21941-916. Brasil. [fernandes.geol@gmail.com](mailto:fernandes.geol@gmail.com)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4218-8198>

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Museu Nacional, Departamento de Geologia e Paleontologia, Rio de Janeiro, RJ. CEP: 20940-040. Brasil. [castro@mn.ufrj.br](mailto:castro@mn.ufrj.br)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8955-5971>

Recebido: 14/07/2021; Aceito: 29/09/2021; Publicado: 01/10/2022

**Resumo:** O arco praiado da enseada da Baía Formosa, Região dos Lagos Fluminense - Estado do Rio de Janeiro, encontra-se em processo de recuo de linha de praia (erosão costeira) decorrente da ação de ondas de tempestade e da ocupação urbana da orla costeira nos últimos 40 anos. Objetiva-se avaliar do ponto de vista quantitativo as condições de vulnerabilidade geológica desse segmento litorâneo, conforme projeção de uma possível sobrelevação do nível médio mar. Utilizou-se o Índice de Vulnerabilidade Costeira - IVC, desenvolvido pelo USGS - *United States Geological Survey*, visando classificar áreas de risco geológico. Através de técnicas SIGs, foram analisadas variáveis físicas e dinâmicas que integram o modelo de vulnerabilidade proposto. Como referência, utilizaram-se as informações de projeções de sobrelevação do nível médio do mar do IPCC - *Intergovernmental Panel of Climate Change*, estimadas em 4,0 mm/ano e 15,0 mm/ano até 2100. Resultados obtidos sugerem que 41,5% do segmento sul da área de estudo apresenta vulnerabilidade baixa e 58,5% do segmento norte aponta vulnerabilidade alta. O mapa IVC desenvolvido para a região estudada mostrou-se eficiente para possíveis tomadas de decisão por parte do poder público quanto ao processo de erosão costeira, em curso, nesse segmento litorâneo do sudeste brasileiro.

**Palavras-chave:** Risco Geológico; Erosão Costeira; Variação Relativa do Nível do Mar (VRNM); Mudanças Climáticas Globais; Geoprocessamento.

**Abstract:** The coastal segment of Formosa Bay cove, Lagos Fluminense Region - Rio de Janeiro State is in a process of geological risk, resulting from the action of storm waves, intense coastal erosion and high urban occupation recorded in the last 40 years. This study uses the Coastal Vulnerability Index (CVI) in the beach arc delimited by Rio das Ostras headland and Cape Búzios, with the objective of mapping the relative vulnerability of the coast to future mean sea-level rise. The methodology developed by USGS (United States Geological Survey) classifies coastal risk areas calculated numerically, using variables geomorphology, shoreline change rates, coastal slope, mean wave height, mean tidal range and relative sea-level

rise. Through GIS (Geographic Information System) techniques, the physical and dynamic variables that integrate the vulnerability model were analyzed. Using as basis the data referring to the mean sea-level rise in IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) of 4,0 mm/year until 2100, 41.5% of the 40 km long coast segment presents low vulnerability, with predominant in the sector south. In the most pessimistic projection of sea-level rise, at 15,0 mm/year until 2100, the high/very high vulnerability index is registered in 58.5% of the coastal zone, with the northern sector standing out. The Formosa Bay cove CVI Map is expected to be a study material for long-term evaluation and planning by researchers and public administrators.

**Keywords:** Geological Risk; Coastal Erosion; Mean Sea-Level Rise; Global Climate Change; Geoprocessing.

## 1. Introdução

O Índice de Vulnerabilidade Costeira - IVC foi usado pela primeira vez por Gornitz *et al.*, (1991), com o objetivo de avaliar a probabilidade de ocorrência de mudanças físicas e ambientais ao longo de regiões litorâneas. Conforme Brunn (1983), Dal Cin & Simeoni (1994) e Koroglu *et al.*, (2019), as condições de vulnerabilidade representam o grau, no qual, um sistema costeiro é suscetível ou incapaz de lidar com efeitos adversos de potencial destrutivo, considerando um modelo conceitual que relaciona a fonte, o processo, a exposição e as consequências. As projeções de sobrelevação do nível médio mar - NMM pelo IPCC, relatório SROCC (*Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, 2019), condicionam variáveis físicas e dinâmicas a serem analisadas no que tange ao equilíbrio das zonas costeiras. O crescimento demográfico de regiões litorâneas vulneráveis às mudanças naturais, à luz de informações de uma possível sobrelevação do NMM, resulta no aumento de áreas expostas aos riscos oriundos de eventos de tempestades, erosão costeira e inundações marinhas (PENDLETON *et al.*, 2010).

O IVC analisa variáveis físicas, envolvendo informações geomorfológicas, condições de declividade de praia e taxas de erosão e/ou acreção da linha de costa. As variáveis dinâmicas relacionam-se a amplitude de maré, altura significativa de onda (Hs) e variação relativa do nível do mar (VRNM). Essas variáveis representam a resistência relativa da linha de praia à erosão de curto, médio e longo prazo, tendência de acreção e susceptibilidade à inundação marinha (GORNITZ *et al.*, 1991, 1994; THIELER & HAMMAR-KLOSE, 1999abc). O IVC permite identificar áreas potencialmente afetadas por danos relativos a uma sobrelevação do NMM, tornando-se assim, uma relevante ferramenta para auxiliar gestores no planejamento de tomadas de decisões e ações necessárias à proteção dos ambientes de sedimentação costeira (DWARAKISH *et al.*, 2009).

Nesse contexto, destacam-se os trabalhos desenvolvidos pelo USGS (*United States Geological Survey*, 2021) e outros autores (Gornitz *et al.*, 1991, 1994; Thielier & Hammar-Klose, 1999abc; Pendleton *et al.*, 2004, 2010), utilizando o método IVC. Esse procedimento metodológico também foi utilizado em outras partes do mundo com adaptações locais, como por exemplo, na Austrália (Abuodha & Woodroffe, 2006), Turquia (Ozyurt & Ergin, 2010), China (Yin *et al.*, 2012), Costa do Marfim (Tano *et al.*, 2016) e Espanha (Koroglu *et al.*, 2019). Na costa brasileira, foi utilizado por Santos *et al.*, (2015) no Estado da Bahia, Germani *et al.*, (2015) no Estado do Rio Grande do Sul, Martins (2015) no Estado de Pernambuco, Lima (2016), Busman (2016) e Alcoforado (2017) no Estado do Rio Grande do Norte, Serafim *et al.*, (2019) no Estado de Santa Catarina, Braga & Pimentel (2019) no Estado do Pará, Filgueiras & Albino (2020) no Estado do Espírito Santo, e Osilieri, Seoane e Dias (2020) no Estado do Rio de Janeiro.

A aplicação do método IVC na orla costeira da enseada da Baía Formosa, justifica-se pelo fato de grande parte desse segmento litorâneo está submetida a processo de erosão costeira acelerada, decorrente da ação de ondas de tempestades e ocupação antrópica desordenada da zona de pós-praia (FERNANDES & CASTRO, 2020). Os impactos causados pela ação de ondas de tempestade neste segmento de litoral, resultaram em diversas intervenções de engenharia na região das praias das Tartarugas e Abricó, município de Rio das Ostras, afetando a estabilidade da faixa de pós-praia (CASTRO; FERNANDES; DIAS, 2011; MUEHE *et al.*, 2015; FERNANDES & CASTRO, 2020). Objetiva-se avaliar a vulnerabilidade costeira do arco praial da enseada da Baía Formosa, identificando áreas de risco geológico a partir de parâmetros físicos e dinâmicos, conforme método proposto pelo IVC. Técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento em ambiente SIG - Sistema de Informação Geográfica foram utilizadas visando à elaboração de mapas temáticos, propondo um índice de vulnerabilidade local.

## 2. Área de Estudo

A enseada da Baía Formosa é caracterizada por um arco praiar de orientação preferencial norte-sul com aproximadamente 40 km de extensão, entre os municípios de Rio das Ostras e Armação dos Búzios - Região dos Lagos Fluminense, litoral norte do Estado do Rio de Janeiro, Sudeste do Brasil (Figura 1). Neste segmento litorâneo ainda estão inseridos os municípios de Cabo Frio e Casimiro de Abreu. Os promontórios rochosos Rio das Ostras e o Cabo Búzios, constituídos por ortognaisses félsicos do Grupo Região dos Lagos e por metagranitóides do Grupo Búzios-Palmital, respectivamente, de idades Paleoproterozóica/Neoproterozóica, delimitam o referido arco praiar (MARTIN *et al.*, 1997).



**Figura 1.** Localização da área de estudo no contexto da enseada da Baía Formosa, Região dos Lagos Fluminense - Estado do Rio de Janeiro.

Trabalhos desenvolvidos sobre as oscilações do nível relativo do mar durante o Holoceno identificaram antigas posições de linha de praia, referentes à última transgressão holocênica ocorrida nesse segmento de litoral do sudeste brasileiro (MARTIN *et al.*, 1996; CASTRO *et al.*, 2014; CASTRO *et al.*, 2018). O pico dessa transgressão ocorreu há aproximadamente entre 6.335 a 4.800 anos cal AP (CUNHA *et al.*, 2017). O paleonível do mar foi de 3,0 m acima do atual, resultando na formação de uma grande paleolaguna. Sistemas de ilhas-barreira e cristas de

praia foram formados à medida que o nível relativo do mar foi rebaixando (CASTRO *et al.*, 2014). À medida que o nível do mar recuava, a planície costeira foi se estabelecendo, favorecendo a formação dos rios São João e Una, dunas e pântanos (CASTRO *et al.*, 2014, 2018; CABRAL; CASTRO; CUNHA, 2018). A ocorrência de dunas escalonares (*climbing dunes*) nessa região associa-se ao regime de vento unidirecional de nordeste e as frentes montanhosas de retaguarda que impedem a projeção desses depósitos eólicos sobre a vegetação arbórea da mata atlântica (CASTRO, 2006; SILVEIRA *et al.*, 2021).

A plataforma continental é recoberta por areias médias a finas e por uma delgada camada de lama próxima a isóbata de 20 m (MUEHE & VALENTINI, 1998; MUEHE *et al.*, 2011). Conforme Fernandes & Castro (2020) a enseada da Baía Formosa é caracterizada por dois segmentos morfodinâmicos bem distintos. O primeiro se refere ao segmento sul, entre o rio São João e o Cabo Búzios, identifica-se a presença de cordões litorâneos suaves com praias relativamente largas e de baixo declive. Essas condições foram controladas pela regressão marinha após o *optimum* climático e pelo significativo aporte de material arenosiltooso proveniente do sistema de drenagem local. O aporte de material predominantemente fino em direção a plataforma continental interna e a ação das ondas, favorece, condições de declividade mais suaves da antepraia, propiciando estágio morfodinâmico dissipativo. O segundo no extremo oposto, entre o promontório de Rio das Ostras e a desembocadura do rio São João, as praias apresentam padrão granulométrico constituído por areias médias a grossas, denotando estágio morfodinâmico de intermediário a refletivo. A alta concentração de material grosso nesse segmento de litoral relaciona-se a três aspectos sedimentológicos distintos: primeiro em decorrência da remoção dos sedimentos mais finos pela ação das correntes de retorno “*rip current*” e de deriva litorânea “*longshore current*”; o segundo, relacionado ao aporte de sedimentos provenientes de desembocaduras do São João, e o último, associa-se a eventos extremos de tempestade.

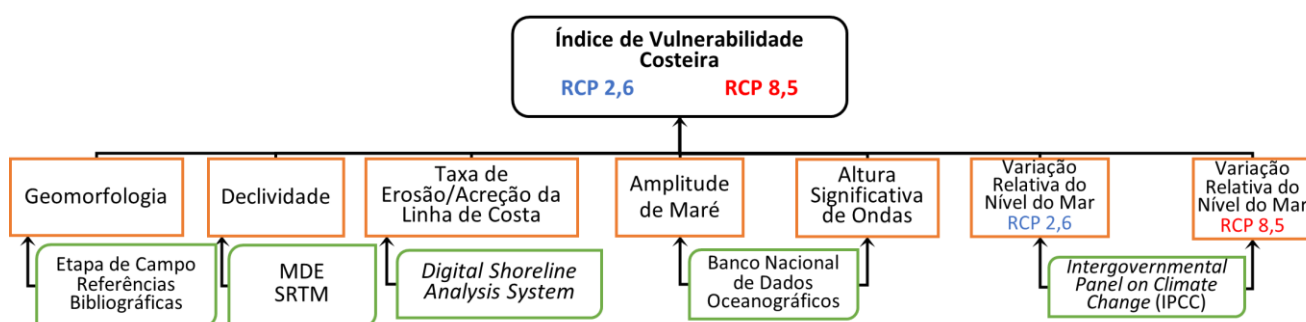
Trabalhos desenvolvidos na Baía de Campos definem o clima de ondas da região com ondulações provenientes do quadrante nordeste, e ocorrências de marulhos originadas por ciclones extratropicais, associados aos sistemas frontais e frentes frias polares, com direção sudeste (PINHO, 2003; SAVI, 2007; CASTRO; FERNANDES; DIAS, 2011; PARENTE *et al.*, 2014; CASTRO, 2018; FERNANDES & CASTRO, 2020). O regime é de micromaré com característica semidiurna, apresentando, no mesmo dia, dois períodos de preamar e baixamar. Conforme informações da Marinha do Brasil referentes ao marégrafo Ponto do Forno, localizado no município de Arraial do Cabo, cerca de 30 km de distância da área de estudo, o nível médio do mar (NMM) registrado é de 0,68 m, acima do nível de redução (NR) local de 2,15 m. Segundo Fernandes (2010), a altura predominante de ondas significativas (Hs) na região ocorre na classe de 1,0 a 2,0 m em 40% das observações estudadas, com período médio das ondas de 5 a 8 s. As ondas mais altas ocorrem no quadrante sul, caracterizadas por ressacas ocasionais com altura de arrebentação inferior a 3,0 m.

A região é fortemente influenciada pela ressurgência costeira, impulsionada pelos ventos de nordeste, trazendo à superfície, águas frias e ricas em nutrientes (AREIAS *et al.*, 2020). Algumas anomalias da superfície do mar, causadas por temperaturas mais baixas decorrentes da ressurgência costeira, estão presentes na plataforma continental, especialmente durante o verão (GYLLENCREUTZ *et al.*, 2010). O clima local caracteriza-se como semiárido, com baixos índices pluviométricos, entre 750 a 855 mm/ano e taxas de evaporação elevadas, entre 1.200 a 1.400 mm/ano (BARBIERI, 1984). A circulação atmosférica é resultado da ação do sistema ASAS (Anticiclone Subtropical Atlântico Sul), responsável pela geração de ventos de nordeste durante a maior parte do ano e da entrada de sistemas frontais durante meses de inverno (REBOITA; AMBRIZZI; ROCHA, 2009). Dados coletados em escala anual pela estação meteorológica mantida pela Companhia de Alcalis do Brasil, no município de Arraial do Cabo, apontam que a frequência dos ventos de nordeste na região está na ordem de 40% (RANGEL, 2005).

Conforme Lins-de-Barros (2010), utilizando dados do IBGE/2000 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas), cerca de 57% da população municipal de Rio das Ostras, reside em até 1,0 km da linha de costa, enquanto estes valores sobem para 59% referente a população da cidade de Búzios. Em Cabo Frio, que compreende o setor central da área de estudo, a porcentagem de concentração urbana no litoral é de aproximadamente 6%, representando uma parcela mínima em relação ao total da população de 126.828 habitantes. A região também apresenta uma grande população flutuante associada à atividade turística, importante fator a ser destacado à vulnerabilidade costeira pela pressão exercida ao ecossistema, com potencial prejuízo econômico em caso de desastres associados a inundações marinhas.

### 3. Materiais e Métodos

O Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) propõe uma metodologia para monitorar os impactos da erosão costeira através de dois grupos de variáveis, envolvendo aspectos físicos e dinâmicos de um determinado segmento de linha de costa (THIELER & HAMMAR-KLOSE, 1999abc). As variáveis físicas relacionam-se a geomorfologia, declividade e as taxas de erosão e/ou acreção da linha de costa. Enquanto as variáveis dinâmicas envolvem a amplitude de maré, altura significativa de onda (Hs) e variação relativa do nível do mar (VRNM). A magnitude destas variáveis é representada numericamente em intervalos de vulnerabilidade, classificados como, muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta, variando entre 1 e 5 sendo o primeiro, menos vulnerável e o último mais vulnerável. Neste trabalho, apresenta-se o resultado do IVC utilizando duas projeções de sobrelevação do nível médio mar estabelecidos pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Para o cenário mais otimista, o RCP (*Representative Concentration Pathway*) 2,6 com projeção de 4,0 mm/ano até 2100, e no mais pessimista o RCP 8,5 com projeção de 15 mm/ano até 2100. A Figura 2 apresenta o organograma demonstrando as etapas de trabalho.



**Figura 2.** Organograma do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) considerando duas projeções de sobrelevação do nível médio do mar, pelos RCP 2,6 (4 mm/ano) e RCP 8,5 (15 mm/ano) até 2100. Seção de coloração verde: Materiais & Métodos; Seção de coloração laranja: Variáveis Físicas e Dinâmicas; Seção de coloração preta: Resultados.

### 3.1. Materiais

Foram utilizadas imagens dos sensores WPM do satélite CBERS 04A, com 8,0 m de resolução espacial para as bandas multiespectrais e 2,0 m para banda pancromática, disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Pesquisas Espaciais – INPE (2020). Utilizou-se também um conjunto de fotos aéreas do projeto FAB - 1976 pertencentes ao acervo do Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro - DRM, com escala de 1:30.000 e pixels reamostrados de 1,0 m. Os ortomosaicos foram fornecidos pelo IBGE (2005), escala de 1:25.000 com resolução espacial de 1,0 m (Tabela 1).

**Tabela 1.** Especificações das imagens de sensoriamento remoto e ortofotos, constando informações sobre satélite, sensores, ponto/órbita, datas e horas de aquisição, alturas e período de maré, e RMSE (*Root Mean Squared Error*).

SATÉLITE/ ORTOFOTO	SENSOR	RESOLUÇÃO ESPACIAL	ÓRBITA	DATA DE AQUISIÇÃO	HORA DE AQUISIÇÃO	ALTURA DE MARÉ	RMSE	MARÉ
FAB/DRM	-	1,0 m	-	-/1976	-	0,84 m	1,217 m	-
IBGE	-	1,0 m	-	-/2005	-	0,85 m	0,300 m	-
CBERS 04A	WPM	RGB 8,0 m PAN 2,0 m	197/141 197/142	28/07/2020	13:14:20	0,70 m	2,375 m	Quadratura

Os dados altimétricos, referentes ao Modelo Digital de Elevação (MDE), foram extraídos das imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial horizontal de 30,0 m (1,0 segundo de arco) e vertical de aproximadamente 10,0 m. As imagens foram adquiridas através do USGS (*United States Geological Survey*, 2021). Utilizou-se o sistema de coordenadas geográficas Datum SIRGAS 2000 com projeção UTM FUSO 24S, para o período de captura entre 11 e 22 de fevereiro de 2000.



A variável geomorfologia foi definida por referências bibliográficas e perfis de praia, realizados pelo Laboratório de Geologia Costeira, Sedimentologia e Meio Ambiente – LAGECOST/UFRJ. Utilizou-se também como referência o Mapa Geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro – Dantas/CPRM (2000). Realizou-se entre os dias 2 a 5 de março de 2021 um levantamento de campo, visando obter informações mais precisas sobre os aspectos geomorfológicos e de declividade da área de estudo (Figura 3). Na definição da terminologia de feições e formas costeiras, utilizou-se nomenclatura geomorfológica proposta pelo IVC - USGS. O grau de risco envolve fatores físicos e dinâmicos, conforme demonstrado na Tabela 2.



**Figura 3.** Segmento norte representado em (A) praia das Tartarugas; (B) praia da Barra de São João, e segmento sul por (C) praia de Unamar; (D) praia Rasa.

**Tabela 2.** Classificação do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) conforme USGS (*United States Geological Survey*) utilizando seis variáveis físicas e dinâmicas.

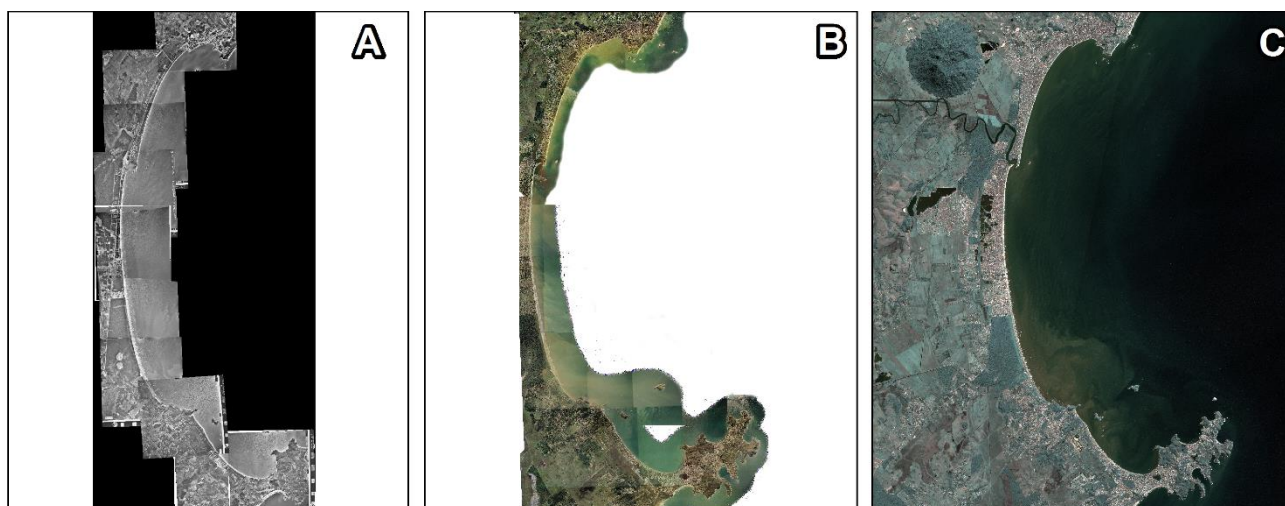
	MUITO BAIXO	BAIXO	MODERADO	ALTO	MUITO ALTO
GRAU DE RISCO	1	2	3	4	5
Taxa de Erosão/Acreção da Linha de Costa (m/ano)	> 2,0	1,0 – 2,0	-1,0 – +1,0	-1,1 – -2,0	< -2,0
Declividade (%)	> 1,9	1,3 – 1,9	0,9 – 1,3	0,6 – 0,9	< 0,6
Geomorfologia	Dunas Fixas; Costões Rochosos	Falésias	Terraços Marinhos; Planícies Costeiras	Estuários; Dunas Móveis; Cordões Litorâneos	Praia Arenosa; Escarpas de Praia; Recife de Corais; Deltas
Varição Relativa do Nível do Mar (mm/ano)	< 2,0	2,0 – 3,0	3,0 – 4,0	4,0 – 5,0	> 5,0
Amplitude de Maré (m)	> 6,0	4,1 – 6,0	2,0 – 4,0	1,0 – 1,9	< 1,0
Altura Significativa de Onda (m)	< 0,55	0,55 – 0,85	0,85 – 1,05	1,05 – 1,25	> 1,25

Os parâmetros oceanográficos foram obtidos através do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) da Marinha do Brasil. As amplitudes de maré foram coletadas pelo marégrafo do Porto do Forno, latitude 22°58'3''S e longitude 42°00'8''W entre 1975 a 2021. Os dados referentes à altura significativa de ondas (Hs) em águas profundas foram obtidos através de ondógrafos localizados na Baía de Campos entre os anos de 1963 e 1999. As referências utilizadas para a VRNM foram extraídas das projeções do IPCC, relatório SROCC 2019 (*Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, 2019).

### 3.2. Variáveis Físicas (Taxa de Erosão/Acreção da Linha de Costa, Declividade da Costa e Geomorfologia)

A análise temporal da variação da linha de costa é um dos indicadores mais utilizados em pesquisas relacionadas ao risco de erosão costeira (SOUZA, 2011; RODRIGUES, 2017; CARVALHO, 2019; NOVAK & LAMOUR, 2021). A metodologia empregada para definição dessas variáveis consistiu na seleção de imagens, pré-processamento de imagens digitais, processamento digital das imagens, georreferenciamento, delimitação da posição da linha de costa entre 1976 e 2020 e utilização da ferramenta DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) para determinação das taxas de erosão e acreção para cálculo do IVC.

As imagens foram selecionadas a partir do maior intervalo temporal, melhor resolução espacial e disponibilidade nos acervos públicos e gratuitos. As fotografias aéreas, referentes ao projeto FAB-1976, foram georreferenciadas através do *software* ArcGIS 10.6.1 (2016). Foram utilizadas como base imagens de alta resolução espacial do satélite CBERS 04A com sistema de coordenadas de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 24-Sul e o *Datum* SIRGAS 2000 (Figura 4). Definiram-se pontos de controle que não passaram por modificações ao longo do tempo, entre estes, promontórios, pontes, esquinas de ruas e avenidas. Através de um polinômio de 3ª ordem, envolvendo 100 pontos de referência com a imagem base, obteve-se o RMSE (*Root Mean Squared Error*) máximo de 2,0 m. Essa etapa de correção geométrica consistiu em garantir o menor erro de posicionamento possível para o processamento da imagem.



**Figura 4.** Imagem de satélite e fotografias aéreas processados na etapa de sensoriamento remoto, processamento digital de imagens e georreferenciamento. Utilizou-se a ferramenta DSAS, visando obter a taxa de variação da linha de costa. As figuras (A), (B) e (C) correspondem aos anos 1976 (FAB/DRM), 2005 (IBGE) e 2020 (CBERS 04A), respectivamente. Escala 1:310.000.

O Processamento Digital de Imagens (PDI) teve como objetivo realçar dados visuais, e assim, auxiliar na interpretação dos objetos alvos das imagens e composição de bandas (JENSEN, 2009). A calibração radiométrica e correção atmosférica foram executadas através do *software* ENVI 5.3 (2021), pelas ferramentas *Radiometric Calibration* e *FLAASH Atmospheric Correction* nas bandas do sensor WPM do satélite CBERS 04A. Essa etapa teve como objetivo diminuir os efeitos na radiância e interferência de nuvens na cena. Em seguida foi realizada a composição de bandas coloridas R(3)-G(2)-B(1) das imagens multispectrais e fusão com a banda pancromática através da técnica *Gram-Schmidt Sharpening*.

As taxas de variação de linha de costa foram calculadas através da ferramenta DSAS no *software* ArcGIS 10.6.1, pelo método LRR (*Linear Regression Rate*) (HIMMELSTOSS *et al.*, 2019). O critério utilizado para delimitação da posição da linha de praia foi o limite molhado/seco da zona de estirâncio (SOUZA *et al.*, 2005). A precisão da marcação da linha de praia está relacionada ao menor RMSE e a melhor resolução espacial das imagens utilizadas, como também, as condições marítimas similares aos dias e horários de aquisição dos dados pelo satélite (AMARO *et al.*, 2015). Foram selecionados como marcadores fixos a Rodovia Amaral Peixoto e a Avenida José Bento Ribeiro Dantas, objetivando construir 357 transectos com espaçamento regular de 100 m. Nessa etapa de trabalho utilizou-se a ferramenta DSAS para delimitação da linha de base e da linha de praia através das imagens FAB-1976, IBGE 2005 e CBERS 04A de 2020.

Segundo Pendleton *et al.*, (2004) obter informações sobre a declividade do ambiente de praia é fundamental para definição da vulnerabilidade relativa à inundação das regiões litorâneas. O potencial de avanço do mar para o continente é maior nas encostas com declividade mais suave, e menor em feições de praias mais íngremes. Nos limites do segmento costeiro utilizados como parâmetro desta variável, adotou-se o critério do IVC - USGS, onde a faixa estende-se desde a inclinação da planície costeira até a linha de costa. Na construção dos perfis de declividade foi utilizado o MDE – SRTM, após técnicas de correção das imperfeições dos dados obtidos pelo radar. Utilizou-se as ferramentas *Identify* e *Conditional* do *software* ArcGIS 10.6.1, visando identificar e selecionar *pixels* negativos e sem valores (*NoData Value*). Posteriormente, através da ferramenta *Fill*, foi realizada a interpolação pela técnica conhecida como vizinho mais próximo, atribuindo novos valores aos *pixels*. Após a correção do MDE, foram definidos quatro perfis com o intuito de calcular o coeficiente angular pelo Método de Regressão Linear. O coeficiente angular obtido nos perfis de declividade são convertidos em porcentagem visando o cálculo de IVC (Tabela 2).

A caracterização da geomorfologia costeira revela a diferença significativa entre as feições e formas presentes no ambiente estudado, influenciando assim, o grau de resistência distinto aos impactos da erosão (LINS-DE-BARROS, 2010). Seguindo a classificação dos índices de vulnerabilidade do USGS, um mapa geomorfológico é apresentado, conforme os principais aspectos fisiográficos e morfodinâmicos que compreendem a enseada da Baía Formosa.



### 3.3. Variáveis Dinâmicas (Amplitude de Maré, Altura Significativa de Onda (Hs) e Variação Relativa do Nível do Mar)

Os parâmetros oceanográficos, obtidos através do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) da Marinha do Brasil, definiram os índices das respectivas variáveis no cálculo do IVC. A variável amplitude de maré foi estimada a partir da média diária entre baixamares e preamares durante o período de 1975 a 2021. A variável Hs em águas profundas foi determinada através da média de 30% das alturas de ondas mais frequentes registradas no período de 1963 a 1999.

As taxas de variação relativa do nível do mar, obtidas junto ao IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), conforme relatório SROCC 2019 (*Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*) sugere três cenários de VNRM. Neste trabalho utilizaram-se dois cenários, um mais otimista e outro mais pessimista para área de estudo, representada pelo *Representative Concentration Pathway* - RCP 2,6 com projeção de 4,0 mm/ano até 2100 e RCP de 8,5 com projeção de 15,0 mm/ano até 2100.

### 3.4. Cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeiro (IVC)

O IVC é calculado numericamente em ambiente SIG, adaptando o método *smartline* proposto por Sharples, Mount e Pedersen (2006). Esta técnica consiste em representar através de *shapefiles* as variáveis físicas e dinâmicas contidas no IVC, classificando em graus de vulnerabilidade o segmento litorâneo correspondente à área de estudo. Após a segmentação dos intervalos foi calculado o índice através da Equação 1.

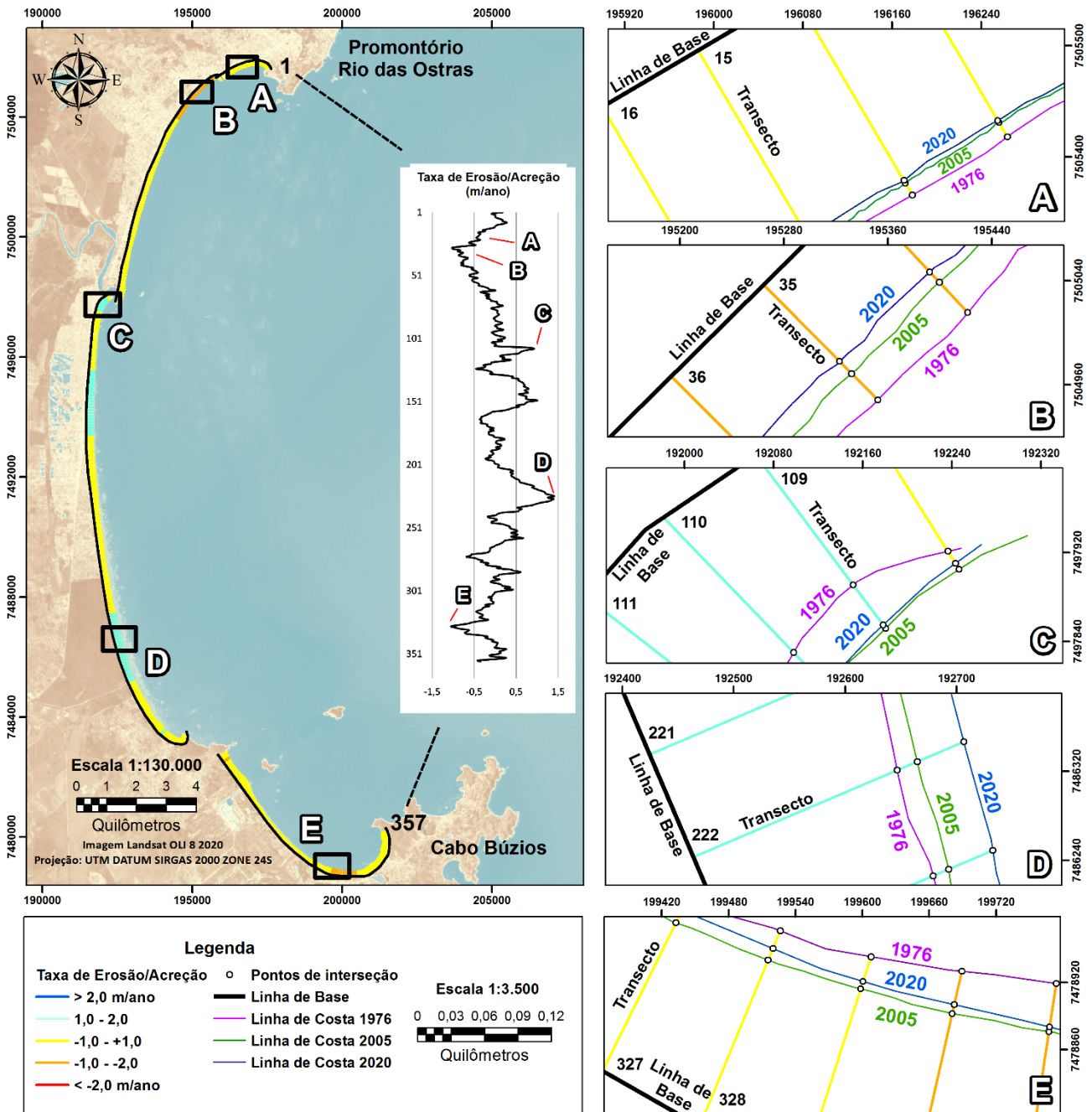
$$IVC = \sqrt{\frac{(a \times b \times c \times d \times e \times f)}{6}} \quad (1)$$

Sendo: *a* - variável geomorfológica; *b* - variável declividade da costa; *c* - variável taxa de erosão/acrecção da linha de costa; *d* - variável amplitude de maré; *e* - altura significativa de ondas (Hs); *f* - variação relativa do nível do mar (VRNM). Os resultados foram processados e calculados com o intuito de obter os valores de média, mediana e moda, utilizando um novo sistema para o Mapa IVC de acordo com os percentis 25°, 50° e 75° (PENDLETON *et al.*, 2004). Os valores de IVC abaixo de 25° são atribuídos a baixa vulnerabilidade, entre 25° e 50° como moderado, 50° e 75° representando alta vulnerabilidade e acima de 75° sendo vulnerabilidade muito alta.

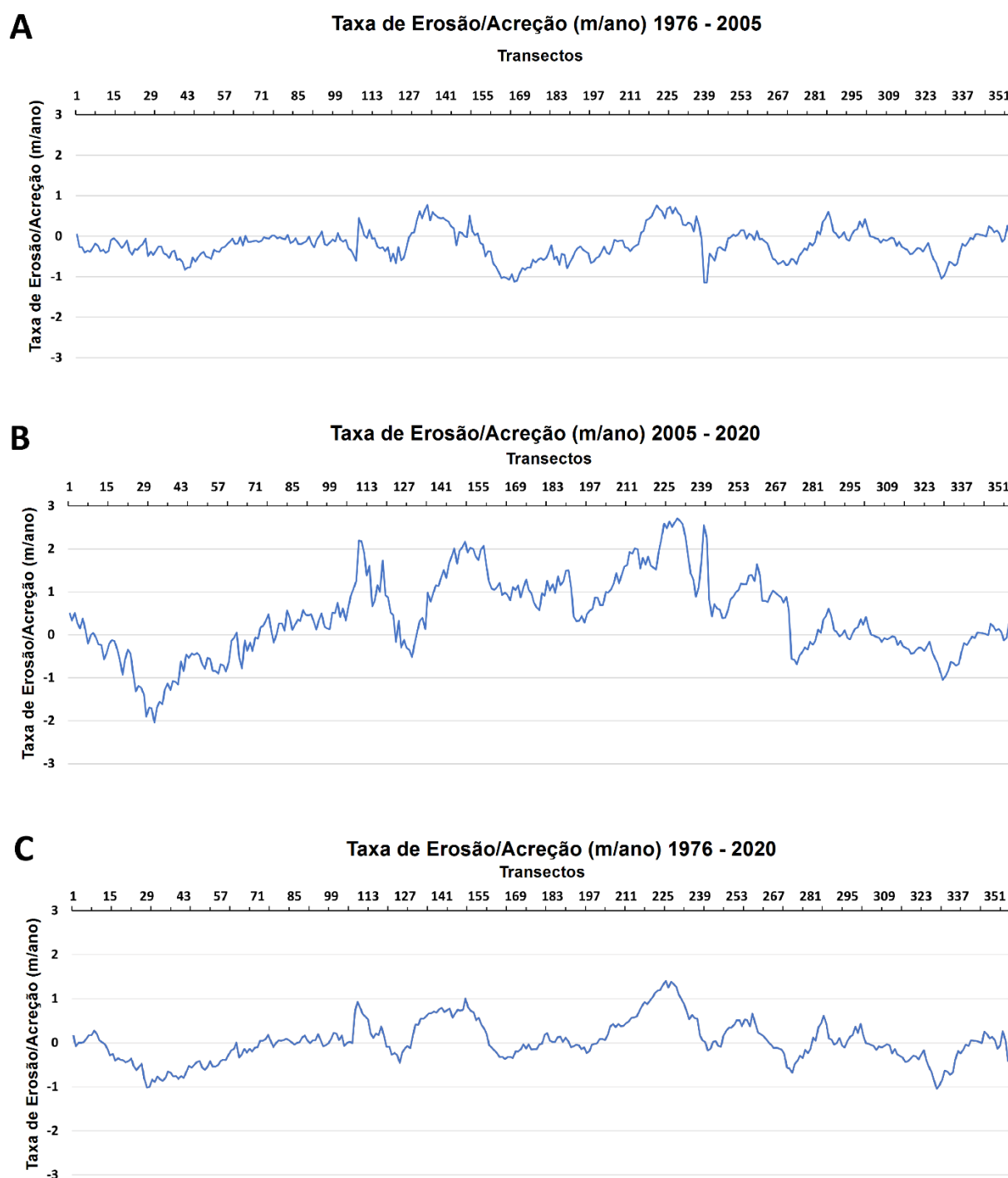
## 4. Resultados

### 4.1. Variação da Linha de Costa

As Figuras 5 e 6 apresentam os resultados referentes aos processos de erosão/acrecção ao longo do litoral da enseada da Baía Formosa. Tanto no segmento norte, próximo ao promontório de Rio das Ostras, como no segmento sul, correspondente a praia do Manguinhos - Armação dos Búzios, as taxas de variação de linha de costa apresentam tendência claramente erosiva. Destaque para o segmento norte, entre praias das Tartarugas e do Abricó, município de Rio das Ostras, que apresenta um recuo de linha de praia em aproximadamente 50 m no intervalo de 44 anos. No trecho central, entre as desembocaduras dos rios São João e Una, registra-se tendência da acreção de sedimentos e expansão da faixa de praia, especialmente entre as praias Rasa, no município de Armação dos Búzios, e Unamar, no município de Cabo Frio. Nesse segmento de litoral, a taxa de acreção foi estimada em 1,2 m/ano, para período compreendido entre 1976 e 2020.



**Figura 5.** Resultados obtidos através do método DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*). A linha de base é realizada através da Rodovia Amaral Peixoto e a Avenida José Bento Ribeiro Dantas, gerando no total 357 transectos espaçados em 100 m entre o promontório Rio das Ostras e o Cabo Búzios. (A) e (B) Praia das Tartarugas; (C) Foz do rio São João; (D) Praia de Unamar; (E) Praia do Manguinhos.

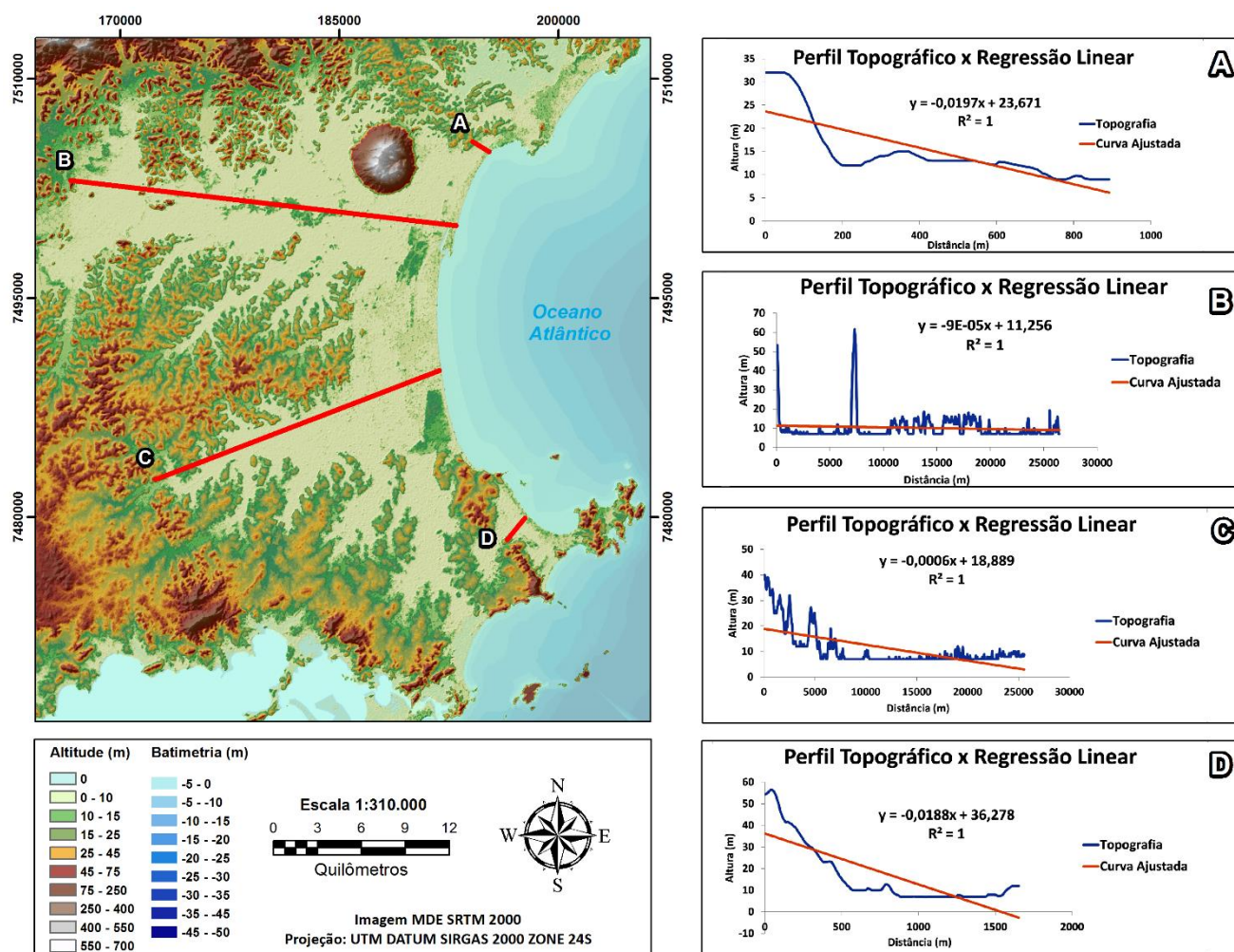


**Figura 6.** Gráficos Transectos x Taxa de Erosão/Acreção (m/ano), com resultados obtidos pelo método DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) para o total de 357 transectos. (A) corresponde ao intervalo 1976 - 2005; (B) intervalo 2005 - 2020; e (C) entre 1976 - 2020.

#### 4.2. Declividade da Costa

Resultados obtidos relacionados à variável física - declividade sugere baixa a muita alta vulnerabilidade ao longo dos 40 km da enseada da Baía Formosa. Os índices calculados pelo Método de Regressão Linear, envolvendo perfis topográficos extraídos através do MDE – SRTM, apontam valores entre graus 2 e 5, conforme Tabela 2. O segmento norte, correspondente à praia das Tartarugas, nas imediações do promontório Rio das Ostras, apresentou baixa a moderada vulnerabilidade. As condições de declividade sugerem valores percentuais de 1,8%

entre a zona de praia e pós-praia. No segmento entre a praia das Tartarugas e a praia de Unamar, a declividade ficou abaixo dos 0,6%, denotando grau muito alto de vulnerabilidade. Na região sul da área de estudo, próximo ao Cabo Búzios, registrou-se aumento na declividade, especialmente na área de domínio colinoso do complexo Região dos Lagos, com inclinações superiores a 1,5%, resultando em valores de vulnerabilidade baixo (Figura 7).

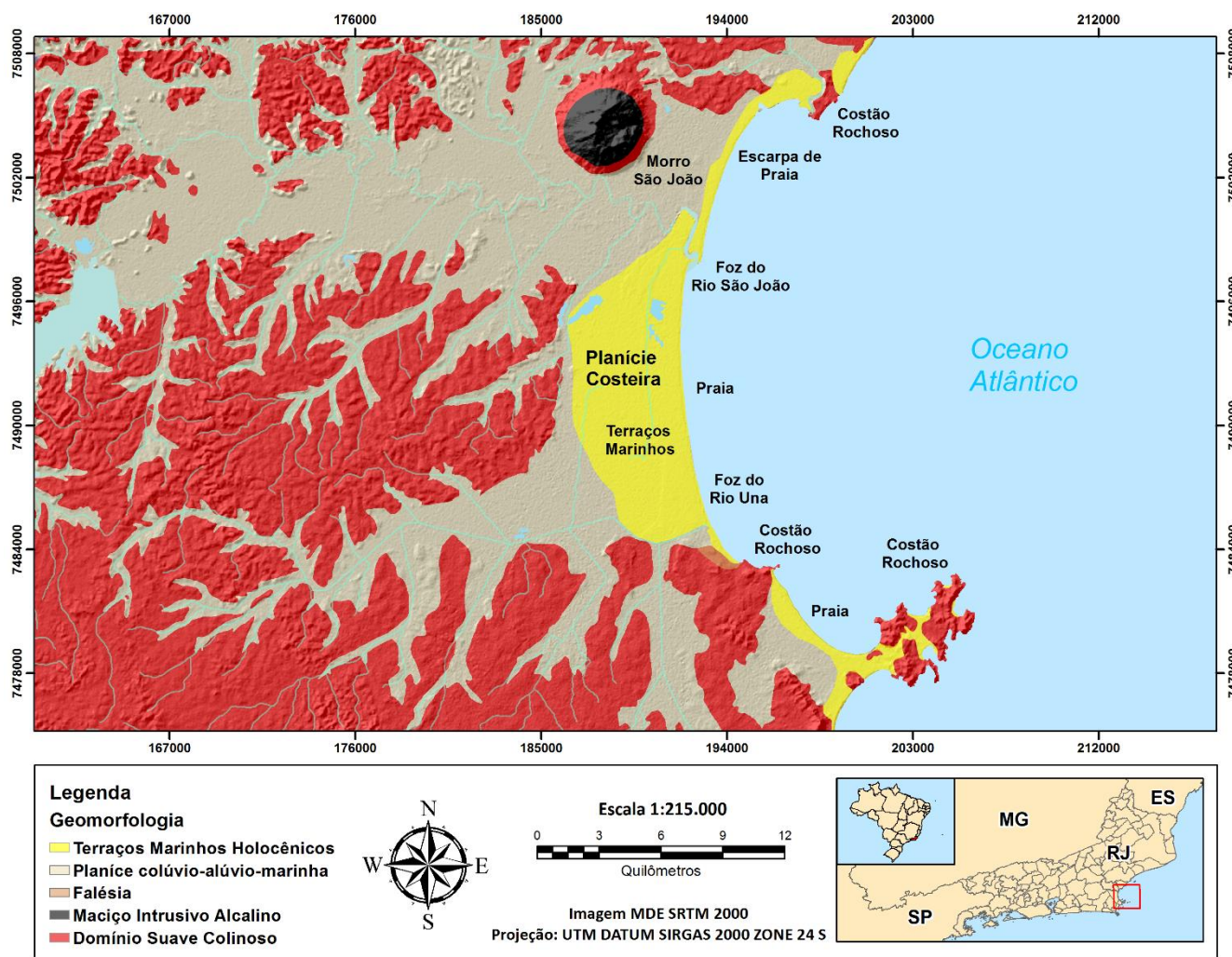


**Figura 7.** Mapa Topográfico da enseada da Baía Formosa. Os Perfis A, B, C e D foram obtidas e calculadas através de regressão linear visando definir o coeficiente angular e a declividade percentual entre os pontos analisados. Batimetria produzida através das isóbatas das cartas náuticas raster fornecidas pelo Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (2021).

### 4.3. Geomorfologia

A Figura 8 apresenta o mapa geomorfológico com a respectiva classificação de feições e formas da área correspondente a planície costeira, envolvendo a enseada da Baía Formosa. Na parte emersa, destacam-se principalmente ambientes de praias arenosas, terraços marinhos e planícies fluviais, delimitadas por maciços costeiros e paleofalésias da Formação Barreiras. Na região sul da enseada, próximo ao Cabo Búzios, as praias apresentam estágio morfodinâmico dissipativo, com extensa zona de surfe e baixo ângulo de inclinação na face de praia. A pós-praia é composta por cordões litorâneos fixados por vegetação, bordejados por paleofalésias ou rochas do embasamento cristalino. O segmento central caracteriza-se pela ocorrência de extensos cordões litorâneos que colmataram paleosistemas lagunares e planícies aluviais dos rios São João e Una. No segmento norte, as praias são compostas por sedimentos grossos, de baixa maturidade textural e perfil morfodinâmico refletivo, com alto grau de inclinação da face de praia. A pós-praia é densamente urbanizada, denotando processo de erosão costeira, registrado através de escarpas de praia, decorrentes da ação de ondas de tempestade.





**Figura 8.** Mapa Geomorfológico da enseada da Baía Formosa, com base nos mapas de Martin et al., (1997) e Dantas/CPRM (2000). Modificado IBGE (2021).

#### 4.4. Variação Relativa do Nível do Mar, Amplitude de Maré e Altura Significativa de Ondas

Para as variáveis dinâmicas, foram definidos os graus de 3 (moderado) a 5 (muito alto) de vulnerabilidade, correspondentes a variação relativa do nível do mar, amplitude de maré e altura significativa de ondas. As projeções para a variação relativa do nível do mar conforme o *Representative Concentration Pathway - RCP* proposto pelo IPCC foram 2,6 com projeção de 4,0 mm/ano até 2100 e 8,5 com projeção de 15,0 mm/ano até 2100, definidos respectivamente de graus 3 e 5 de vulnerabilidade. A média de amplitude de maré foi de 0,85 m e a altura significativa de ondas foi de 1,5 m, sugerindo grau 5 de vulnerabilidade para ambas as variáveis.

#### 4.5. Índice de Vulnerabilidade Costeira – IVC

A Tabela 3 apresenta os índices de vulnerabilidade e as respectivas variáveis físicas e dinâmicas que são abordados na Equação 1, de acordo com a metodologia proposta do USGS. São apresentados cinco índices de vulnerabilidade (1 a 5), que representam, respectivamente, muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta vulnerabilidade.



**Tabela 3.** Classificação do Índice de Vulnerabilidade Costeira – IVC na área da enseada da Baía Formosa - Estado do Rio de Janeiro.

Índice de Vulnerabilidade	Taxa de Erosão/Acreção da Linha de Costa (m/ano)	Declividade (%)	Geomorfologia	Varição Relativa do Nível do Mar (mm/ano)	Amplitude de Maré (m)	Altura Significativa de Onda (m)
1	> 2,0	> 1,9	Costões Rochosos	-	-	-
2	1,0 – 2,0	1,3 – 1,9	-	-	-	-
3	-1,0 – +1,0	0,9 – 1,3	Terraços Marinheiros; Planícies Costeiras	RCP 2,6 (4 mm/ano)	-	-
4	-1,1 – -2,0	0,6 – 0,9	-	-	-	-
5	< -2,0	< 0,6	Praia Arenosa; Escarpas de Praia	RCP 8,5 (15 mm/ano)	0,85	1,5

A Figura 9 apresenta resultados discretizados para cada uma das variáveis físicas e dinâmicas da área da enseada da Baía Formosa. Destaca-se que as variáveis dinâmicas apresentam graus fixos de vulnerabilidade para toda a enseada. Os resultados para a declividade da costa, conforme perfis topográficos (Figura 7), sugerem que o segmento central, entre as desembocaduras dos rios São João e Una, apresentam maior vulnerabilidade. Na variável geomorfologia, os setores mais vulneráveis são representados nos segmentos norte e sul, associados a presença de escarpas de praia e faixas de areia reduzidas. No segmento central, caracterizado por terraços marinhos holocênicos, sugere-se vulnerabilidade moderada. As taxas de variação de linha de costa apontam grau alto de vulnerabilidade entre as praias das Tartarugas e Abricó (setor norte) e praia do Manguinhos (setor sul), regiões que apresentam maior taxa de erosão. No segmento central, entre as desembocaduras dos rios São João e Una, registra-se estabilidade/acreção sedimentar, sugerindo condições moderadas a baixa de vulnerabilidade.

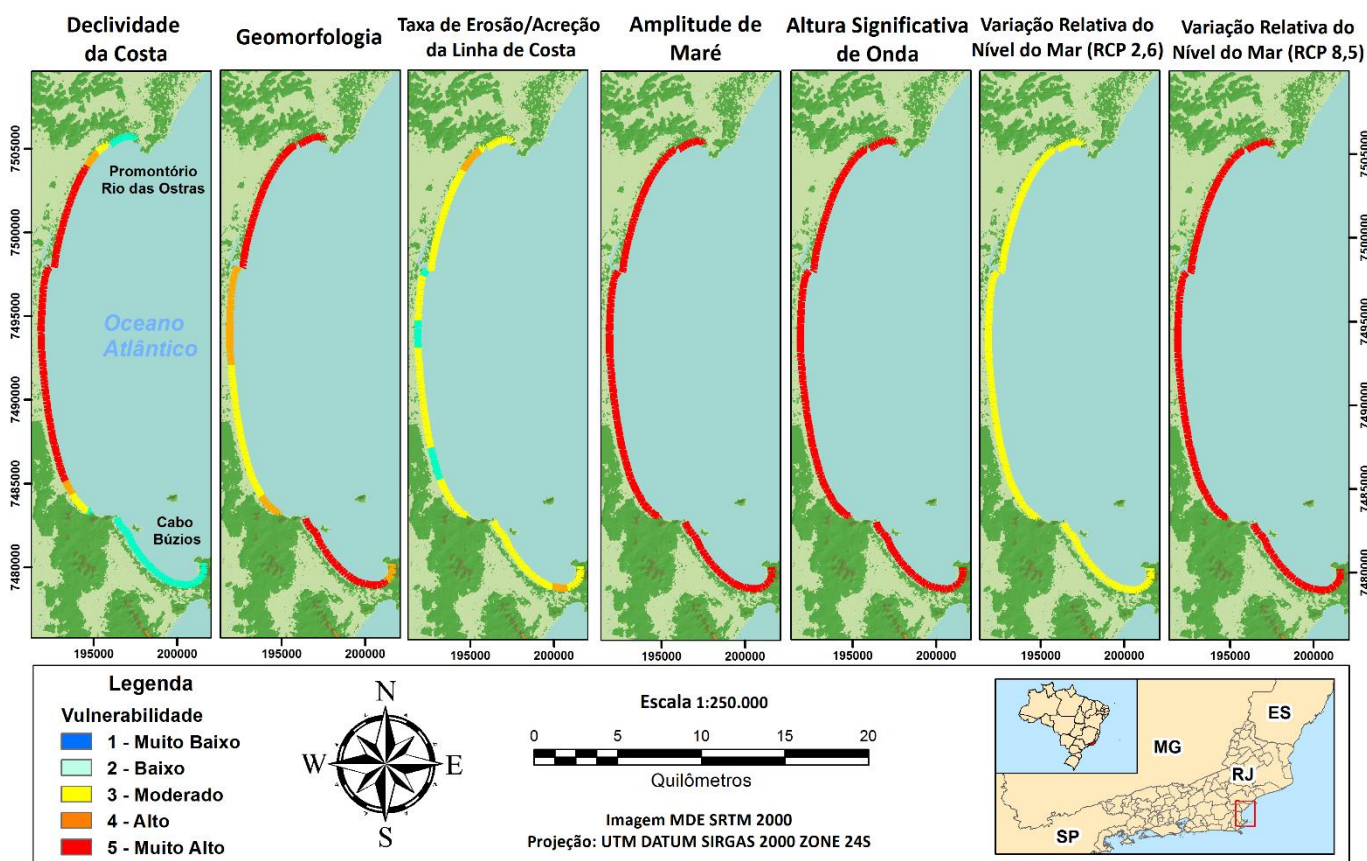
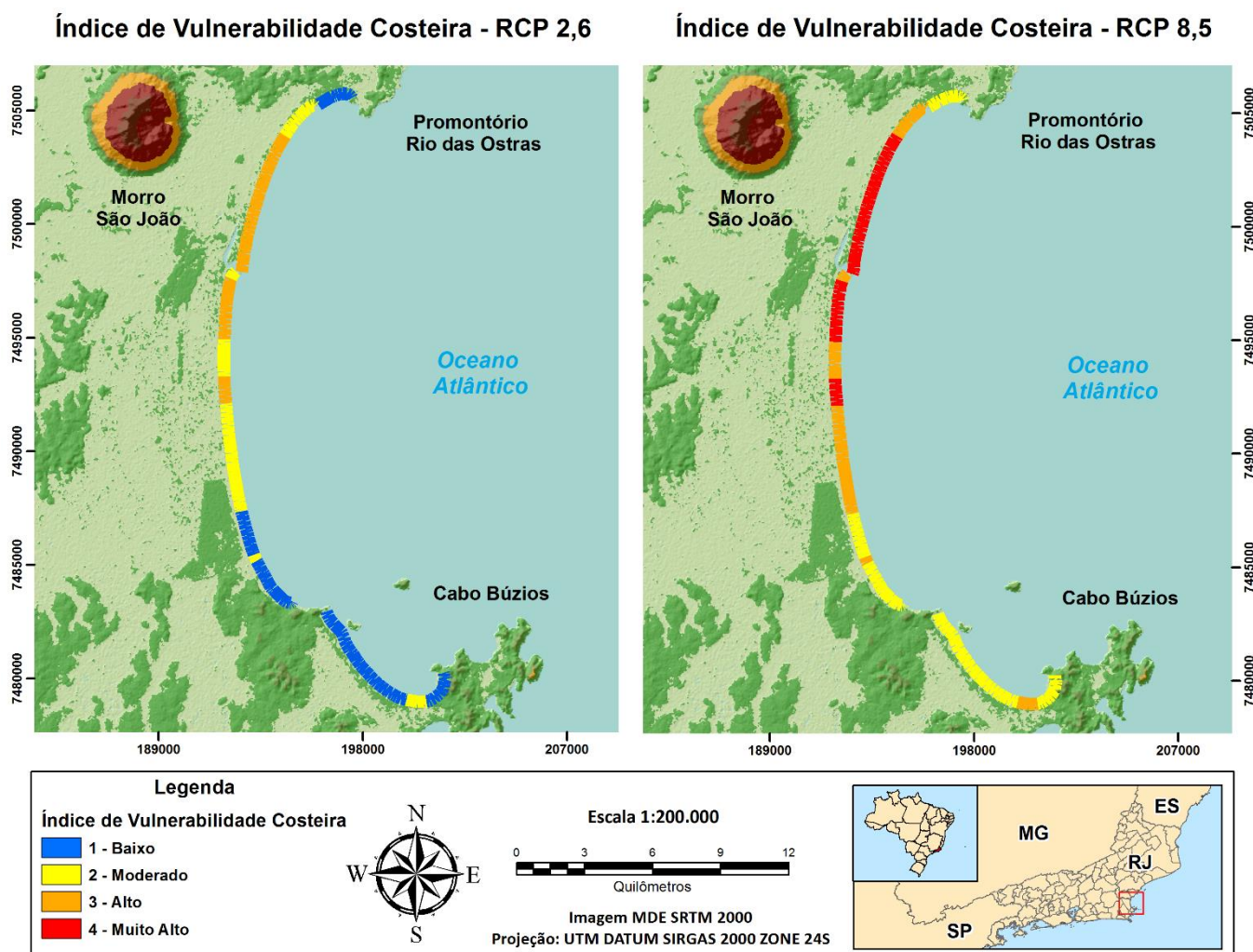


Figura 9. Resultados obtidos para o índice de vulnerabilidade costeira - IVC, envolvendo variáveis físicas e dinâmicas estabelecidos pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos.

O Mapa de Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) utilizando como base as projeções do RCP 2,6 (4,0 mm/ano até 2100) e o RCP 8,5 (15,0 mm/ano até 2100) é apresentado após a ponderação dos índices de vulnerabilidade das variáveis físicas e dinâmicas. Os resultados obtidos pela Equação 1 apontam valores entre 15,00 a 45,64, com média, moda e mediana de 27,51, 30,61 e 26,19, respectivamente. Conforme cálculo estatístico, obteve-se desvio padrão de 9,48. Os percentis sugeridos pelo IVC são de 25° correspondente ao valor de 20,86, 50° correspondente ao valor de 26,19 e 75° correspondente ao valor de 32,98. Desta forma, atribui-se valores abaixo do percentil 25° ao grau 1 (baixo), entre 25° e 50° grau 2 (moderado), entre 50° a 75° grau 3 (alto) e acima do percentil 75° grau 4 (muito alto) (Figura 10).



**Figura 10.** Mapa de Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) da enseada da Baía Formosa, utilizando como base dois resultados da variável dinâmica variação relativa do nível do mar (VRNM), os RCP 2,6 (4,0 mm/ano) e RCP 8,5 (15,0 mm/ano).

## 5. Discussão

Os dados referentes as variações de linha de costa obtidos pelos 357 (trezentos e cinquenta e sete) transectos distribuídos ao longo do arco praial da enseada da Baía Formosa, sugerem padrões distintos de transporte e deposição de sedimentos. Taxas negativas (erosão) foram observadas nos extremos norte e sul da enseada, enquanto no segmento central, próximo às desembocaduras fluviais do São João e Una, verificou-se tendência à progradação. Esse comportamento evidencia a relevância dos sistemas fluviais de retaguarda na construção da planície costeira e praias inseridas no contexto da enseada da Baía Formosa. Os dados apresentados, sugerem semelhanças com as informações obtidas por Fernandes (2010), Lins-de-Barros & Muehe (2010), Castro, Fernandes e Dias (2011), Muehe *et al.*, (2015), Magalhães, Baptista e Fernandez (2017) e Castro, Rocha e Vieira (2021).

Outro aspecto relevante envolvendo a variação de linha de costa é a relação entre as taxas de erosão e acreção de sedimentos durante os dois intervalos de tempo analisados. Entre 1976 e 2005, o segmento norte da enseada, apresentou recuo de linha de costa de 1,0 m/ano, enquanto no período de 2005 a 2020 essa taxa atingiu recuo de 2,0 m/ano. Conforme Fernandes & Castro (2020), o processo de erosão costeira acelerado no segmento norte dessa região associa-se a ação de ondas de tempestade, combinadas a intervenções antrópicas na bacia hidrográfica do São João. Esse processo tornou-se mais acelerado com a ocupação da zona de pós-praia, na construção de muros de contenção e de barramentos na calha principal do rio São João. A resultante adversa, entre fatores físicos e oceanográficos locais, aponta tendência de balanço sedimentar negativo nesse segmento litorâneo. No segmento central, próximo às desembocaduras dos rios São João e Una, registrou-se uma inversão nas taxas de variação de linha de costa, com tendência progradacional da faixa de praia. Essa inversão relaciona-se principalmente a

construção da planície costeira em virtude do aporte sedimentar e incertezas associadas à posição da linha de costa no momento da aquisição das imagens. As imagens referentes ao satélite CBERS 04A foram adquiridas em maré de quadratura, enquanto informações sobre o período de maré dos dias de aquisição das ortofotos não foram registrados. Tal fato poderá ocasionar um recuo excessivo da linha de praia, especialmente no segmento sul, onde a face de praia apresenta menor angulação com maior extensão da zona de surfe.

As condições de declividade da área de estudo, conforme o IVC sugerem relativa vulnerabilidade à inundação e rápido potencial para a modificação da posição de linha de costa. O método obtido para definição da inclinação em percentual levou em consideração a superfície contida entre a da linha de praia e a quebra fisiográfica na retaguarda da planície costeira holocênica. Essa técnica possibilitou definir a declividade dos diversos segmentos de praias da área de estudo. Trabalhos desenvolvidos por Muehe *et al.*, (2011) definiram o segmento costeiro entre a praia das Tartarugas e a desembocadura do rio São João, como de estágio morfodinâmico refletivo, com declividade alta na zona de praia, tornando-se mais suave na antepraia. No segmento sul da área de estudo, a praia apresenta baixa declividade, devido ao aporte de sedimentos finos do rio Una com zona de surfe extensa (CASTRO; FERNANDES; DIAS, 2011; FERNANDES & CASTRO, 2020). Desta forma, os segmentos que apresentaram índices de vulnerabilidade alta, encontram-se entre a desembocadura do rio São João e a Ponta do Pai Vitório. Dados obtidos através de regressão linear corroboram valores relacionados à declividade, entre, a faixa de praia e o limite interno da planície costeira, com percentual de até 0,6%. Nos segmentos extremos norte e sul da enseada, próximo as praias das Tartarugas e do Manguinhos, os resultados apresentaram índices mais baixos de vulnerabilidade, com declividades de até 1,8%.

O mapa geomorfológico da enseada da Baía Formosa apontou predomínio de alto grau de vulnerabilidade geológica nas áreas norte e sul do arco praiado estudado. As áreas urbanas na zona de pós-praia são vulneráveis a possíveis inundações marinhas, classificadas como de alta vulnerabilidade. No segmento central, entre as desembocaduras dos rios São João e Una, verificou-se extensa faixa de praia e a ocorrência de terraços marinhos holocênicos. O aporte sedimentar dos rios e os cordões litorâneos frontais funcionam como fonte alimentadora do sistema praiado local, sugerindo assim, valores de média a alta vulnerabilidade.

Dados oceanográficos, como amplitude de maré e altura significativa de ondas ( $H_s$ ) foram utilizados como graus fixos e invariáveis, conforme proposta estabelecida pelo IVC - USGS. Realça-se o efeito sombra ocasionado pelo Cabo Búzios sobre os trens de ondas provenientes do quadrante sul/sudeste, relacionados a eventos de tempestade com alto potencial erosivo (BULHÕES & FERNANDEZ, 2011; MUEHE *et al.*, 2015; FERNANDES & CASTRO, 2020). O segmento norte da enseada é mais impactado por estes eventos meteorológicos-oceanográficos, enquanto o segmento sul é relativamente protegido pelo Cabo Búzios. Neste trabalho, a média de altura significativa de ondas obtida para a enseada da Baía Formosa foi de 1,5 m para as ondas incidentes dos quadrantes nordeste e sul/sudeste, corroborando com trabalhos anteriores desenvolvidos por Castro, Fernandes e Dias (2011), Castro (2018) e Fernandes & Castro (2020).

Os resultados obtidos para cada variável física e dinâmica seguiram integralmente a proposta de índice de vulnerabilidade costeira, apresentada por Thieler & Hammar-Klose, (1999abc) e Pendleton *et al.*, (2004, 2010). Trabalhos desenvolvidos na costa brasileira por Serafim *et al.*, (2019), Osilieri, Seoane e Dias (2020) e Filgueiras & Albino (2020) sugerem de modo geral, adaptações locais, envolvendo informações sobre potencial de deriva litorânea, densidade urbana e distância entre a linha de costa e as isóbatas. Neste trabalho, os resultados das seis variáveis físicas e dinâmicas obtidos na Enseada da Baía Formosa não passaram por adaptações locais, sendo quantificadas conforme o IVC - USGS.

O Mapa IVC utilizou como referência projeções de cenários de sobrelevação do nível médio do mar propostos pelo IPCC, conforme RCP de 2,6 de 4,0 mm/ano até 2100 e RCP de 8,5 de 15,0 mm/ano até 2100. De acordo com as informações aqui obtidas, a projeção RCP de 2,6 apresentou predominantemente **alto índice de vulnerabilidade costeira** no segmento norte da área em um total de 28,7% da extensão de 40 km do arco praiado da enseada da Baía Formosa. No segmento central verificam-se **valores moderados de índice de vulnerabilidade costeira**, correspondentes a um total 29,8% da área analisada. O segmento sul apresentou cenários de **menor vulnerabilidade costeira, considerado de baixo grau**, registrada em 41,5% do litoral, entre a desembocadura do rio Una até o Cabo Búzios. O mapa IVC, utilizando como parâmetro o RCP 8,5, apresentou valores mais significativos em toda área analisada. Entre a praia das Tartarugas e a desembocadura do rio Una, predominam os **graus alto/muito alto de vulnerabilidade costeira**, em 58,5% do arco praiado. O **índice de vulnerabilidade costeira moderado** é registrado em 41,5% da área de estudo, principalmente no segmento sul.

## 6. Conclusões

O método do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) aplicado na enseada da Baía Formosa, Região dos Lagos Fluminense, Estado do Rio de Janeiro, mostrou-se eficaz na quantificação dos processos de riscos geológicos, em curso, nesse segmento de litoral brasileiro. De acordo com resultados obtidos, envolvendo variáveis físicas e dinâmicas, chegou-se às seguintes conclusões:

- O segmento norte da área de estudo, entre o promontório Rio das Ostras e a desembocadura do rio São João, registrou grau alto a muito alto de índice de vulnerabilidade costeira, conforme as projeções do IPCC de aumento do NMM mais otimista de 4,0 mm/ano até 2100 e pessimista de 15,0 mm/ano até 2010. Aproximadamente 58,5% do segmento de 40 km da zona costeira apresenta alto risco geológico. Destaca-se a praia das Tartarugas em Rio das Ostras, com alto índice de vulnerabilidade, apresentando taxa de recuo de linha de costa (erosão) de 1,0 m/ano no intervalo entre 1976 - 2020.
- O segmento central da enseada, entre a desembocadura do rio São João e a Ponta do Pai Vitório, apresentou IVC de grau 1 (baixo) a grau 3 (alto), conforme projeções do IPCC de uma possível sobrelevação envolvendo um cenário otimista de 4,0 mm/ano até 2100. Para o cenário mais pessimista de aumento do NMM em 15,0 mm/ano até 2100, apresentou IVC entre o grau 2 (moderado) e 4 (muito alto). Valores de baixa vulnerabilidade costeira registrados neste segmento de litoral devem-se à taxa de acreção sedimentar registrada na praia de Unamar, em aproximadamente 1,2 m/ano no intervalo de 44 anos. Destacam-se aos valores de alta vulnerabilidade associadas a variável declividade, que apresenta o grau mais alarmante na enseada entre a praia das Tartarugas até a desembocadura do rio Una, com declividade abaixo de 0,6%.
- O segmento sul, entre a Ponta do Pai Vitório e o Cabo Búzios, apresentou índice de vulnerabilidade costeira baixo em aproximadamente 28,7% dessa região do litoral, conforme projeções do IPCC envolvendo cenários sobre uma possível sobrelevação de 4,0 mm/ano até 2100 e de 15,0 mm/ano até 2010. Tal fato deve-se ao menor declive e geomorfologia das praias, condicionado pelo padrão granulométrico constituído por areias predominantemente finas, favorecendo dessa forma, a propagação de ondas em direção ao interior da planície costeira que se encontra parcialmente urbanizada.

Portanto, o mapa IVC, envolvendo cenários otimistas e pessimistas de um possível sobrelevação do nível médio do mar – NMM permitiu delimitar áreas mais vulneráveis a possíveis inundações marinhas na área de estudo. Tratando-se de uma região de alto potencial turístico e de média a alta concentração urbana, o presente trabalho servirá de apoio à implementação de programas de gestão urbana e erosão costeira, tanto pelo poder público como pela iniciativa privada. Realça-se que algumas dificuldades foram encontradas no desenvolvimento dessa pesquisa, principalmente no que diz respeito à ausência de um modelo digital de elevação - MDE com boa resolução radiométrica. Recomenda-se para os próximos trabalhos, a aquisição de geotecnologias de alta qualidade, visando obter resultados de maior acurácia, principalmente em relação ao MDE e imagens de sensoriamento remoto com alta resolução espacial. É ressaltado de igual importância analisar os setores censitários urbanos associados às variáveis ambientais, com o intuito de avaliar os potenciais riscos em todo segmento litorâneo da região. Destaca-se também a importância do monitoramento, para constante atualização dos dados de entrada para o cálculo do IVC.

**Contribuições dos Autores:** **Willian Cruz Gouveia Junior:** Pesquisa, Geoprocessamento, Preparação de dados, Investigação, Análise formal e Escrita do Artigo de Pesquisa. **Daniel Fernandes:** Pesquisa, Geoprocessamento, Metodologia, Preparação de dados, Investigação, Análise formal e Escrita do Artigo de Pesquisa. **João Wagner de Alencar Castro:** Concepção, Metodologia, Análise formal, Investigação, Revisão, Supervisão e Aquisição de financiamento.

**Financiamento:** Esta pesquisa foi financiada pelo CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e a FAPERJ - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem aos integrantes do Laboratório de Geologia Costeira, Sedimentologia & Meio Ambiente – LAGECOST/UFRJ, por todo o suporte para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradecemos também ao Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro – DRM e o Banco Nacional de Dados Oceanográficos – BNDO,



pela disponibilização de material. Por fim, um agradecimento especial ao Prof. D.r João Wagner de Alencar Castro, pela orientação e incentivo.

**Conflito de Interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesse. Os financiadores não tiveram interferência no desenvolvimento do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

## Referências

1. ABUODHA, P. A.; WOODROFFE, C. D. Assessing Vulnerability of Coasts to Climate Change: A Review of Approaches and Their Application to the Australian Coast. In: WOODROFFE, C. D.; BRUCE, E.; PUOTINEN, M.; FURNESS, R. A. (Ed.). **GIS for the Coastal Zone: A Selection of Papers from CoastGIS 2006**. 1ª Ed. Wollongong: Australia National Centre for Ocean Resources and Security, 2007. 458p.
2. ALCOFORADO, A. V. C. **Índice de Vulnerabilidade Costeira e Risco à Inundação em Cenários de Mudanças Climáticas no Estuário do Rio Piranhas - Açú com Utilização de Imagens de Sensores Orbitais e de LiDAR Aeroportado**. Dissertação de Mestrado ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte. 2017. 122p.
3. AMARO, V. E.; GOMES, L. R. S.; LIMA, F. G. F.; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; BUSMAN, D. V.; SANTOS, A. L. S. Multitemporal Analysis of Coastal Erosion Based on Multisource Satellite Images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil. **Marine Geodesy**, v. 38, n. 1, p. 1-25, 2015. DOI: 10.1080/01490419.2014.904257
4. AREIAS, C.; SPOTORNO-OLIVEIRA, P.; BASSI, D.; IRYU, Y.; NASH, M.; CASTRO, J. W. A.; TÂMEGA, F. T. S. Holocene sea-surface temperatures and related coastal upwelling regime recorded by vermetid assemblages, southeastern Brazil (Arraial do Cabo, RJ). **Marine Geology**, v. 425, p. 1-14, 2020. DOI: 10.1016/j.margeo.2020.106183
5. BARBIERI, E. B. Cabo Frio e Iguaba Grande, dois microclimas diferentes em um curto intervalo especial. In: LACERDA, L. D. (org.). **Restingas: Origem, Estrutura e Processos**. CEUFF, Niterói, Brasil, 1984. p. 3-13.
6. BRAGA, R. C.; PIMENTEL, A. S. Índice de Vulnerabilidade Diante da Variação do Nível do Mar na Amazônia: Estudo de Caso no Município de Salinópolis - Pará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 02, p. 534-561, 2019. DOI: 10.26848/rbgf.v12.2.p534-561
7. BRUNN, P. Review of Conditions for Uses of the Brunn Rule of Erosion. **Coastal Engineering**, v. 7, p. 77-89, 1983. DOI: 10.1016/0378-3839(83)90028-5
8. BULHÕES, E.; FERNANDEZ, G. Analysis of Shallow Water Wave Propagation and Coastal Response in Embayed Beaches. Case Study in Cape Buzios. **Journal of Coastal Research**, v. 64, p. 2022-2026, 2011.
9. BUSMAN, D. V. **Zoneamento da Dinâmica Costeira- Aplicação de Geotecnologias em Apoio à Gestão Costeira Integrada na Praia Atalaia-PA e Trecho de Praias entre os Municípios de Guimarães e Macau –RN, Setor sob Influência da Indústria Petrolífera**. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte. 2016. 185p.
10. CABRAL, C. L.; CASTRO, J. W. A.; CUNHA, A. M. Registros das Variações do Nível Relativo do Mar na Península de Armação dos Búzios, Rio de Janeiro: Análise de Dados Faciológicos e Geocronológicos. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 41, p. 130-141, 2018. DOI: 10.11137/2018\_1\_130\_141
11. CARVALHO, B. C. **Variabilidade da Resposta da Linha de Costa aos Condicionantes Hidrodinâmicos e às Oscilações do Nível do Mar no Litoral Sul Fluminense**. Tese (Doutorado em Oceanografia) - Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2019. 179p.
12. CASTRO, J. W. A. Dunas da Praia do Perú – APA Pau Brasil – Cabo Frio / RJ: Movimentação de Sedimentos Eólicos e Problemas de Soterramento. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 43., 2006, Aracaju. **Anais do XLIII Congresso Brasileiro de Geologia**, Aracaju, Sociedade Brasileira de Geologia. 2006. p. 24-25.
13. CASTRO, J. W. A.; FERNANDES, D.; DIAS, F. Monitoramento do Processo de Erosão Costeira na Praia das Tartarugas, Rio das Ostras - Estado do Rio de Janeiro / Brasil: Aplicação de Metodologia Quantitativa. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 11, n. 3, p. 356-368, 2011. DOI: 10.5894/rgci276
14. CASTRO, J. W. A.; SUGUIO, K.; SEOANE, J. C. S.; CUNHA, A. M.; DIAS, F. F. Sea Level Fluctuations and Coastal Evolution in the State of Rio de Janeiro, Southeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 86, n. 2 p. 671-683, 2014. DOI: 10.1590/0001-3765201420140007
15. CASTRO, J. W. A. The Morphodynamics Behaviour of a Cross-Shore Sandbar in a Microtidal Environment, Anjos Cove, Arraial do Cabo, Rio de Janeiro – Brazil. In: BOTERO, C. M.; CERVANTES, O. D.; FINKL, C. W. (orgs.). **Beach Management Tools - Concepts, Methodologies and Case Studies**. Coastal Research Library 24, Springer International Publishing, 2018. p. 319-329. DOI: 10.1007/978-3-319-58304-4\_16

16. CASTRO, J. W. A.; SEOANE, J. C. S.; CUNHA, A. M.; MALTA, J. V.; OLIVEIRA, C. A.; VAZ, E. R.; SUGUIO, K. Comments to Angulo *et al.*, 2016 on "Sea-level fluctuations and coastal evolution in the state of Rio de Janeiro, southeastern - Brazil" by Castro *et al.*, 2014. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90 n. 2, p. 1369-1375, 2018. DOI: 10.1590/0001-3765201820171010
17. CASTRO, L. Q.; ROCHA, T. B.; VIEIRA, R. Avaliação da Vulnerabilidade e Susceptibilidade à Erosão Costeira entre a Foz do Rio São João e a Foz do Rio Una – Cabo Frio/RJ. **Arquivos de Ciências do Mar –LABOMAR**, v. 53, p. 7-24, 2020. DOI: 10.32360/acmar.v53
18. CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA DO BRASIL. **BNDO - Banco Nacional de Dados Oceanográficos**. Disponível em: <marinha.mil.br/chm/bndo>. Acesso em: 10 Fev. 2021.
19. CUNHA, A. M.; CASTRO, J. W. A.; PEREIRA, F. M. B.; CARVALHO, M. A.; SUGUIO, K. Variações do Nível Relativo do Mar Durante o Holoceno na Bacia Hidrográfica do Rio Una, Região de Cabo Frio - Rio de Janeiro: Aspectos Sedimentológicos, Faciológicos e Geocronológicos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 1, p. 143-154, 2017. DOI: 10.20502/rbg.v18i1.1039
20. DAL CIN, R.; SIMEONI, U. A Model for Determining the Classification, Vulnerability and Risk in the Southern Coastal Zone of the Marche (Italy). **Journal of Coastal Research**, v. 10. n. 1, p. 18-29, 1994.
21. DANTAS, M. E. **Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro: Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Divisão de Cartografia - DICART / Departamento de Apoio Técnico - DEPAT, Dez. 2000. Escala 1:250.000. DOI: 10.13140/RG.2.2.32582.57923
22. DWARAKISH, G. S.; VINAY, S. A.; NATESAN, U.; ASANO, T.; KAKINUMA, T.; VENKATARAMANA, K.; JAGADEESHA, P.; BABITA, M. K. Coastal Vulnerability Assessment of the Future Sea Level in Udupi Coastal Zone of Karnataka State, West Coast of India. **Ocean & Coastal Management**, v. 52, p. 467-478, 2019. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2009.07.007
23. Esri Inc. **ArcMap (versão 10.6.1)**. Redlands, Estados Unidos, 2016.
24. FERNANDES, D. **O Processo Erosivo na Praia das Tartarugas - Rio das Ostras / Estado do Rio de Janeiro: Dinâmica Sedimentar e Controle Ambiental**. Dissertação de Mestrado ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2010. 112p.
25. FERNANDES, D.; CASTRO, J. W. A. Transporte de Sedimentos Induzido por Ondas no Segmento Norte da Enseada da Baía Formosa, Rio das Ostras, Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 4, p. 783-795, 2020. DOI: dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1900.
26. FILGUEIRAS, G. D. L.; ALBINO, J. Vulnerabilidade Costeira a Partir da Abordagem Multicritério: Estudo de Caso no Litoral Sul do Espírito Santo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 40, p. 78-93, 2020. DOI: 10.11606/rdg.v40i0.165831
27. GERMANI, Y. F.; FIGUEIREDO, S. A.; CALLIARI, L. J.; TAGLIANI, C. R. A. Vulnerabilidade Costeira e Perda de Ambientes Devido à Elevação do Nível do Mar no Litoral Sul do Rio Grande do Sul. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 15, n. 1, p. 121-131, 2015. DOI: 10.5894/rgci540
28. GORNITZ, V. M. Global Coastal Hazards from Future Sea Level Rise. **Global and Planetary Change**, v. 3, n. 4, p. 379-398, 1991. DOI: 10.1016/0921-8181(91)90118-G
29. GORNITZ, V. M.; DANIELS, R. C.; WHITE, T. W.; BIRDWELL, K. R. The Development of a Coastal Risk Assessment Database: Vulnerability to Sea-Level Rise in the U.S. Southeast. **Journal of Coastal Research**, n. 12, p. 327-338, 1994.
30. GYLLENCREUTZ, R.; MAHIQUES, M. M.; ALVES, D. V. P.; WAINER, I. K. C. Mid to late-Holocene paleoceanographic changes on the southeastern Brazilian shelf based on grain size records. **The Holocene**, v. 20, n. 6, p. 863-875, 2010. DOI: 10.1177/0959683610365936
31. HIMMELSTOSS, E. A.; HENDERSON, R. E.; KRATZMANN, M. G.; FARRIS, A. S. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.0 User Guide. **Geological Survey Open-File Report**, v. 2018-1179, p. 1-110, 2019. DOI: doi.org/10.3133/ofr20181179.
32. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE - Downloads Shapefiles Geomorfologia e Geologia do Território Brasileiro**. Disponível em: <ibge.gov.br/geociencias/todos-os-produtos-geociencias.html>. Acesso em: 5 Jan. 2021.
33. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **CBERS 04A - INPE: Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres**. Disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br/>. Acesso em: 10 Nov. 2020.
34. JENSEN, R. J. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. 2ª Ed. São Paulo: Parêntese, 2009. 661p.

35. KOROGLU, A.; RANASINGHE, R.; JIMÉNEZ, J. A.; DASTGHEIB, A. Comparasion of Coastal Vulnerability Index Applications for Barcelona Province. *Ocean and Coastal Management*, v. 178, n. 104799, p. 1-14, 2019. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2019.05.001
36. LIMA, C. C. **Sensoriamento Remoto Aplicado à Atualização de Informações Geoambientais e ao Estudo da Dinâmica da Paisagem no Estuário do Rio Piranhas - Açú/NE do Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia do Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte. 2016. 141p.
37. L3Harris Geospatial Solutions, Inc. **ENVI + IDL (versão 5.3)**. Colorado, Estados Unidos, 2021. Disponível em: <www.l3harrisgeospatial.com>.
38. LINS-DE-BARROS, F. M. **Contribuição Metodológica para Análise Local da Vulnerabilidade Costeira e Riscos Associados: Estudo de Caso da Região dos Lagos, Rio de Janeiro**. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2010. 297p.
39. LINS-DE-BARROS, F. M.; MUEHE, D. Avaliação Local da Vulnerabilidade e Riscos de Inundação na Zona Costeira da Região dos Lagos, Rio de Janeiro. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 2, n. 1, p. 55-66, 2010. DOI: 10.5380/abequa.v2i1-2.14106.
40. MAGALHÃES, B. L.; BAPTISTA, T.; FERNANDEZ, G. Dinâmica da Linha de Costa entre a Praia da Tartaruga e a Desembocadura do Rio São João (RJ). In: XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 1, 2017, Campinas. São Paulo: **Congresso Nacional de Geografia Física**, p. 6504-6508. ISBN: 978-85-85369-16-3
41. MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J. M.; DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOUT, A. C. S. P. Quaternary Sea-Level History and Variation in Dynamics Along the Central Brazilian Coast: Consequences on Coastal Plain Construction. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 1, p. 163-176, 1996.
42. MARTIN, L.; SUGUIO, K.; DOMINGUEZ, J. M. L.; FLEXOR, J. M. **Geologia do Quaternário Costeiro do Litoral Norte do Rio de Janeiro e Espírito Santo**. Ed. Conjunta, 1997. v. 1. 112p.
43. MARTINS, K. A. **Vulnerabilidade à Erosão Costeira e Mudanças Climáticas Através de Indicadores em Pernambuco, Brasil**. Dissertação de Mestrado ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco. 2015. 107p.
44. MUEHE, D.; VALENTINI, E. **O Litoral do Estado do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental**. Ed. FEMAR, 1998. 99p.
45. MUEHE, D., FERNANDEZ, G. B., BULHÕES, E. M. R., AZEVEDO, I. F. Avaliação da Vulnerabilidade Física da Orla Costeira em Nível Local, Tomando como Exemplo o Arco Praial entre Rio das Ostras e o Cabo Búzios/RJ. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 12, n. 2, p. 45-58, 2011. DOI: dx.doi.org/10.20502/rbg.v12i2.234.
46. MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; OLIVEIRA, J. F.; KLUMB-OLIVEIRA, L. Pulsos Erosivos e Resposta Morfodinâmica Associada a Eventos Extremos na Costa Leste do Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 16, n. 3, p. 369-386, 2015. DOI: 10.20502/rbg.v16i3.728.
47. NOVAK, L. P.; LAMOUR, M. R. Avaliação do Risco à Erosão Costeira em Praias Urbanizadas do Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 22, n. 1, p. 163-185, 2021. DOI: 10.20502/rbg.v22i1.1661
48. OSILIERI, P. R. G.; SEOANE, J. C. S.; DIAS, F. B. Coastal Vulnerability Index Revisited: A Case Study from Maricá, RJ, Brazil. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 72, n. 1, p. 81-99, 2020. DOI: 10.14393/revbrascartogr
49. ÖZYURT, G.; ERGIN, A. Improving Coastal Vulnerability Assessments to Sea-Level Rise: A New Indicator-Based Methodology for Decision Makers. *Journal of Coastal Research*, v. 262, p. 265-273, 2010. DOI: dx.doi.org/10.2112/08-1055.1.
50. PARENTE, C. E.; NOGUEIRA, I. C. M.; MARTINS, R. P.; RIBEIRO, E. O. Climatologia de Ondas. In: MARTINS, R. P.; MATHESON, G. S. G. (Ed.). **Caracterização Ambiental Regional da Baía de Campos, Atlântico Sudoeste: Meteorologia e Oceanografia**. Rio de Janeiro: Elsevier, in press (Série Habitats), 2014. p. 136-189. DOI: 10.1016/B978-85-352-6208-7.50001-5
51. PENDLETON, E. A.; HAMMAR-KLOSE, E. S.; THIELER, E. R.; WILLIAMS, S. J. Coastal Vulnerability Assessment of Gulf Islands National Seashore (GUIS) to Sea-Level Rise. *Geological Survey Open-File Report*, v. 03-188, p. 1-18, 2004.
52. PENDLETON, E. A.; BARRAS, J. A.; WILLIAMS, S. J.; TWICHELL, D. C. Coastal vulnerability assessment of the Northern Gulf of Mexico to sea-level rise and coastal change. *Geological Survey Open-File Report*, v. 2010-1146, p. 1-26, 2010. DOI: 10.3133/ofr20101146
53. PINHO, U. F. **Caracterização dos Estados de Mar na Baía de Campos (Rio de Janeiro)**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica). Engenharia Oceânica COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2003. 123 p.

54. RANGEL, F. E. **O Campo de Dunas Escalonares na Praia do Perú – Cabo Frio/RJ: transporte de sedimentos, formas resultantes e impactos associados**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005. 97p.
55. REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. Relationship between the southern annular mode and southern hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 48-55, 2009. DOI: 10.1590/S0102-77862009000100005
56. RODRIGUES, P. M. L. S. R. **Erosão e Acreção de Sedimentos nas Praias da Zona Oeste da Cidade do Rio de Janeiro: Aplicação do Software DSAS**. Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2017. 69p.
57. SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E.; FERREIRA, A. T. S.; BARBOZA, A. A.; FIGUEIREDO, M. C.; ARAÚJO, A. G. Metodologia para Mapeamento de Vulnerabilidade Costeira à Elevação do Nível Médio do Mar (NMM) em Escala Local. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 4, p. 691-705, 2015. DOI: 10.1590/S1982-21702015000400040.
58. SAVI, D.C. Erosão e Acreção Costeira na Enseada dos Anjos, Arraial do Cabo, RJ. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 1, p. 91-99, 2007. DOI: 10.1590/S0102-261X2007000500009.
59. SERAFIM, M. B.; SIEGLE, E.; CORSI, A. C.; BONETTI, J. Coastal Vulnerability to Wave Impacts Using a Multi-Criteria Index: Santa Catarina (Brazil). **Journal of Environmental Management**, v. 230, p. 21-32, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.09.052
60. SHARPLES, C.; MOUNT, R.; PEDERSEN, T. **The Australian Coastal Smartline Geomorphic and Stability Map Version 1: Manual and Data Dictionary**. 1.1 Ed. Tasmania: Australia Geoscience, 2009. 183 p.
61. SILVEIRA, I. R. L.; FERNANDES, D.; CABRAL, C. L.; OLIVEIRA, D. M. V.; GOUVEA JUNIOR, W. C.; CASTRO, J. W. A. **Dinâmica das Dunas Escalonares Transgressivas Sobre a Região do Perú – Cabo Frio, Rio de Janeiro**. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 22, n. 4, p. 986-1000, 2021. DOI: 10.20502/rbg.v22i4.2041
62. SOUZA, R. S. **Erosão Costeiras nas Praias da Barra da Tijuca, Reserva e Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro**. Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011. 91p.
63. SOUZA, C. R. G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A. M. S.; OLIVEIRA, P. E. **Quaternário do Brasil**. 1ª Ed. ABEQUA: Ribeirão Preto, São Paulo, 2005. 381p.
64. SPECIAL REPORT ON THE OCEAN AND CRYOSPHERE IN A CHANGING. Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. **IPCC - SR Ocean and Cryosphere (SROCC)**, p. 1-169, 2019.
65. TANO, R. A.; AMAN, A.; KOUADIO, K. Y.; TOUALY, E.; ALI, K. E.; ASSAMOI, P. Assessment of the Ivorian Coastal Vulnerability. **Journal of Coastal Research**, v. 32, n. 6, p. 1495-1503, 2016. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-15-00228
66. THIELER, E. R.; HAMMAR-KLOSE, E. S. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast. U.S. **Geological Survey Open-File Report**, v. 99-593, p. 1-15, 1999a.
67. THIELER, E. R.; HAMMAR-KLOSE, E. S. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Pacific Coast. U.S. **Geological Survey Open-File Report**, v. 00-178, p. 1-17, 1999b.
68. THIELER, E. R.; HAMMAR-KLOSE, E. S. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Gulf of Mexico Coast. U.S. **Geological Survey Open-File Report**, v. 00-179, p. 1-15, 1999c.
69. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **USGS Coastal Change Hazards Portal**. Disponível em <marine.usgs.gov/coastalchangehazardportal/ui/info/item/CDKmLpj>. Acesso em: 5 Fev. 2021.
70. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **USGS EarthExplorer - SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)**. Disponível em: <earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em 10 Jan. 2021.
71. YIN, J.; YIN, Z.; WANG, J.; XU, S. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise for the Chinese Coast. **Journal of Coastal Conservation**, v. 16, p. 123-133, 2012. DOI: 10.1007/s11852-012-0180-9.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.