UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA TERRA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PEDRO ANTONIO DA SILVA PIACESI

VULNERABILIDADE E RESILIÊNCIA COSTEIRAS DAS PRAIAS OCEÂNICAS DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO - RJ

Rio de Janeiro

2025

PEDRO ANTONIO DA SILVA PIACESI

VULNERABILIDADE E RESILIÊNCIA COSTEIRAS DAS PRAIAS OCEÂNICAS DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO - RJ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientadora: Profª. Drª. Flavia Moraes Lins-de-Barros.

Rio de Janeiro

2025

CIP - Catalogação na Publicação

P579v

Piacesi, Pedro Antonio da Silva
Vulnerabilidade e resiliência costeiras das praias oceânicas do município do Rio de Janeiro - RJ / Pedro Antonio da Silva Piacesi. -- Rio de Janeiro, 2025.
101 f.

Orientadora: Flavia Moraes Lins-de-Barros.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2025.

1. Ressaca do mar. 2. Praias arenosas. 3. Vulnerabilidade costeira. 4. Resiliência costeira. 5. Gestão costeira. I. Lins-de-Barros, Flavia Moraes, orient. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

PEDRO ANTONIO DA SILVA PIACESI

VULNERABILIDADE E RESILIÊNCIA COSTEIRAS DAS PRAIAS OCEÂNICAS DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO - RJ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Aprovada em: / / .

BANCA EXAMINADORA

_____

Profª. Drª. Flavia Moraes Lins-de-Barros (Orientadora)

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

_____

Profª. Drª. Josefa Varela Guerra

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

_____

Prof. Dr. Mauro Cirano

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

AGRADECIMENTOS

À CAPES pela bolsa de mestrado.

À UFRJ e ao CNPq pelas bolsas de iniciação científica.

À minha orientadora, professora Flavia Moraes Lins de Barros, por todo o apoio durante a pesquisa, conselhos, e oportunidade de desenvolvê-la.

Aos professores Josefa Varela Guerra e Mauro Cirano, por suas valiosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos integrantes do Laboratório de Geografia Marinha pelo apoio durante os trabalhos de campo, em especial ao Hugo.

Ao Clayton, Bernardo e Marilene, pelos conselhos, conversas e ensinamentos, não só para o desenvolvimento desta dissertação, como também, e principalmente, para a vida.

Aos meus amigos e parceiros de turma, Felipe, Pedro S., Pedro T. e Vinícius, desde o primeiro período da graduação juntos, por todas as conversas e momentos durante a graduação.

Aos meus amigos de estágio, Kemily, João, Elisimara, Clara, Vitoria e Angelo por todas as conversas, almoços e momentos durante esses dois anos. Obrigado a todos vocês, meus amigos!

Agradeço especialmente aos meus amigos próximos e à minha família: Cláudio, Bruna, Gustavo, minha mãe Analia, meu pai Antonio e minha irmã Rafaela. Amo vocês!

RESUMO

Ressaca do mar é um fenômeno de especial atenção para a população, mídia, autoridades e à gestão costeira. As praias arenosas, ambientes de deposição de material sedimentar localizadas na interface terra-mar, são diretamente expostas à ação de ondas de ressaca. No Rio de Janeiro, esse caso se agrava uma vez que suas praias estão diretamente expostas a ondas de alta energia provenientes de sul, típicas de ressaca. Utilizando uma abordagem multicritério, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para avaliação da vulnerabilidade e da resiliência de praias a eventos de ressacas do mar. Para isso, foi desenvolvido e aplicado um índice de vulnerabilidade de praias baseado em duas componentes: exposição e capacidade adaptativa das praias. O índice foi aplicado às praias oceânicas urbanizadas da cidade do Rio de Janeiro. O subíndice de exposição avalia a incidência de ondas, o potencial de colisão de ondas e inclinação da costa. O subíndice de capacidade adaptativa inclui variáveis como tamanho do grão de areia, elevação da costa e largura da praia. Os resultados indicam que 27,85% da área de estudo foi classificada com exposição muito alta às ondas de ressaca, enquanto 70,43% apresentam alta capacidade adaptativa. Em 8,07% da área de estudo foi identificada alta vulnerabilidade, particularmente nas praias da Macumba, Leblon e Arpoador. Em seguida, é apresentado o resultado do monitoramento de campo de sete pontos inseridos na área de estudo: três no arco praial Recreio-Barra da Tijuca e quatro no arco praial Leblon-Ipanema-Arpoador. Este monitoramento foi realizado em duas séries temporais: a primeira entre 2016 e 2018 e a segunda de 2023 a 2024, totalizando cinco anos. A análise da largura e do volume dos perfis indicou tendência decrescente ao longo do tempo em ambas as medidas para cinco dos sete perfis analisados. Ainda, foi aplicado o Índice de Resiliência Costeira (IRC), que visa quantificar a resiliência costeira. Para isso, considera métricas do sistema praial e agentes disruptivos utilizando cinco fatores adimensionais: Elevação Protetora (PE), Densidade de Volume (VD), Largura Protetora (PW), Altura Livre do Topo (CF) e Runup de Ondas (WR), sendo o IRC igual à soma desses fatores. Assim como a variabilidade dos perfis, foi revelado que cinco dos sete perfis possuem tendência de queda das pontuações do índice ao longo do tempo. Ao correlacionar com a variabilidade praial, o índice mostrou-se eficaz na medição da resiliência costeira. Portanto, sua integração em índices de vulnerabilidade, que, no geral, não abarcam o fator resiliência em sua metodologia, mostra-se possível. Foi realizado, ainda, um estudo de caso que buscou avaliar os impactos de uma ressaca, classificada como severa a

extrema, nos sete pontos monitorados e os relacionar aos resultados obtidos nos índices. Enfatiza-se a importância de estudos de vulnerabilidade para a gestão costeira, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de alerta preliminares e para o planejamento urbano.

Palavras-chave: Ressaca do mar, praias arenosas, vulnerabilidade costeira, resiliência costeira, gestão costeira

ABSTRACT

Storm surge is a phenomenon of particular concern for the population, media, authorities, and coastal management. Sandy beaches, depositional environments located at the land-sea interface, are directly exposed to the action of storm waves. In Rio de Janeiro, this issue is exacerbated as its beaches are directly exposed to high-energy waves from the south, typical of storm surges. Using a multicriteria approach, this study presents a methodology for assessing beach vulnerability to storm surges through the development and application of an index based on two components: beach exposure and adaptive capacity. The index was applied to the urbanized oceanic beaches of Rio de Janeiro. The exposure subindex evaluates wave incidence, wave collision potential, and coastal slope. The adaptive capacity subindex includes variables such as grain size, coastal elevation and beach width. Results indicate that 27.85% of the study area has very high exposure to storm waves, 70,43% shows high adaptive capacity, and 8,07% demonstrates high vulnerability, particularly at Macumba, Leblon, and Arpoador beaches. Next, the results of field monitoring of seven points in the study area are presented: three in the Recreio-Barra da Tijuca beach arc and four in the Leblon-Ipanema-Arpoador beach arc. This monitoring was conducted in two time series: the first from 2016 to 2018 and the second from 2023 to 2024, totaling five years. It is indicated that the profiles in the first beach arc exhibit lower variability, which correlates with the lower occurrence of damage caused by wave action. The analysis of profile width and volume indicated a decreasing trend over time in both measures for five of the seven profiles analyzed. Additionally, the Coastal Resilience Index (CRI) was applied to quantify coastal resilience. This index considers beach system metrics and disruptive agents using five dimensionless factors: Protective Elevation (PE), Volume Density (VD), Protective Width (PW), Crest Freeboard (CF), and Wave Runup (WR), with the CRI being the sum of these factors. Similar to profile variability, the index revealed that five of the seven profiles exhibit a decreasing trend in index scores over time. When correlated with beach variability, the index proved effective in measuring coastal resilience. Therefore, its integration into vulnerability indices, which generally do not include resilience in their methodology, appears feasible. A case study was also conducted to assess the impacts of a storm surge, classified as severe to extreme, at the seven monitored points and to relate them to the results obtained from the indices. The importance of vulnerability studies for coastal management is emphasized, contributing to the development of early warning systems and urban planning.

Key-words: Storm surge, sandy beaches, coastal vulnerability, coastal resilience, coastal management

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo 23
Figura 2 - Esquema síntese do conceito de vulnerabilidade 27
Figura 3 - Esquema gráfico da síntese dos componentes físicos atuantes em um evento de ressaca do mar 29
Figura 4 - Esquema ilustrativo da face de praia e do processo de transporte transversal de sedimentos 30
Figura 5 - Ilustração do transporte longitudinal baseado nas direções do vento e da onda 30
Figura 6 - Esquema que ilustra as variáveis utilizadas para a determinação do regime da EIT 32
Figura 7 - Pontos em que foram realizados os monitoramentos. a) Pontos P1 a P3, no arco praial Recreio-Barra da Tijuca (RBT); b) Pontos P4 a P7, no arco praial Leblon-Ipanema-Arpoador (LIA) 36
Figura 8 - Esquema ilustrativo do método das balizas de Emery 37
Figura 9 - Mapa com localização do ponto de coleta dos dados CMS. Os dados foram extraídos nas coordenadas 23,133ºS; 43,349ºO, a aproximadamente 13,65 km da costa, próximo à isóbata de 50 m 39
Figura 10 - Esquema representativo de uma sobrelevação do nível do mar 40
Figura 11 - Exemplo de perfil de praia com seus segmentos transversais 42
Figura 12 – Ilustração da divisão da Smartline 42
Figura 13 - Parâmetros praiais em um perfil típico 58
Figura 14 - Resultados do subíndice Ex e suas variáveis 62
Figura 15 - Percentual de cada grau de exposição na área de estudo 62
Figura 16 – Resultados do subíndice CA e suas variáveis 65
Figura 17 – Percentual de cada grau de capacidade adaptativa na área de estudo 65
Figura 18 – Resultados do IVP e de seus subíndices 66
Figura 19 – Percentual de cada grau de vulnerabilidade para as praias da área de estudo 67
Figura 20 – Percentual de cada classe das variáveis utilizadas no IVP 67
Figura 21 – Sobreposição dos perfis praiais realizados nos arcos praias RBT (P1 a P3) e LIA (P4 a P7) 69

Figura 22 – Gráficos de variabilidade da largura (a) e volume (b) cada perfil do arco praial RBT 71
Figura 23 – Gráficos de variabilidade da largura (a) e volume (b) cada perfil do arco praial LIA 72
Figura 24 – Variação do IRC por dia monitorado entre 2016 e 2024 em RBT..... 75
Figura 25 – Variação do IRC por dia monitorado entre 2016 e 2024 em LIA..... 75
Figura 26 - Sobreposição dos perfis do estudo de caso nos arcos praias RBT (P1 a P3) e LIA (P4 a P7) 77
Figura 27 - Gráficos de variabilidade da largura (a) e volume (b) dos perfis do estudo de caso no arco praial RBT 78
Figura 28 - Gráficos de variabilidade da largura (a) e volume (b) de cada perfil do estudo de caso no arco praial LIA 79
Figura 29 - Garis realizando limpeza da avenida após ocorrência de transposição no P5 84
Figura 30 - Impactos negativos de ressacas noticiados pelo jornal O Globo (1948–2008) em segmentos da área de estudo, classificados por grau de vulnerabilidade. Os números de ocorrências reportadas foram retirados de Lima (2022)..... 86
Figura 31 - Exemplos de danos observados nas praias da área de estudo. a) Destruição do calçadão na Praia da Macumba em outubro de 2017; b) Episódio de erosão no Posto 8, praia da Barra da Tijuca, em agosto de 2020; c) Rampa de acesso à praia destruída na Praia de São Conrado em 2016; d) Equipes de limpeza e repórteres cobrindo eventos de inundação no Posto 11, Praia do Leblon, em agosto de 2024; e) Largura estreita da praia após um evento de tempestade na Praia de Copacabana em julho de 2018 87
Figura 32 - SPI para o intervalo entre 2016 e 2024, segundo dados de ondas extraídos, entre as praias do Leme e da Macumba..... 90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Regimes da EIT (Sallenger, 2000) 34
Quadro 2 - Características dos modelos globais de ondas..... 38
Quadro 3 - Variáveis do IVP, fontes de dados, classes e pontuações atribuídas..... 46
Quadro 4 - Intervalos de valores e classes correspondentes para os subíndice Ex 48
Quadro 5 - Intervalos de valores e classes correspondentes para os subíndice CA 48
Quadro 6 - Intervalos de valores e classes correspondentes para o IVP 48
Quadro 7 - Classes e descrição/justificativa da variável "Exposição a ondas" 50
Quadro 8 - Intervalos, classes e suas respectivas pontuações para a variável "Potencial de colisão de ondas" 51
Quadro 9 - Intervalos, classes e pontuações para a variável "Declividade da face de praia" .. 52
Quadro 10 - Classificação da fração areia da escala de Wentworth (1922) 53
Quadro 11 - Classes de intervalo e justificativas para a variável "Altitude do pós-praia"..... 54
Quadro 12 - Classes e suas respectivas descrições da variável "Feições do pós-praia" 55
Quadro 13 - Classes de intervalo e pontuações para a variável "Declividade da largura protetora" 56
Quadro 14 - Classes de intervalo e pontuações para a variável "Largura da praia"..... 57
Quadro 15 - Siglas, nomes e descrições das variáveis utilizadas no IRC 59
Quadro 16 - Categorização das respostas dos perfis para o dia da ressaca (13/08) em relação ao perfil anterior (03/08). Tanto o volume quanto a largura são representados por "x" e referem-se às colunas "ΔL (%)" e "ΔV (%)" da Tabela 7 — portanto, são valores percentuais 82
Quadro 17 - Respostas dos perfis no dia 13/08 ($Hs_{médio}$ = 3,70 m; $Tp_{médio}$ = 11,08 s; $Dir_{média}$ = 198,29º) e seus respectivos graus de vulnerabilidade segundo o IVP. Os valores de retração estão presentes na Tabela 7, nas colunas "ΔL (%)" e "ΔV (%)" 83
Quadro 18 - Tempo de recuperação dos perfis em relação ao mínimo médio do perfil após impactos da ressaca 85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de perfis de campo realizados em cada ponto por ano.....36
Tabela 2 - Valores médios e desvios padrões de largura dos perfis para o período total entre 2016 e 2024. Medidas em metros (m) 70
Tabela 3 - Valores médios e desvios padrões de volume dos perfis para o período total entre 2016 e 2024. Medidas em metros cúbicos (m^3).....70
Tabela 4 - Valores médios de cada parâmetro do IRC obtidos em campo e utilizados no modelo. O significado de cada sigla pode ser encontrado no Quadro 15.....73
Tabela 5 - Valores médios de cada parâmetro do WR utilizados no modelo. H_0 representa a altura significativa de ondas a 20 metros de profundidade, L_0 o comprimento de onda e β_f a declividade média da praia 74
Tabela 6 - Valores médios de cada fator não-dimensional do IRC. O significado de cada sigla pode ser encontrado na seção 5.3 desta dissertação 74
Tabela 7 - Diferença percentual de larguras e volumes durante a ressaca. ΔL e ΔV representam a variação percentual da largura e volume, respectivamente, entre o perfil do dia e o anterior à ressaca (03/08). ΔL_{min} e ΔV_{min} representam a variação percentual da largura e volume, respectivamente, em relação ao mínimo médio do perfil.....81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL	Arco praial Copacabana-Leme
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
β	Declividade da face de praia
β_f	Declividade média da praia
BNDO	Banco Nacional de Dados Oceanográficos
CA	Subíndice Capacidade Adaptativa
CCA	Classificação de CA
CF_0	Altura Livre do Topo Média
CFOSAT	*Chinese-French Oceanic SATellite*
CFSRR	*Climate Forecast System Reanalysis Reforecast*
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
CMS	*Copernicus Marine Service*
CRI	*Coastal Resilience Index*
CEx	Classificação de Ex
D_{HIGH}	Altura máxima da duna
$Dir_{média}$	Direção de ondas média
D_{LOW}	Altura da base da duna
ΔL	Variação percentual da largura entre o perfil do dia e o anterior à ressaca
ΔL_{min}	Variação percentual da largura em relação ao mínimo médio do perfil
ΔV	Variação percentual do volume entre o perfil do dia e o anterior à ressaca
ΔV_{min}	Variação percentual do volume em relação ao mínimo médio do perfil

DE	Elevação da Crista da Duna Frontal
ECMWF	*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*
EIT	Escala de Impactos de Tempestades
ERS	*European Remote Sensing Satellite*
ESA	*European Space Agency*
EUMETSAT	*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*
Ex	Subíndice Exposição
GFO	*Geosat Follow-On*
H_0	altura da onda em águas profundas
Hs	Altura significativa de onda
$Hs_{médio}$	Altura significativa de onda média
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change*
IRC	Índice de Resiliência Costeira
IVP	Índice de Vulnerabilidade de Praias
L	Leste
L_0	Comprimento de onda em águas profundas
LIA	Arco praial Leblon-Ipanema-Arpoador
MFWAM	*Meteo France WAve Model*
MHW	Nível Médio da Maré Alta
MR	Retração Máxima da linha de costa
MS	Sobrelevação do mar de origem meteorológica
μ	Média
NCEP	*National Centers for Environmental Prediction*

NE	Nordeste
NOAA	*National Oceanic and Atmosferic Administration*
ONU	Organização das Nações Unidas
OSO	Oés-sudoeste
PE_0	PE Médio
PE	Elevação Protetora
PMC	Praia da Macumba
PW_0	PW Médio
PW	Largura Protetora
PSC	Praia de São Conrado
RBT	Arco praial Recreio-Barra da Tijuca
R_{HIGH}	Elevação máxima do limite terrestre atingido pelo espraiamento, relativa a um datum fixo
R_{LOW}	Elevação mínima do limite terrestre atingido pelo espraiamento, relativa a um datum fixo
s	Percentual de sedimentos finos
SAR	*Synthetic Aperture Radar*
SE	Sudeste
SO	Sudoeste
SPI	*Storm Power Index*
SSO	Su-sudoeste
σ	Desvio padrão
S	Sul
Tp	Período de ondas
$Tp_{médio}$	Período de ondas médio

UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USACE	*United States Army Corps of Engineers*
VmaxCA	Valor máximo de CA
VmaxEx	Valor máximo de Ex
WR	*Runup* de ondas
WR_0	WR Médio
WW3	*WaveWatch III*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **19**
2 OBJETIVOS **22**
2.1 Geral **22**
2.2 Específicos **22**
3 ÁREA DE ESTUDO **23**
3.1 Características meteoceanográficas **24**
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA **26**
4.1 Vulnerabilidade **26**
4.2 Resiliência **27**
4.3 Ressacas do mar **28**
4.4 Escala de Impactos de Tempestades **31**
5 METODOLOGIA **35**
5.1 Monitoramento da área de estudo **35**
5.1.1 Monitoramento topográfico 35
5.1.2 Dados de ondas 37
5.1.3 Dados de maré e nível do mar 40
5.2 Smartline **41**
5.3 Índice de Vulnerabilidade de Praia (IVP) **42**
5.3.1 IVP e subíndices 44
5.3.2 Variáveis do IVP 49
5.4 Índice de Resiliência Costeira (IRC) **57**
6 RESULTADOS **60**
6.1 Índice de Vulnerabilidade de Praias (IVP) **60**
6.1.1 Subíndice Exposição (Ex) 60
6.1.2 Subíndice Capacidade Adaptativa (CA) 63
6.1.3 Resultados do IVP 66
6.2 Avaliação de resiliência costeira **68**
6.2.1 Variabilidade dos perfis 68
6.2.2 Índice de Resiliência Costeira (IRC) 73
6.3 Estudo de caso: ressaca de 13 de agosto de 2024 ..... **76**

6.3.1 Impactos da ressaca 80
7 DISCUSSÃO 86
7.1 IVP e observações pretéritas 86
7.2 Recuperação do estoque sedimentar e resiliência..... 88
8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS 91
REFERÊNCIAS 93

1 INTRODUÇÃO

Zonas costeiras são reconhecidamente áreas complexas por diversos motivos. Primeiramente, abrigam grande parte da população mundial: segundo estimado na Conferência dos Oceanos da Organização das Nações Unidas (ONU) de 2017 (Suman, 2020), cerca de metade da população mundial reside a 100 km do oceano, área que representa apenas 20% da massa terrestre global. No Brasil, o censo de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) revelou que cerca de 26,58% da população vivia em municípios da zona costeira (IBGE, 2011). Por sua vez, no último censo, o Rio de Janeiro mostrou-se como o município com a segunda maior população do país (IBGE, 2023).

Além do fator populacional, a zona costeira é abrigo de diversas atividades relacionadas à indústria, ao petróleo e gás, além da pesca e do turismo - igualmente do ponto de vista ecológico, sendo ela lar de diversos ecossistemas: praias, manguezais, restingas, campos de dunas, recifes de coral. Portanto, acima de tudo, a zona costeira é sensível e sofre fortes pressões potencialmente degradadoras devido aos grandes interesses econômicos em um espaço geográfico limitado (Suman, 2020, p. 13) e diverso.

As praias arenosas são ambientes de deposição de material sedimentar, que se apresenta de forma desagregada e permeável, sob efeito permanente de agentes marinhos, continentais, atmosféricos e astronômicos, que, em diferentes medidas, são responsáveis pela sua variação em volume e forma. As praias arenosas são constituídas por sedimentos inconsolidados, geralmente formados por areia quartzosa, que funcionam como área de dissipação de energia das ondas (Bird, 2008). Fortes mudanças em suas feições são provocadas por ondas de tempestades e ressacas do mar, eventos de alta energia, caracterizados pela sobrelevação do nível do mar que, somados à ação das ondas, geram efeitos e impactos no litoral, como danos e prejuízos (Lima, Lins-de-Barros e Cirano, 2021).

As ressacas do mar representam um dos principais fatores de alteração morfológica de curto período em feições costeiras submetidas prioritariamente à ação das ondas, como por exemplo, as praias arenosas (Fernandez *et al.*, 2015). Ao relacionar isso aos prognósticos de elevação do nível médio do mar do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC) nas próximas décadas (Oppenheimer *et al.*, 2019), verifica-se um potencial agravamento da ocorrência de eventos de ressaca do mar até o fim do século.

Diante disso, considera-se a zona costeira e, em especial, as praias arenosas, como ambientes naturalmente instáveis e intrinsecamente vulneráveis (Alexandrakis e Poulos, 2014; Lins-de-Barros, Paula e Sousa, 2020; Lins-de-Barros, 2017). De um lado, a zona costeira e as praias são expostas aos fenômenos oceanográficos e meteorológicos que geram ressacas e podem causar erosão costeira e inundações litorâneas. De outro lado, as características geomorfológicas das praias arenosas conferem diferentes graus de resistência e resiliência aos eventos extremos de ressacas do mar e à subida do nível do mar.

Na cidade do Rio de Janeiro, os eventos de ressaca do mar são registrados desde o início do século XX e, com a forte urbanização da orla da cidade, tal fenômeno se torna motivo de crescente preocupação por parte da população, gestores e pesquisadores. Muehe *et al*. (2018), em uma classificação qualitativa baseada na observação de eventos erosivos e de recuperação, evidencia que grande parte do segmento praial da cidade do Rio de Janeiro possui tendência à erosão costeira. O conhecimento da distribuição e incidência das ressacas sobre a linha de costa e da vulnerabilidade das praias a estes eventos é relevante para os gestores públicos na elaboração de planos que visam à segurança dos banhistas e de construções próximas da linha de costa, ou seja, trata-se de um conhecimento relevante para o ordenamento territorial (Lima, 2022). Em geral, as ressacas recebem grande atenção da mídia, visto a oportunidade de contemplar o "espetáculo" oferecido pelas grandes ondas, a necessidade de alertar sobre o perigo oferecido aos banhistas devido às ondas mais altas e, no pior cenário, devido aos danos e impactos ocorridos na orla durante e após os eventos de tempestade.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta de avaliação da vulnerabilidade e resiliência das praias oceânicas da cidade do Rio de Janeiro, entre as praias do Leme e da Macumba, ao impacto por ressacas do mar.

A avaliação de vulnerabilidade e resiliência foram pautadas na aplicação de índices baseados em análise multicritério e na realização de um estudo de caso. Nesse contexto, índices e indicadores, como o Índice de Vulnerabilidade Costeira proposto inicialmente por Gornitz, White e Cushman (1990), têm se mostrado ferramentas eficazes para evidenciar áreas críticas dentro de uma zona costeira (Ramieri *et al*., 2011). Através deles, é possível guiar políticas no âmbito da gestão e do planejamento costeiro por ser uma ferramenta de fácil entendimento e interpretação, onde são agrupados e simplificados diversos parâmetros, que podem ser informações de diferentes naturezas (Nguyen *et al*., 2016, p. 23).

Inspirado nessa abordagem, o índice de vulnerabilidade aqui proposto, denominado Índice de Vulnerabilidade de Praia (IVP), foi desenvolvido a partir da integração de dois subíndices: Exposição (Ex) e Capacidade Adaptativa (CA). Esse índice incorpora variáveis

oceanográficas, geomorfológicas e o grau de urbanização da orla e foi aplicado em 25 trechos da área de estudo, com base em dados topográficos provenientes de campanhas realizadas pelo Laboratório de Geografia Marinha da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

O índice de resiliência utilizado foi desenvolvido por Dong *et al*. (2018) para quantificar a capacidade da praia de se recuperar de eventos disruptivos (Patsch *et al*., 2021). Batizado de Índice de Resiliência Costeira (IRC, do original *Coastal Resilience Index - CRI*), integra parâmetros do sistema praial, além de agentes disruptivos, para calcular a soma de cinco fatores adimensionais que incorporam parâmetros da praia, duna e ondas. O índice foi aplicado em sete pontos amostrais inseridos na área de estudo.

O estudo de caso buscou avaliar os impactos de uma ressaca, classificada como severa a extrema, nos sete pontos monitorados e os relacionar aos resultados obtidos nos índices. Essa ressaca foi classificada como severa a extrema e ocorreu entre os dias 13 e 16 de agosto de 2024.

Esta dissertação está organizada em oito seções. A Seção 1 corresponde à introdução, na qual se apresentou o tema do trabalho. Na Seção 2, são expostos os objetivos geral e específicos da pesquisa. A Seção 3 descreve a área de estudo, com seus aspectos geomorfológicos e meteoceanográficos. Em seguida, a Seção 4 apresenta a fundamentação teórico-metodológica, onde são apresentados os principais conceitos que sustentam a pesquisa. Na Seção 5, são detalhados os métodos e materiais utilizados, como o monitoramento da área de estudo e os índices propostos e/ou utilizados. A Seção 6 traz os resultados obtidos: da aplicação do IVP; do monitoramento de campo; da avaliação de resiliência costeira, incluída a aplicação do IRC; e do estudo de caso, relacionando os impactos identificados na ressaca aos resultados dos índices. Na Seção 7 são discutidos os resultados encontrados com a literatura existente sobre o tema na área de estudo. Por fim, na Seção 8, são apresentadas as conclusões do estudo, acompanhadas de sugestões para trabalhos futuros e de medidas de gestão costeira.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Apresentar uma metodologia para avaliação da vulnerabilidade e da resiliência de praias da orla do município do Rio de Janeiro a eventos de ressacas do mar a fim de compreender os efeitos na dinâmica geomorfológica das praias, assim como subsidiar políticas de enfrentamento ao risco de impactos.

2.2 Específicos

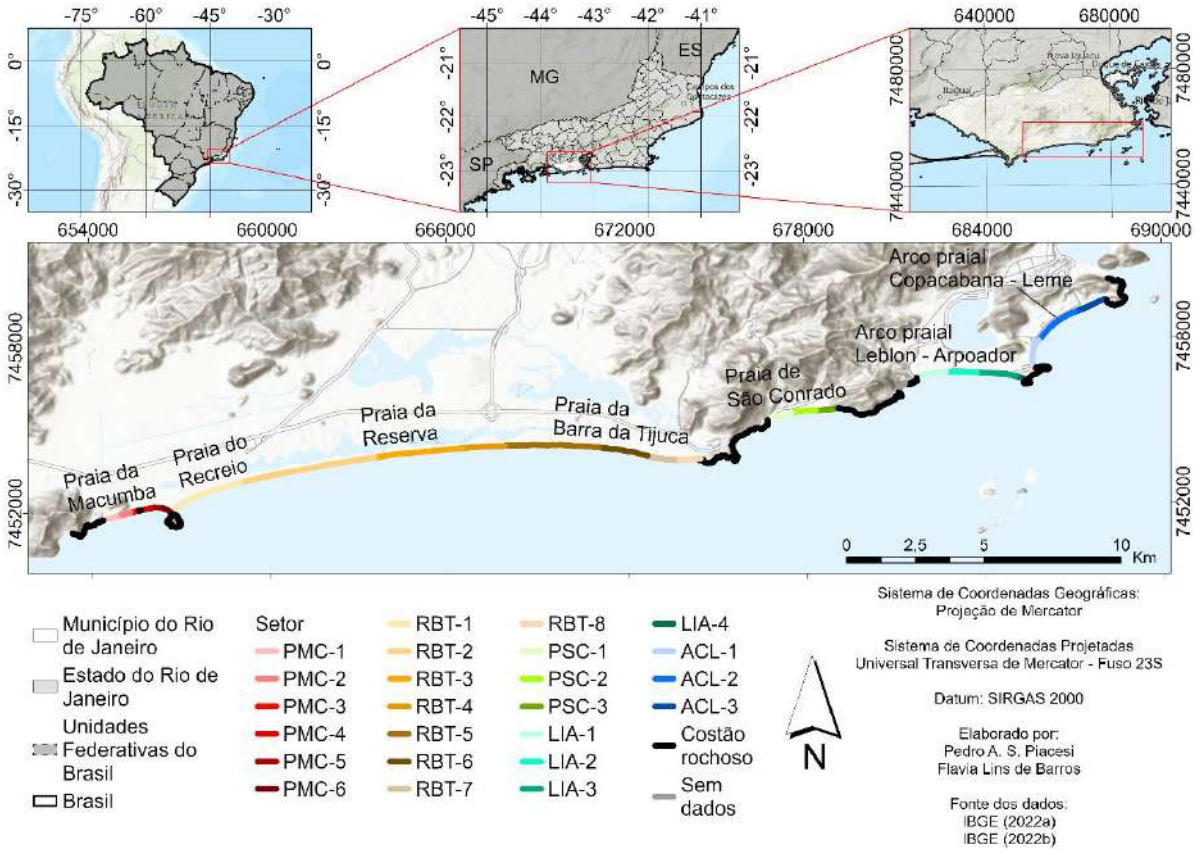
Para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos traçados foram:

1. Caracterizar morfologicamente a área de estudo;
2. Conhecer condições morfodinâmicas médias das praias;
3. Desenvolver e aplicar o IVP para a área de estudo;
4. Aplicar o IRC e avaliar a capacidade de recuperação em sete pontos amostrais distribuídos na área de estudo;
5. Realizar estudo de caso sobre a ressaca de 13 de agosto de 2024 nos sete pontos amostrais e relacionar os impactos observados aos resultados dos índices.

3 ÁREA DE ESTUDO

Com uma extensão total de 48,5 km, a área de estudo corresponde à orla oceânica do município do Rio de Janeiro, RJ (Figura 1). Limita-se a oeste pelo canal do Rio Morto, na praia da Macumba, e a leste pela Ponta do Leme, na praia homônima. Estão presentes na área de estudo, de oeste para leste, as praias da Macumba (PMC), e os arcos praiais Recreio-Barra da Tijuca (RBT), São Conrado (PSC), Leblon-Ipanema-Arpoador (LIA) e Copacabana-Leme (ACL).

Figura 1 – Localização da área de estudo



Fonte: Elaboração Própria (2025)

A área de estudo faz parte do Macrocompartimento dos Cordões Litorâneos, que se estende de Cabo Frio até Marambaia, seguindo orientação predominantemente leste-oeste (Muehe *et al*., 2018). Sua característica fundamental é a presença de cordões litorâneos transgressivos duplos, acompanhados por lagunas costeiras no interior. Os exemplos mais notáveis são a Lagoa Rodrigo de Freitas, localizada à retaguarda do arco praial Leblon-Ipanema-Arpoador, e a Lagoa Marapendi, à retaguarda do trecho Recreio-Barra da Tijuca. À

retaguarda desta última, estão as lagoas de Jacarepaguá e Tijuca, formando o que é conhecido como um sistema de cordões litorâneos transgressivos duplos (Muehe; Valentini, 1998, Dias; Kjerfve, 2009). Estas feições remontam à última transgressão marinha, há aproximadamente 7000 anos, quando o nível do mar era superior ao atual (Muehe; Valentini, 1998; Martin; Bittencourt; Villas-Boas, 1982; Lins-de-Barros; Parente-Ribeiro, 2018).

Foram identificados diversos estágios morfodinâmicos (como definido por Wright & Short (1984)) predominantes em seus diferentes arcos praiais. Bulhões (2006) identificou, nas praias de Copacabana e Leblon, os estágios Refletivo e Terraço de Baixa-Mar. As praias de Ipanema e do Recreio dos Bandeirantes variam entre os estágios Refletivo, Terraço de Baixa-Mar, Bancos Transversais e Banco e Calha Longitudinal. A praia de São Conrado alterna principalmente entre os estados de Banco e Calha Longitudinal, Terraço de Baixa-Mar e Bancos Transversais. Na praia da Barra da Tijuca predominam os estágios de Terraço de Baixa-Mar, Bancos Transversais e Refletivo. Carvalho (2019) mostra que a praia da Macumba é dominada pelo estágio Banco e Praia de Cúspides, seguido de Banco e Calha Longitudinal, Refletivo e Bancos Transversais.

O tamanho dos grãos de areia também varia significativamente na área de estudo. De acordo com Pena (2017), na praia da Macumba predominam areias grossas. Já no arco Recreio-Barra da Tijuca, encontram-se areias que variam de granulometria muito grossa a muito fina, com predominância de areias médias (Carvalho, 2019). Em São Conrado, predominam areias médias, enquanto no arco praial Ipanema-Arpoador, ocorre uma variação de areias grossas a finas. Dados primários do Laboratório de Geografia Marinha da UFRJ indicam que, no arco Copacabana-Leme, há uma predominância de areias médias.

3.1 Características meteoceanográficas

Muehe *et al.* (2018) afirmam que, assim como toda a Região Sudeste do Brasil e oceano adjacente, a área de estudo sofre influência direta do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) durante o ano inteiro, além de sistemas frontais e ciclones extratropicais originados do sudeste (SE) e sudoeste (SO), que geram condições de ondas de alta energia típicas de condições de tempestade.

Em função da orientação quase retilínea de todo o Macrocompartimento dos Cordões Litorâneos, seu litoral e, logo, as praias oceânicas do Rio de Janeiro, são particularmente vulneráveis a ondulações de alta energia provenientes do quadrante sul, também típicos de eventos de ressaca.

Lima, Lins-de-Barros e Cirano (2021), em uma análise temporal entre os anos de 1948 e 2008, identificaram que, para o estado do Rio de Janeiro, em eventos de ressacas predominam ondas com maiores alturas significativas entre 2,5 m e 4,0 m, direção de su-sudoeste (SSO) e período de pico entre 9 s e 11 s, além de ocorrerem predominantemente em marés de transição[1] e durante o outono.

Nascimento (2013), ao analisar dados de vento e onda da região da Bacia de Santos entre 1997 e 2011 com modelo *WaveWatch III* (WW3), identificou predominância de ventos vindos das direções nordeste (NE) e leste (L), seguidos por ventos de sudeste (SE), sendo os mais intensos ocorrentes no verão/primavera. Carvalho *et al*. (2021), ao analisar dados da boia de águas profundas CF2 (localizada nas coordenadas 23º 37’ S e 42º 12’ O, a aproximadamente 140 km da área de estudo e 75 km ao sul de Arraial do Cabo, próximo à isóbata de 200 m) identificam direções que variam entre L e oés-sudoeste (OSO). Ondas de L são as mais frequentes, enquanto as de S são as mais energéticas, com alturas significativas que ultrapassam 5 m e períodos de até 18 s. Eventos de tempestade são predominantemente associados com ondas de SO e períodos acima de 12 s.

Klumb-Oliveira (2024), ao utilizar a metodologia Índice de Magnitude de Tempestade (*Storm Power Index* - SPI), de Dolan e Davis (1992), identificou 231 eventos de tempestade na área de estudo entre 1979 e 2013, predominantemente das classes Fraco e Moderado. Eventos classificados como Extremos representaram 3,4% das ocorrências (n = 8). Para eventos entre as classes Fraco e Severo, o autor indicou tempo de retorno de um ano; para eventos acima da classe Severo, o tempo de retorno é de 5 anos. Eventos Fracos e Moderados foram observados em todos os meses do ano; Significativos e Severos ocorreram de março a novembro; eventos Extremos, por sua vez, de abril a setembro. A duração média das tempestades é de 27,8 h.

Lins-de-Barros, Klumb-Oliveira e Lima (2018), ao analisar os dados captados pelo *Climate Forecast System Reanalysis Reforecast* (CSFRR) dos Centros Nacionais de Previsão Ambiental (*National Centers for Environmental Prediction* - NCEP) entre 1979 e 2013, verificaram que, em um ponto no mar na direção de Saquarema, na Região dos Lagos (RJ), o maior percentual de ondas é proveniente de L (45,79%) e S (44,86%), e alturas significativas de ondas que se situam entre 2 e 4 m.

[1] Classificação utilizada por Lima, Lins-de-Barros e Cirano (2021) para se referir ao período entre as marés de sizígia e quadratura.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA

4.1 Vulnerabilidade

O termo “vulnerabilidade” é extensivamente discutido na literatura, não existindo um consenso em torno de sua conceituação, apresentando pontos convergentes e divergentes acerca de seu significado (Mazzer, 2007). O mesmo autor percebe, em algumas publicações, uma frequente associação e ausência de discernimento entre os termos “vulnerabilidade”, “risco”, “perigo” e “dano”, “em que a conceituação desses se apresenta de forma implícita, sendo priorizadas as questões metodológicas e de aplicação de resultados.” (Mazzer *op. cit.*, p. 18). O autor chama a atenção para a necessidade de um consenso e, daí, um conceito para que se possibilite a escolha da abordagem metodológica adequada ao estudo, considerando as diversas aplicações e abordagens do termo.

Em vista disso, é importante elucidar o significado do termo que será utilizado para o estudo da vulnerabilidade costeira no presente estudo. Assume-se, então, o conceito utilizado por Lins-de-Barros, Paula e Sousa (2020), no qual o termo vulnerabilidade está relacionado à exposição de uma comunidade ou de um sistema ambiental ao perigo, seu grau de suscetibilidade e sua capacidade de adaptação, e os impactos resultantes. Por sua vez, difere do risco, que representa algo futuro, ou seja, refere-se a alguma ameaça ou perigo que poderá ocorrer, definida pela probabilidade de ocorrência desse perigo e/ou ameaça.

Os perigos, aqui, são entendidos como processos ou fenômenos, naturais ou não, potencialmente danosos que podem acometer uma determinada localidade, semelhante ao definido por Tominaga (2015, p. 151), podendo ele ser originado por fatores de diversas origens — naturais ou antrópicas (UNDP, 2004).

Dessa forma, a caracterização geomorfológica dos ambientes costeiros, como as praias, é crucial para verificar a vulnerabilidade (Figura 2) desses ambientes à ocorrência de pulsos erosivos devido às ondas e marés durante eventos de ressacas. Concomitante a isso, é necessário verificar as condições meteoceanográficas do mar. Dessa forma, determina-se a vulnerabilidade, por meio da análise das características desse ambiente, frente ao perigo — no caso, as ressacas do mar.

A incorporação de índices e indicadores à temática da vulnerabilidade torna a discussão ainda mais complexa. Por sintetizarem múltiplos critérios em sua formulação, é fundamental que o desenvolvimento e aplicação de índices de vulnerabilidade em estudos científicos se

apoiem em uma clara definição do conceito de vulnerabilidade adotado pelo pesquisador, uma vez que ela orienta todo a construção do índice e a seleção das variáveis abordadas.

Figura 2 - Esquema síntese do conceito de vulnerabilidade

Fonte: Elaboração Própria (2025)

4.2 Resiliência

A qualidade "resiliência" é vista como desejável a um sistema natural ou modificado e as políticas de gestão ambiental visam sua maximização. Entretanto, esse também é um termo constantemente mal definido e interpretado com ambiguidade na literatura (Masselink e Lazarus, 2019). O sexto relatório de mudanças climáticas do IPCC (2023) define resiliência como:

> "A capacidade dos sistemas sociais, econômicos e ecológicos interconectados de lidar com um evento perigoso, tendência ou distúrbio, respondendo ou se reorganizando de forma a manter sua função, identidade e estrutura essenciais. A resiliência é um atributo positivo quando mantém a capacidade de adaptação, aprendizado e/ou transformação." (IPCC, 2023, p. 128, tradução própria)

No contexto costeiro, a resiliência adquire uma dimensão ainda mais crítica, dado que as zonas litorâneas estão expostas a uma série de ameaças naturais e antropogênicas. Muitas vezes incorporado no conceito de vulnerabilidade, como apresentado em Lins-de-Barros, Paula e Sousa (2020), sua definição é frequentemente negligenciada e confundida, uma vez que zonas costeiras resilientes não são necessariamente estáveis. Com as mudanças climáticas, um aspecto mais importante da resiliência costeira é a capacidade de um determinado sistema de resistir ou se adaptar a um distúrbio crônico e contínuo, como o aumento do nível do mar, uma mudança nas condições predominantes de ondas ou um suprimento negativo de sedimentos (Masselink e Lazarus, 2019). Os autores a definem, com vistas a isso, da seguinte forma:

> "A resiliência costeira é a capacidade dos sistemas socioeconômicos e naturais no ambiente costeiro de lidar com distúrbios induzidos por fatores como o aumento do nível do mar, eventos extremos e impactos humanos, adaptando-se e mantendo suas funções essenciais." (Masselink e Lazarus *op. cit.*, p. 10, tradução própria)

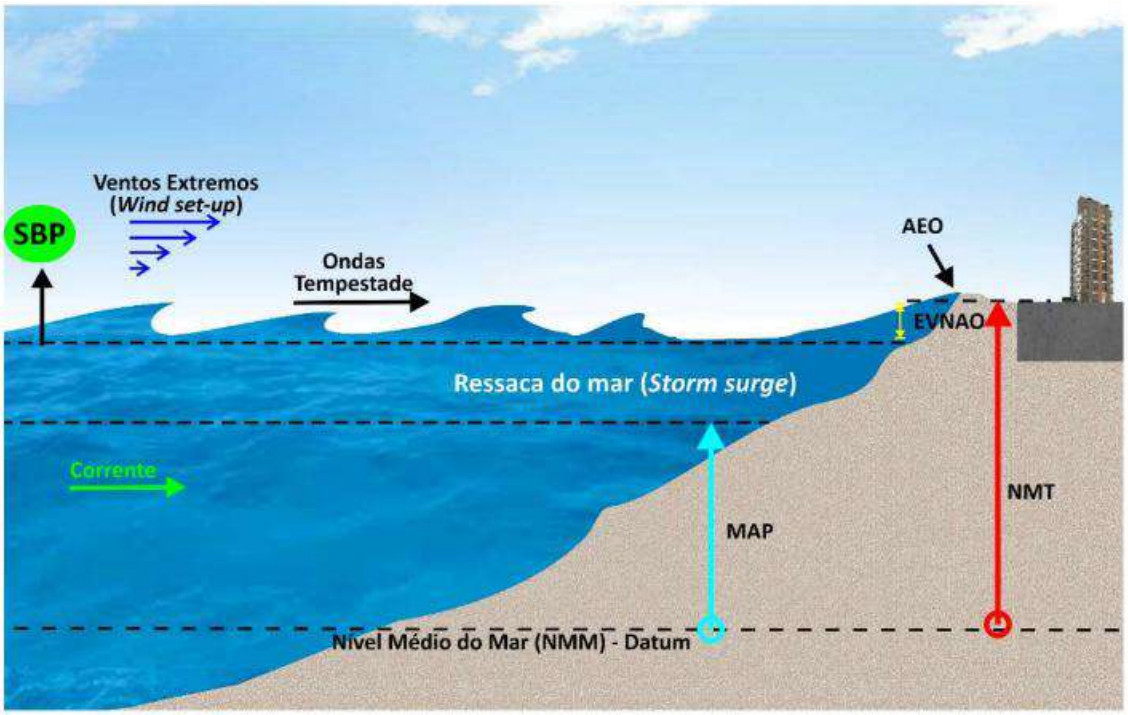
Assim como para o conceito de vulnerabilidade, o desenvolvimento de métricas permanece relevante para identificar como as características de um sistema físico podem estar relacionadas a um evento disruptivo e para abordar diretamente as dimensões naturais e socioeconômicas dos sistemas costeiros modernos (Masselink e Lazarus, 2019). Por isso, o presente trabalho aborda a resiliência como a capacidade do sistema praial de retornar às suas condições normais, semelhante ao abordado por Fernandez *et al*. (2015). Não é proposto aqui, entretanto, o esgotamento do debate sobre o conceito. É importante lembrar que a resiliência não deve ser vista apenas como um retorno ao estado anterior a um impacto, mas como um processo contínuo e complexo, principalmente em um cenário de mudanças climáticas.

4.3 Ressacas do mar

As ressacas do mar são fenômenos naturais provocados por fatores astronômicos e meteoceanográficos que levam ao empilhamento da massa de água junto à costa (*wave setup*), resultando em uma sobrelevação momentânea do nível do mar acima do nível médio. Quando somada à ação das ondas, geram efeitos e impactos no litoral, que podem resultar em danos e prejuízos à infraestrutura costeira (Lima; Lins-de-Barros; Cirano, 2021; Paula *et al*., 2015) (Figura 3).

O empilhamento de água no litoral é provocado por ondas, ventos fortes e níveis altos de maré (Paula, 2012, Lins-de-Barros; Paula; Sousa, 2020). Consequentemente, há um maior valor de *runup*, isto é, o alcance das ondas no interior do prisma praial, onde as ondas alcançam uma maior distância para o interior do perfil praial, em direção ao continente.

Figura 3 - Esquema gráfico da síntese dos componentes físicos atuantes em um evento de ressaca do mar

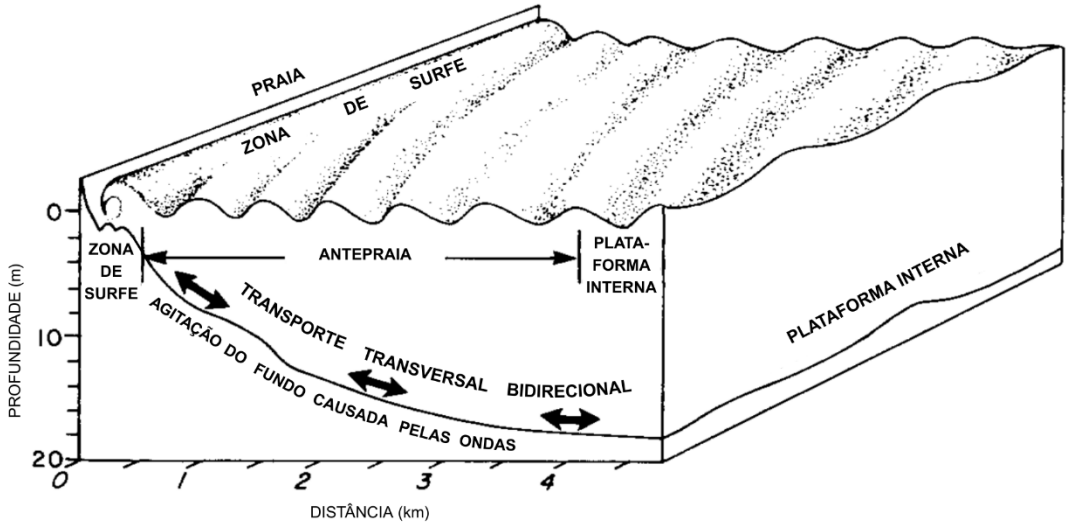


EVNAO - Empilhamento vertical do nível da água por quebra da onda (*Wave set-up*)
MAP - Maré alta prevista (*Expected high tide*)
AEO - Alcançe do espraio da onda (*wave run-up*)
SBP - Sistema de Baixa Pressão (tempestade)
NMT - Nível de mar total (ou nível do mar local).

Fonte: Lins-de-Barros, Paula e Sousa (2020)

Como consequência desse processo, ocorre o transporte sedimentar transversal à linha de costa, resultado do "fluxo hidrodinâmico bidirecional perpendicular à linha de costa e de mecanismos de compensação do acúmulo das águas em direção à praia, associados ao processo de arrebentação das ondas" (Abreu, 2011, p. 104). Esse transporte pode ocorrer tanto no sentido continental, quando há a transposição das ondas sobre o prisma praial, quanto no sentido oceânico, por meio de fluxos de retorno na porção inferior da coluna d'água (Figura 4). Essas dinâmicas são as principais causas da perda de sedimento do perfil, resposta às condições energéticas do regime de ondas durante tempestades.

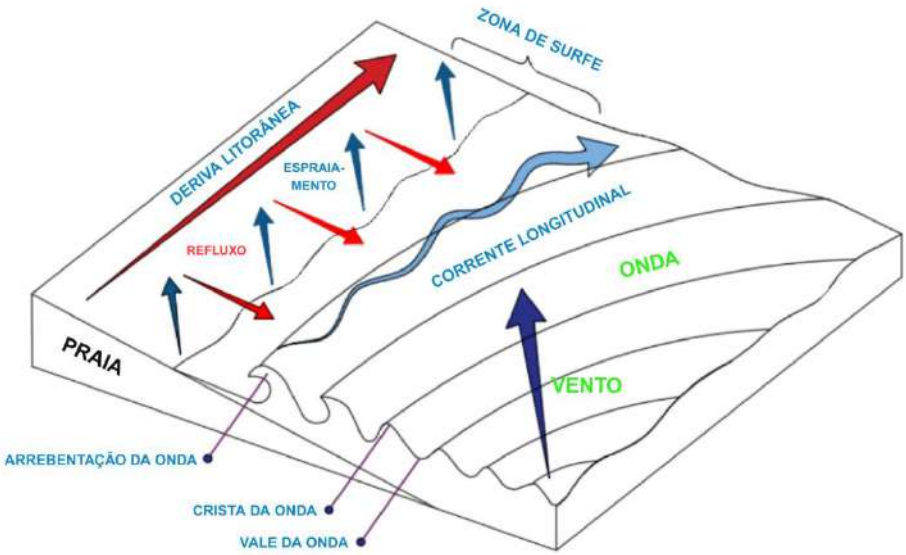
Figura 4 - Esquema ilustrativo da face de praia e do processo de transporte transversal de sedimentos



Fonte: Adaptado e traduzido de Wright *et al*. (1991)

Outro processo que participa da retirada de sedimentos do perfil é o transporte longitudinal, resultado da incidência das ondas obliquamente na costa (Figura 5). Como resposta, os sedimentos são movidos paralelamente à linha de costa, definindo a ocorrência de correntes de deriva litorânea, que ocorre entre a linha de arrebentação e a face de praia (Abreu, 2011). Como resultado, uma das extremidades do arco praial, no sentido do transporte, poderá sofrer progradação; por outro lado, a extremidade oposta poderá perder sedimentos e sofrer erosão, o que torna esse trecho mais vulnerável durante tempestades.

Figura 5 - Ilustração do transporte longitudinal baseado nas direções do vento e da onda



Fonte: Adaptado e traduzido de Alpaca-Chacón *et al.* (2024)

Na área de estudo, um exemplo notável da ocorrência desse processo é no arco praial LIA: ondulações vindas de SE movimentam os sedimentos da praia do Arpoador em direção ao Leblon, enquanto as que vêm de SO fazem o transporte das areias no sentido contrário (Neves *et al*., 2007).

As ressacas, portanto, são eventos que causam perda de areia nas praias e, logo, potenciais danos à retaguarda, principalmente ao considerarmos a presença de construções no sistema praial, dinâmico por natureza, podendo, ainda, gerar retrogradação a longo prazo devido à repetida ocorrência do evento. Em relação a isso, Fernandez *et al*. (2015) expõem que a medição da resiliência das praias é crucial para o estudo da vulnerabilidade da orla às ondas de ressaca, uma vez que uma praia que sofreu impactos pretéritos de ressacas estará mais vulnerável a eventos futuros.

Isso está associado à ocorrência de agrupamento de tempestades (*storm clustering*), isto é, a ocorrência de múltiplos eventos de tempestade em sequência, com intervalos curtos de tempo entre eles, insuficientes para que o sistema costeiro (praia/duna) se recupere completamente entre os eventos. Dissanayake *et al*. (2015) exemplifica que, embora uma tempestade intensa possa causar erosão pontual em sistemas praiais, o sistema tende a se recuperar por meio do transporte de sedimentos em direção à costa.

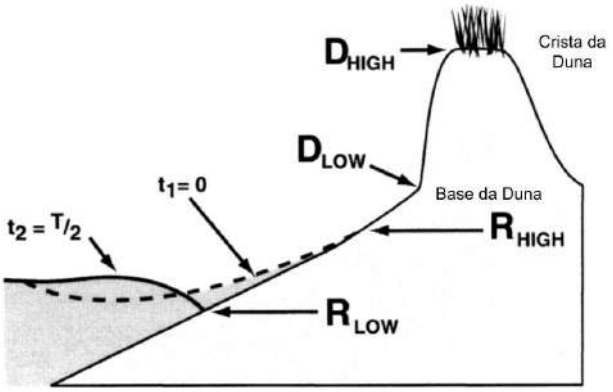
No entanto, se uma segunda tempestade ocorrer antes dessa recuperação completa do perfil, mesmo que seja menos intensa, os danos tendem a ser maiores pois o sistema já se encontra fragilizado. Isso se deve à diminuição da dissipação de energia das ondas após a erosão inicial. Se esses eventos forem mais intensos, os efeitos serão ainda mais devastadores. Assim, agrupamentos de tempestades podem provocar impactos mais severos do que uma única tempestade intensa (Dissanayake *et al*., 2015).

4.4 Escala de Impactos de Tempestades

A Escala de Impactos de Tempestades (EIT) é uma metodologia desenvolvida por Sallenger (2000) que busca avaliar os impactos decorrentes de tempestades a ilhas-barreiras em quatro regimes diferentes, que possuem diferentes níveis de impactos: o impacto de nível 1, chamado de regime de *Swash* (Espraiamento); o impacto de nível 2, regime *Collision* (Colisão); impactos de nível 3, regime *Overwash* (Transposição); e o impacto de nível 4, regime *Inundation* (Inundação). Cada um desses regimes é descrito no Quadro 1.

Para sua determinação, é necessário que se conheçam os valores altimétricos das dunas, do nível do mar, da declividade da face de praia (β), da altura significativa de onda (Hs) em águas profundas e do período da onda (Tp) e, com isso, os valores de espraiamento (*swash*) e *runup*, obtidos através de algumas equações baseadas nos parâmetros supracitados. A Figura 6 ilustra um perfil típico com as variáveis utilizadas na metodologia.

Figura 6 - Esquema que ilustra as variáveis utilizadas para a determinação do regime da EIT



Fonte: Adaptado e traduzido de Sallenger (2000)

D_{HIGH} representa a altura máxima da duna em metros, tida como a "primeira linha de defesa" da ilha-barreira, ou do cume da berma se uma duna frontal não estiver presente no perfil; D_{LOW} é a altura da base da duna; R_{HIGH} e R_{LOW} são, respectivamente, as elevações máxima e mínima do limite terrestre atingido pelo espraiamento, relativas a um datum fixo. Ainda, R_{LOW} representa o valor de *runup* onde a porção da praia é, na maior parte do tempo, continuamente subaquática (Sallenger, 2000)[2].

Conhecidos os valores oceanográficos e topográficos, calcula-se, primeiramente, o $R_{2\%}$ (Holman, 1986) (Equação 1), que corresponde aos valores que excedem o total do *runup* em 2%, que inclui tanto a altura do espraiamento quanto o valor do empilhamento de água junto à costa (*setup*):

$$R_{2\%} = Hs\,(0{,}83\,\varepsilon_0 + 0{,}2) \qquad (1)$$

Equação 1 - Excedentes de 2% do *runup* (Holman, 1986)

[2] R, das siglas R_{HIGH} e R_{LOW}, refere-se a *runup*. D, de D_{HIGH} e D_{LOW}, refere-se *dune* (duna, em português) (Sallenger, 2000).

ε_0 é equivalente ao número de Iribarren, parâmetro que afere as condições de arrebentação da onda, resultado da Equação 2, proposta por Battjes (1974):

$$\varepsilon_0 = \beta / (Hs / L_0)^{\wedge}½ \quad (2)$$

Equação 2 - Cálculo do parâmetro de Iribarren (Battjes, 1974)

onde β é utilizado em radianos e L_0 corresponde ao comprimento de onda em águas profundas, dado pela Equação 3:

$$L_0 = gT^2 / 2\pi, \quad (3)$$

Equação 3 - Determinação do comprimento de onda (Battjes, 1974)

onde T corresponde ao período da onda e g à aceleração da gravidade.

Enfim, o valor de R_{HIGH} é obtido a partir da Equação 4 (Sallenger, 2000):

$$R_{HIGH} = R_{2\%} + \eta mean \quad (4)$$

Equação 4 - Cálculo do *runup* máximo (Sallenger, 2000)

onde ηmean corresponde ao nível médio do mar (soma do nível de mar previsto com a sobrelevação do mar de origem meteorológica) durante o evento de tempestade.

O R_{LOW}, por sua vez, é dado pela Equação 5 (Sallenger, 2000):

$$R_{LOW} = R_{HIGH} - S_{2\%} \quad (5)$$

Equação 5 - Determinação do R_{LOW} (Sallenger, 2000)

sendo $S_{2\%}$ o valor de espraiamento excedente em 2% (Holman, 1986), dado pela Equação 6:

$$S_{2\%} = H_0 (0{,}85\varepsilon_0 + 0{,}06) \quad (6)$$

Equação 6 - Determinação do espraiamento (*swash*) 2% excedente (Holman, 1986)

na qual H_0 representa a altura da onda em águas profundas.

Quadro 1 – Regimes da EIT (Sallenger, 2000)

Nível do impacto	**Regime**	**Alcance de R_{HIGH}/D_{HIGH} e R_{LOW}/D_{HIGH}**	**Regime e previsões de mudanças na praia**
1	Espraiamento (*Swash*)	$R_{HIGH}/D_{HIGH} < D_{LOW}/D_{HIGH}$ ($R_{HIGH}/D_{HIGH} \leq 1$ e $R_{LOW}/D_{HIGH} < 1$)	- *Runup* é confinado à face de praia; - Durante tempestades, a face de praia erode e a areia é transportada para o mar; - Após as tempestades, a areia é transportada gradualmente *onshore*, durante semanas ou meses. Consequentemente, a areia anteriormente perdida é reposta.
2	Colisão (*Collision*)	$R_{HIGH}/D_{HIGH} \geq D_{LOW}/D_{HIGH}$ ($R_{HIGH}/D_{HIGH} \leq 1$ e $R_{LOW}/D_{HIGH} < 1$)	- *Runup* colide com a base da duna frontal[3]; - A colisão força a erosão da areia da duna, que é transportada para o mar (e/ou ao longo da costa); - A areia erodida da duna não é facilmente reposta à duna, resultando em erosão líquida.
3	Transposição (*Overwash*)	$R_{HIGH}/D_{HIGH} > 1$ e $R_{LOW}/D_{HIGH} \leq 1$	- *Runup* excede a elevação da "primeira linha de defesa" - isto é, o cume da duna ou, se a duna não estiver presente, a crista da berma (D_{HIGH}); - A areia é transportada para o interior (dezenas a centenas de metros), contribuindo para a migração líquida da faixa de praia para o interior (não há erosão líquida da porção frontal do perfil e a deposição ocorre para além da duna).
4	Inundação (*Inundation*)	$R_{HIGH}/D_{HIGH} > 1$ e $R_{LOW}/D_{HIGH} > 1$	- A elevação da base do espraiamento, R_{LOW}, excede a elevação da "primeira linha de defesa", D_{HIGH}. Logo, toda a praia e o sistema de dunas tornam-se subaquáticos.

Fonte: Adaptado de Sallenger (2000) e Pena (2017)

[3] Se nenhuma duna frontal estiver presente ($D_{LOW} = D_{HIGH}$), não haverá impacto nível 2. Como R_{HIGH}/D_{HIGH} acresce de zero, o espraiamento evolui para transposição ou inundação (Sallenger, 2000).

5 METODOLOGIA

5.1 Monitoramento da área de estudo

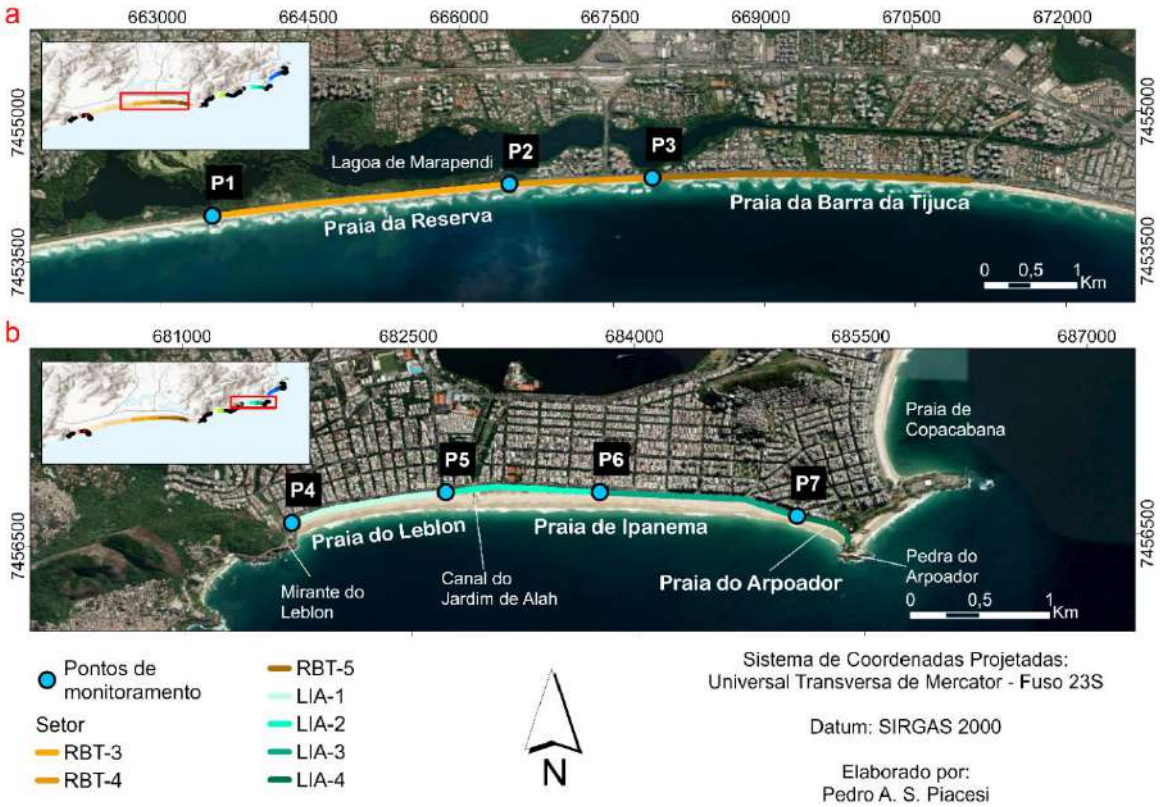
5.1.1 Monitoramento topográfico

O monitoramento da área de estudo foi estabelecido com o propósito de responder à pergunta: como se comportam trechos com diferentes características morfológicas em resposta aos eventos de ressaca? Dessa forma, obteve-se, nas campanhas de campo, parâmetros morfológicos e estatísticos em cada ponto. São eles: a) Largura do perfil; b) Altitude do perfil; c) Volume do perfil. O processamento desses dados permitiu adquirir as condições médias dos perfis, além dos desvios padrões e, logo, o comportamento de variação média.

As medições foram realizadas mensalmente em duas séries temporais: entre 2016 e 2018 e entre 2023 e 2024 em sete pontos de monitoramento: três no arco RBT (Figura 7a) e quatro no arco LIA (Figura 7b). Esses trechos correspondem, respectivamente, aos setores RBT-3 a RBT-5, no arco RBT, e LIA-1 a LIA-4, no arco praial LIA, e podem ser visualizados na Figura 1. A escolha dos setores se deveu às diferentes condições dos arcos praias quanto à sua ocupação: de um lado, a praia da Reserva: o trecho com pós-praia menos urbanizado da área de estudo, com a presença de dunas frontais vegetadas; de outro, o arco praial Leblon-Ipanema-Arpoador, um destino turístico mundialmente conhecido e, também, densamente ocupado, com construções que por vezes invadem a berma das praias.

No caso dos pontos P1 a P3, no arco RBT, o monitoramento da primeira série temporal foi realizado por Carvalho (2019) e os perfis foram cedidos pela autora. Os perfis de praia dos pontos P4 ao P7 da primeira série temporal foram retirados da base de dados do Laboratório de Geografia Marinha. A Tabela 1 mostra a quantidade de perfis realizados para cada ponto de monitoramento.

Figura 7 - Pontos em que foram realizados os monitoramentos. a) Pontos P1 a P3, no arco praial Recreio-Barra da Tijuca (RBT); b) Pontos P4 a P7, no arco praial Leblon-Ipanema-Arpoador (LIA)



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 1 - Quantidade de perfis de campo realizados em cada ponto por ano

Arco praial	Ponto	2016	2017	2018	2023	2024	Total
RBT	P1	2	13	6	7	10	38
	P2	2	13	6	7	10	38
	P3	0	0	0	7	10	17
LIA	P4	4	2	2	9	12	29
	P5	3	3	2	9	12	29
	P6	3	3	2	9	12	29
	P7	3	2	2	9	12	28

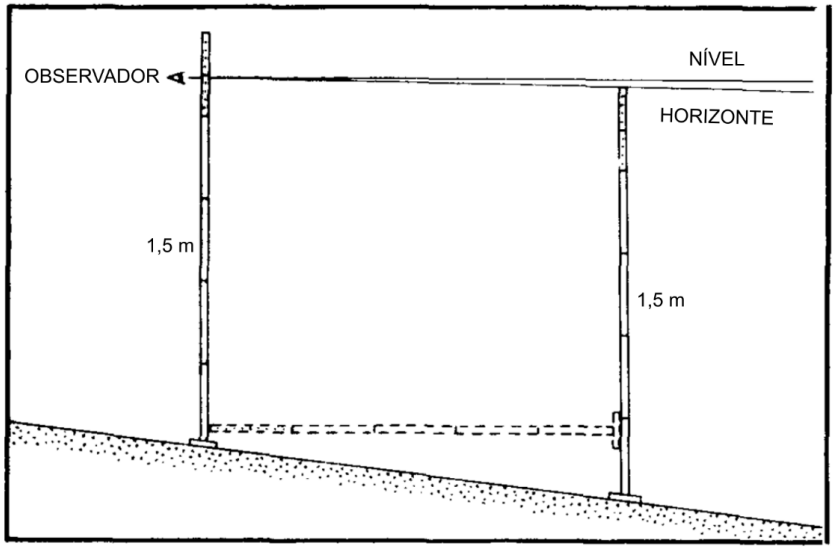
Fonte: Elaboração Própria (2025)

O monitoramento topográfico foi realizado com o método das balizas de Emery (Figura 8). Trata-se de um método manual, simples e preciso para medição de perfis topográficos de praia. Muehe, Castro e Albino (2020, p. 210) explicam o funcionamento do método:

> "[...] consiste no emprego de duas balizas, de 1,5m de comprimento cada, em que a diferença de nível entre as mesmas é determinada empregando a linha do horizonte como referencial horizontal, com as distâncias, ao longo do perfil, sendo medidas utilizando o comprimento da própria baliza."

Além disso, os autores explicitam a precisão do equipamento: ao comparar com outros (nível topográfico, Estação Total e GNSS-RTK), verificam que "os resultados são idênticos e adequados dentro das exigências de um monitoramento de perfis de praia" (Muehe, Castro e Albino, 2020, p. 214). Entretanto, há restrições quando se deseja estender o perfil para a antepraia.

Figura 8 - Esquema ilustrativo do método das balizas de Emery



Fonte: Adaptado de Emery (1961)

5.1.2 Dados de ondas

Para a aquisição de dados oceanográficos, a plataforma MyOcean Pro Viewer, do *Copernicus Marine Service* (CMS) foi utilizada. O Copernicus é a componente de observação da Terra no programa espacial da União Europeia, gerenciada pela Comissão Europeia em parceria com a Agência Espacial Europeia (*European Space Agency* - ESA), Organização Europeia para a Exploração de Satélites Meteorológicos (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* - EUMETSAT), Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* - ECMWF), agências da União Europeia e Mercator Ocean. O programa utiliza dados de satélites

e sistemas de medição terrestres, aéreos e marítimos para fornecer serviços de informação gratuitos.

Dois modelos de ondas globais foram utilizados: o *GLOBAL_REANALYSIS_WAV_001_032* (*Global Ocean Waves Reanalysis*) e *GLOBAL_ANALYSISFORECAST_WAV_001_027* (*Global Ocean Waves Analysis and Forecast*). O primeiro compreende um modelo de reanálise global de ondas descrevendo estados do mar passados posteriores a 1979 (Global Ocean Waves Reanalysis, 2025). O segundo, por sua vez, é um modelo de análise e previsão oceânica para dados posteriores a 2022 (Dalphinet *et al.*, 2023; Global Ocean Waves Analysis and Forecast, 2025). As características de ambos os modelos são descritas no Quadro 2.

Quadro 2 - Características dos modelos globais de ondas

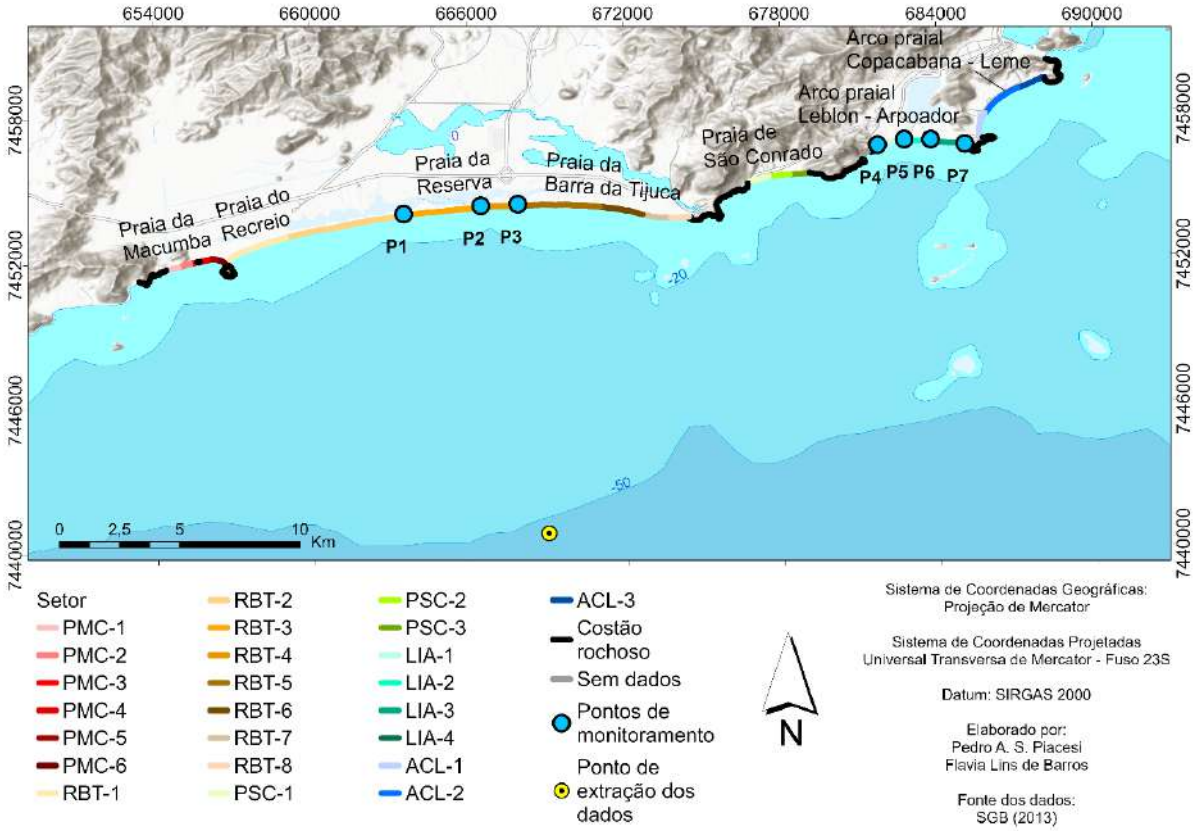
Parâmetro/ Modelo	***GLOBAL_REANALYSIS_WAV_001_032***	***GLOBAL_ANALYSISFORECAST_WAV_001_027***
Resolução espacial	Grades de 1/5 graus (0.2° × 0.2°, aproximadamente 20 km, em uma grade 1800 x 899)	Grades de 1/12 graus (0.083° × 0.083°, aproximadamente 8 km, em uma grade 4320 x 2041)
Série temporal disponível	31/12/1979 - 30/11/2024	01/11/2022 - atualmente
Resolução temporal	3 horas	3 horas, além de fornecer previsões oceanográficas para até 10 dias posteriores ao presente, sendo atualizado duas vezes por dia (00:00 UTC; 12:00 UTC)
Batimetria	Gerada com dados topográficos ETOPO2 da Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos EUA (*National Oceanic and Atmosferic Administration* - NOAA)	Gerada com dados topográficos ETOPO2 da NOAA
Modelo de ondas	*Meteo France WAve Model* (MFWAM), que calcula os parâmetros de ondas a partir da assimilação dos altímetros *European Remote Sensing Satellite* 1 e 2 (ERS-1 e ERS-2), TOPEX/POSEIDON, ERS2, *Geosat Follow-On* (GFO), Jason 2 e 3, Envisat, Saral, Cryosat-2, Sentinel-3A, Sentinel-3 e radar de abertura sintética do Sentinel-1 (*Synthetic Aperture Radar* – SAR)	*Meteo France WAve Model* (MFWAM), que calcula os parâmetros de ondas a partir da assimilação dos altímetros Jason 3, Saral, Cryosat-2, Sentinel-3 A/B, *Chinese-French Oceanic SATellite* (CFOSAT), Sentinel 6 e Sentinel 1-SAR em um intervalo de 6 horas

Fonte: Adaptado de Law-Chune (2023), Dalphinet *et al*. (2023), Global Ocean Waves Reanalysis (2025) e Global Ocean Waves Analysis and Forecast (2025)

Seu download é feito em formato NetCDF, sendo necessária a conversão para .csv para sua manipulação. Essa etapa é realizada utilizando-se linguagem de programação R, assim como todo o tratamento estatístico dos dados.

Foram utilizados três parâmetros: altura significativa de ondas (na plataforma referenciado como "altura de onda significativa da superfície do mar" - "sea_surface_wave_significant_height"); período médio das ondas (dado como "Período médio das ondas da superfície do mar a partir da densidade espectral de variância (momento inverso da frequência) - "sea_surface_wave_mean_period_from_variance_spectral_density_inverse_frequency_moment") e direção de ondas ("direção das ondas na superfície do mar" - "sea_surface_wave_from_direction"). A localização de extração dos dados pode ser visualizada na Figura 9.

Figura 9 - Mapa com localização do ponto de coleta dos dados CMS. Os dados foram extraídos nas coordenadas 23,133ºS; 43,349ºO, a aproximadamente 13,65 km da costa, próximo à isóbata de 50 m.



Fonte: Elaboração Própria (2025)

5.1.3 Dados de maré e nível do mar

Os dados de nível do mar foram fornecidos por e-mail pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), disponíveis no Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) referentes à estação maregráfica 50140 - Ilha Fiscal (latitude: 22º 53'.8 S; longitude: 43º 10'.0 W), para a série temporal de 01/01/2016 até atualmente.

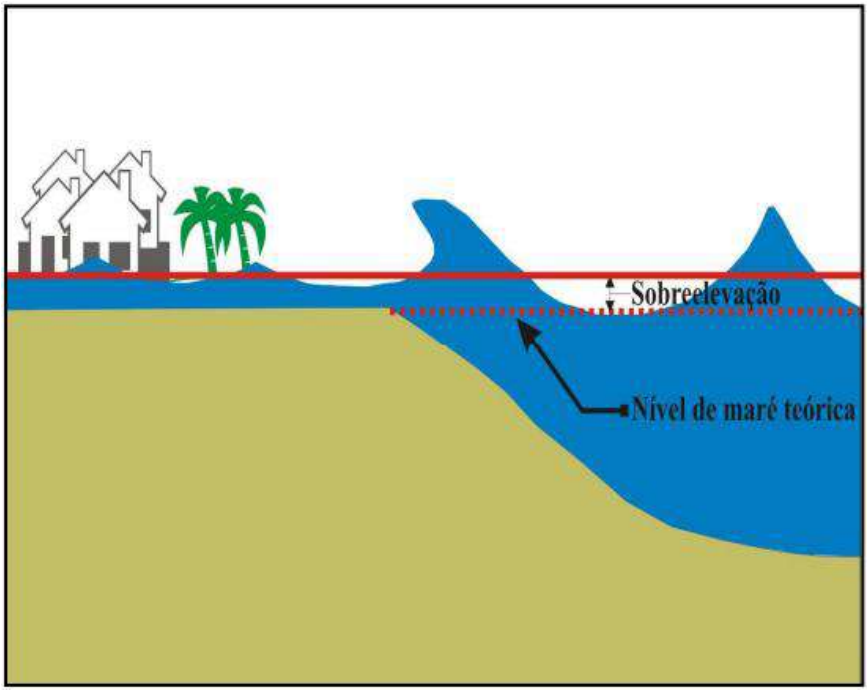
Pugh (1987) define que a sobrelevação do nível do mar de índole meteorológica (chamada de "maré meteorológica" (Paula, 2012)) é definida pela diferença entre o nível do mar registrado (também chamada de "maré real" ou "maré observada") e o nível de mar previsto (também chamado de "maré prevista" ou "maré teórica") (Paula, 2012) (Figura 10).

A informação do nível do mar poderá revelar a influência das marés no nível do mar e, também, na determinação do nível de maré meteorológica para os eventos de ressaca. Para isso, será assumida a seguinte expressão:

$$Nível\ do\ mar\ =\ Maré\ meteorológica\ +\ Nível\ do\ mar\ previsto$$

Com o conhecimento dos valores de nível do mar e de maré prevista, será possível conhecer o valor da sobrelevação do mar de origem meteorológica.

Figura 10 - Esquema representativo de uma sobrelevação do nível do mar



Fonte: Paula (2012)

5.2 Smartline

Foi utilizada a metodologia Smartline para mapeamento das características físicas das praias. A abordagem Smartline é uma metodologia desenvolvida por Sharples (2006) (patenteada de *Smartline* posteriormente[4] em Sharples, Mount e Pedersen (2009)), aplicada primeiramente para a costa da Austrália, que se constitui como um mapeamento em linhas simples que representa a classificação geomorfológica do litoral, agregando as classes utilizadas em cada variável representada, possibilitando o fácil cruzamento de dados e fácil visualização das características de cada segmento do litoral.

Assim como expõe Sharples (2009) e Lins-de-Barros (2010), este tipo de mapeamento em linha permite a criação de uma caracterização completa da costa de forma muito mais rápida em comparação a mapeamentos com polígonos. A principal inovação do mapeamento em linhas é permitir com que múltiplos atributos, independentes de estarem ou não situados precisamente na linha de costa, sejam representadas numa única linha, facilitando a visualização e a operacionalização das informações. Para isso, o autor divide a costa em segmentos segundo seu perfil transversal (do infra-maré, ou antepraia, até o pós-praia) atribuindo características para cada um deles (Lins-de-Barros, 2010).

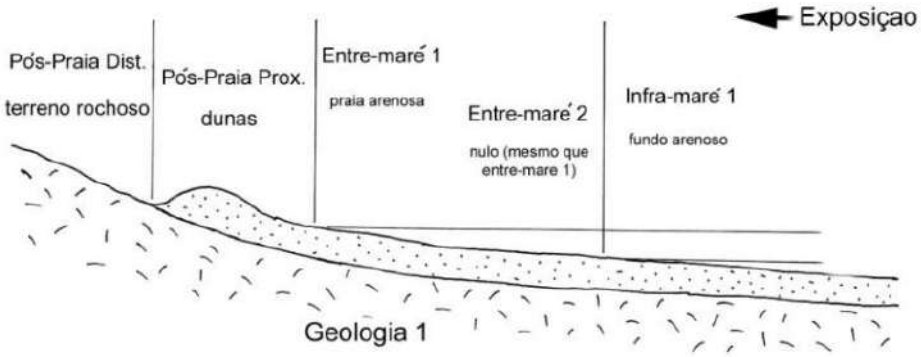
Algumas das limitações desse tipo de mapeamento, como exposto por Sharples (2009), é o de não delinear a extensão das características geomorfológicas mapeadas visto que, quando a extensão de uma característica intrínseca da linha de costa se distancia da própria localização da linha, tanto em direção ao continente quanto em direção ao mar, mais difícil se torna assumir a qual segmento de linha essa característica se refere. Lins-de-Barros (2010) identifica alguns processos costeiros como os maiores limitadores para a utilização dessa metodologia, como no caso da migração de dunas e das inundações, estes que podem abranger uma área muito grande ou muito distante da linha de costa. Portanto, esse tipo de mapeamento é mais adequado para áreas costeiras de larguras relativamente restritas; ao contrário, um mapeamento utilizando polígonos mostra-se mais vantajoso (Sharples, 2009).

Originalmente, o autor divide a costa em segmentos segundo seu perfil transversal, atribuindo as variáveis/classes de variáveis para cada um deles, como mostra a Figura 11.

---

[4] Para que se chame a atenção para o que se considerou uma “maturidade conceitual” do mapeamento em linha desenvolvido anteriormente pelo autor (Sharples, 2009).

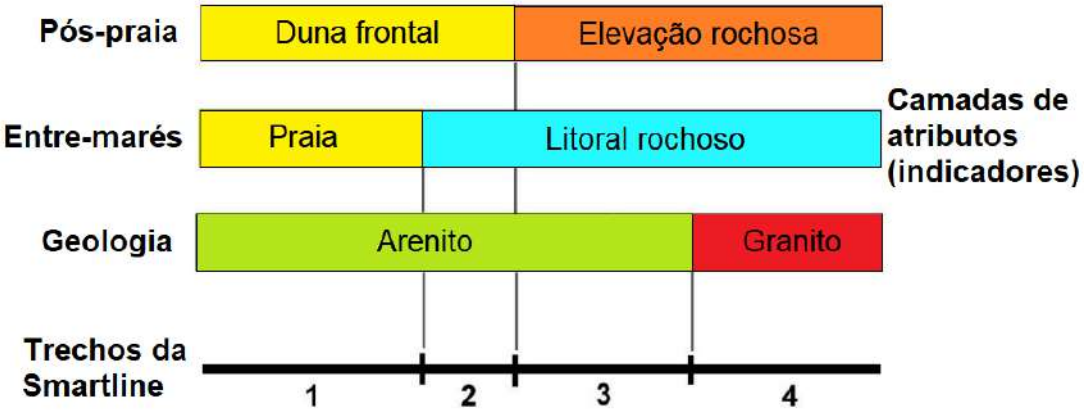
Figura 11 - Exemplo de perfil de praia com seus segmentos transversais



Fonte: Lins-de-Barros (2010, adaptado de Sharples, 2008)

A subdivisão da Smartline é feita a partir do momento que um valor da variável a qual uma Smartline está representando é alterado, ainda que preservando o detalhamento da informação representada, como representado na Figura 12 (Sharples, 2009). Para o presente estudo, esta metodologia foi adaptada para, ao invés de realizar linhas de acordo com o perfil transversal, mapear cada variável do IVP individualmente.

Figura 12 – Ilustração da divisão da Smartline



Fonte: Lins de Barros (2010, adaptado de Sharples, 2009)

5.3 Índice de Vulnerabilidade de Praia (IVP)

Nesse estudo, “vulnerabilidade costeira” é definida como a relação entre a exposição, suscetibilidade e capacidade de adaptação de um sistema costeiro — tanto fisicamente, socialmente ou ecologicamente — a agentes forçantes naturais, seguindo Lins-de-Barros, Paula

e Sousa (2020), Adger *et al*. (2004) e McFadden (2007). No presente estudo, a forçante natural considerada é a ressaca do mar. Então, o IVP proposto neste estudo foi desenvolvido com o propósito de combinar as componentes “exposição” e “capacidade adaptativa” do perfil praial. Assim, o índice é composto por dois subíndices: “Exposição” (Ex) e “Capacidade Adaptativa” (CA).

Os componentes Ex e CA refletem as condições do sistema físico das praias que determinam a probabilidade de impactos ou efeitos negativos durante eventos de ressaca. O componente Ex é composto de variáveis que indicam a susceptibilidade de um dado segmento costeiro à incidência de ondas e os impactos resultantes. O subíndice CA, por outro lado, representa a capacidade das praias de resistirem e se recuperarem após danos de eventos de ressaca. Os subíndices, bem como o índice composto, foram desenvolvidos por meio do mapeamento e agrupamento de variáveis, definindo faixas de valores para suas classes e aplicando fórmulas de pontuação e padronização baseadas na literatura existente (Gornitz, 1991; Ramieri *et al.*, 2011; Peña-Alonso *et al*., 2017, Dong *et al*., 2018, Carvalho & Guerra, 2020).

Na literatura, diversos são os índices de vulnerabilidade costeiros propostos por outros autores. Por exemplo, Alexandrakis & Poulos (2014) avaliam a vulnerabilidade à erosão exclusivamente das praias, considerando os processos dinâmicos hídricos e sedimentares predominantes que contribuem para a evolução das praias. Andrade, Sousa e Siegle (2019) propõem um índice de vulnerabilidade de praias baseado na exposição a ondas, elevação do terreno, além da energia, *runup* e ângulo de incidência das ondas. Peña-Alonso *et al*. (2017) avaliam a vulnerabilidade geomorfológica de praias baseado nos aspectos “fatores de exposição” (pressão humana e incidência marinha), “susceptibilidade” e “resiliência geomorfológicas”.

Para o presente trabalho, a escolha das variáveis foi baseada nos artigos supracitados, com as devidas adaptações à realidade da área de estudo e à disponibilidade de dados. A capacidade de recuperação, ou seja, a resiliência física das praias, não foi inserida na formulação do índice de vulnerabilidade aqui apresentado, pois trata-se de uma condição posterior ao impacto. Ou seja, a capacidade da praia de se recuperar, apesar de ser um processo fundamental para avaliação da tendência de erosão, estabilidade, recuo da linha de costa ou variabilidade, não afeta o potencial de impactos de uma ressaca, objetivo da presente análise. Para isso, foi aplicado o IRC (Dong *et al*., 2018) e analisados o tempo de recuperação da praia após uma ressaca, que serão apresentados posteriormente.

5.3.1 IVP e subíndices

As variáveis que compõem os subíndices Ex e CA estão listadas no Quadro 3, que também fornece suas fontes de dados e as pontuações recebidas por cada classe. Para o subíndice Ex foram consideradas as seguintes variáveis: (a) exposição da praia à incidência de ondas; (b) potencial de colisão de ondas; e (c) declividade da face de praia.

A exposição das praias à incidência das ondas (a) diz respeito ao grau de exposição das praias às ondas de tempestade e à presença ou ausência de barreiras naturais, como ilhas ou costões rochosos. O potencial de colisão das ondas (b) foi definido com base na ocorrência do regime "Colisão" do modelo EIT (Sallenger, 2000). A declividade da face de praia (c), derivada de perfis topográficos obtidos *in situ*, determina o grau de dissipação da energia das ondas: perfis mais íngremes tendem a reduzir a dissipação de energia e permitem um maior alcance das ondas (subida) no perfil da praia (Sallenger, 2000). Consequentemente, neste estudo, perfis mais íngremes foram associados a níveis mais elevados de vulnerabilidade.

O subíndice CA, por sua vez, incluiu as seguintes variáveis: (d) granulometria; (e) elevação do pós-praia; (f) tipo de feição do pós-praia; (g) declividade da largura protetora da praia; e (h) largura média da praia.

A granulometria (d) é amplamente reconhecida na literatura como influenciador do transporte de sedimentos e da resistência à erosão. Uma percentagem mais elevada de sedimentos finos reduz a resistência, uma vez que os sedimentos de quartzo mais finos tendem a ser mais leves e a mover-se mais facilmente (Komar & Miller, 1973).

As variáveis (e) e (h) fornecem informações sobre a resistência e o potencial de recuperação de uma praia. A elevação da costa (e) atua como uma barreira natural, enquanto a largura (h) indica a capacidade de armazenamento de sedimentos. O armazenamento de sedimentos é importante porque, durante tempestades, o volume de areia dentro da largura protetora é normalmente deslocado em direção ao mar, para os bancos de areia. Com o tempo, estes sedimentos retornam gradualmente à praia principal, facilitando a recuperação natural (Dong *et al.*, 2018). Essa dinâmica é observada em praias do estado do Rio de Janeiro (Muehe, 2011; Filho *et al*., 2020).

A largura protetora[5] (g) é definida como a distância horizontal que inclui a largura da duna, a inclinação da duna em direção ao mar e a largura da berma (Dong *et al.*, 2018) e é calculada como a distância do limite terrestre até a linha de costa. Portanto, a variável (g) reflete a resistência (ou a falta dela) da praia à colisão e inundação das ondas. Um maior gradiente representa um maior obstáculo à invasão das ondas no perfil da praia.

O tipo de feição do pós-praia (f) avalia as características do pós-praia e o seu papel na dissipação da energia das ondas. A substituição de barreiras naturais por estruturas artificiais, ou a degradação da vegetação dunar, aumenta a exposição e a vulnerabilidade.

[5] Essa também é uma das variáveis utilizadas no IRC e será novamente abordada adiante, com mais detalhes, nas seções 5.3.2 e 5.4 desta dissertação.

Quadro 3 - Variáveis do IVP, fontes de dados, classes e pontuações atribuídas

Subíndice	**Variável**	**Classe**	**Pontuação atribuída**	**Fonte do dado**
Ex	a. Exposição à incidência de ondas	Abrigada	1	Imagem de satélite
		Semi-exposta	3	
		Exposta	5	
	b. Potencial de colisão de ondas	Muito baixo	1	Determinado a partir da EIT (Sallenger, 2000) utilizando dados obtidos em trabalhos de campo
		Baixo	2	
		Médio	3	
		Alto	4	
		Muito alto	5	
	c. Declividade da face de praia (%)	[0; 3,5]	1	Dados obtidos em trabalhos de campo
		(3,5; 7]	2	
		(7; 10,5]	3	
		(10,5; 14]	4	
		(14; ∞)	5	
CA	d. Granulometria	Muito grosso	1	Resultado de análises por peneiramento e dados secundários (Pena, 2017, Carvalho *et al.*, 2021, Silva & Lins-de-Barros, 2018)
		Grosso	2	
		Médio	3	
		Fino	4	
		Muito fino	5	
	e. Elevação do pós-praia (m)	(6, ∞)	1	Levantamento por perfis topográficos realizados pelo Laboratório de Geografia Marinha da UFRJ e dados secundários (Carvalho *et al*., 2021, Silva & Lins-de-Barros, 2018)
		(5, 6]	2	
		(4, 5]	3	
		(3, 4]	4	
		[0, 3]	5	
	f. Feição do pós-praia	Falésia	1	Imagem de satélite
		Duna frontal vegetada	2	
		Duna frontal degradada	3	
		Corpo d'água	4	
		Área urbana	5	
	g. Declividade da largura protetora (%)	(12; ∞)	1	Levantamento por perfis topográficos realizados pelo Laboratório de Geografia Marinha da UFRJ e dados secundários (Carvalho *et al*., 2021, Silva & Lins-de-Barros, 2018)
		(8; 12]	2	
		(4; 8]	3	
		(2; 4]	4	
		[0; 2]	5	
	h. Largura da praia (m)	(100, ∞)	1	Levantamento por perfis topográficos realizados pelo Laboratório de Geografia Marinha da UFRJ e dados secundários (Carvalho *et al*., 2021, Silva & Lins-de-Barros, 2018)
		(75; 100]	2	
		(50; 75]	3	
		(25; 50]	4	
		[0; 25]	5	

Fonte: Elaboração Própria (2024)

A cada classe foi atribuído um valor de 1 a 5 com base na sua contribuição para o nível geral de vulnerabilidade. O índice final foi calculado usando a Equação 7, a Equação 8 e a Equação 9:

$$Ex = (a + b + c) / VmaxEx; \quad (7)$$

Equação 7 - Cálculo do subíndice Ex

$$CA = (d + e + f + g + h) / VmaxCA, \quad (8)$$

Equação 8 - Cálculo do subíndice CA

$$IVP = CEx + CCA \quad (9)$$

Equação 9 - Cálculo do IVP

O valor de Vmax corresponde à soma máxima possível das pontuações, ou seja, quando todas as variáveis recebem a pontuação máxima (5). Dessa forma, VmaxEx é igual a 15 (referente às três variáveis do subíndice Ex) e VmaxCA é igual a 25 (referente às cinco variáveis do subíndice CA).

Os subíndices Ex e CA foram normalizados para assumir valores entre 0,2 (mínimo possível, quando todas as variáveis recebem pontuação 1) e 1,0 (máximo possível, quando todas recebem pontuação 5) (Quadro 4 e Quadro 5). A amplitude entre esses extremos é de 0,8, que foi dividida em cinco classes de intervalo regular, com amplitude de 0,16 cada. As classes representam os níveis de vulnerabilidade: “Muito baixa”, “Baixa”, “Média”, “Alta” e “Muito alta”.

Cada classe foi associada a uma pontuação ordinal de 1 a 5, que reflete sua contribuição para o grau de vulnerabilidade. Para o subíndice Ex, valores mais altos indicam maior contribuição para o grau de vulnerabilidade, e a pontuação ordinal varia de 1 (Muito baixa) a 5 (Muito alta). Já para o subíndice CA, a lógica é inversa: quanto maior a capacidade adaptativa, menor a vulnerabilidade. Assim, sua pontuação ordinal varia de 1 (Muito alta) a 5 (Muito baixa).

Essas pontuações ordinais foram denominadas CEx e CCA para os subíndices Ex e CA, respectivamente. O IVP é então obtido pela soma de CEx e CCA (Equação 9), variando de 2

(vulnerabilidade Muito baixa) a 10 (vulnerabilidade Muito alta). As faixas correspondentes a cada nível de vulnerabilidade estão detalhadas no Quadro 4, no Quadro 5 e no Quadro 6.

Quadro 4 - Intervalos de valores e classes correspondentes para os subíndice Ex

Pontuação Ex	**Classe**	**Classificação (CEx)**
[0,2; 0,36]	Muito baixa	1
(0,36; 0,52]	Baixa	2
(0,52; 0,68]	Média	3
(0,68; 0,84]	Alta	4
(0,84; 1]	Muito alta	5

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Quadro 5 - Intervalos de valores e classes correspondentes para os subíndice CA

Pontuação AC	**Classe**	**Classificação (CCA)**
[0,2; 0,36]	Muito alta	1
(0,36; 0,52]	Alta	2
(0,52; 0,68]	Média	3
(0,68; 0,84]	Baixa	4
(0,84; 1]	Muito baixa	5

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Quadro 6 - Intervalos de valores e classes correspondentes para o IVP

Classificação total	**Classe**
2	Muito baixa
3	Muito baixa
4	Baixa
5	Baixa-Média
6	Média
7	Média-Alta
8	Alta
9	Muito alta
10	Muito alta

Fonte: Elaboração Própria (2025)

5.3.2 Variáveis do IVP

Juntamente à definição das fórmulas para determinação do índice de vulnerabilidade, também foram definidas as classes consideradas em cada variável. Cada uma foi descrita nas seções seguintes.

a) Exposição a ondas

A exposição é entendida como a orientação geométrica do sistema praia-antepraia e da exposição às condições distintas de clima de ondas. Essa variável depende da definição da posição relativa das praias, da direção de propagação das ondas incidentes, da proteção promovida por ilhas, lajes e promontórios rochosos e do grau de embaiamento de cada segmento (Bulhões, 2010). Com isso, destaca-se a importância das modelagens de refração e difração de ondas para a determinação do grau de exposição dos segmentos praiais a fim de visualizar o grau de atenuação ou magnificação da energia das ondas provocadas pelos obstáculos que as ondas enfrentam antes de chegarem à linha de costa, como realizado por Lins-de-Barros (2010) e por Bulhões (2011).

Para a definição das classes, deve-se atestar a influência da orientação da linha de costa para o grau de exposição e determinar a partir de quantos graus uma linha de costa é considerada exposta, recebendo altas energias de ondas, ou não. Em vista disso, entende-se que há a necessidade de definição de parâmetros quantitativos para a medição dessa variável e medição da taxa de transporte sedimentar transversal e longitudinal a depender do grau de incidência das ondas.

Cabe lembrar, entretanto, que essa é uma variável que está diretamente relacionado à direção de incidência das ondas, onde um trecho pode ser classificado como exposto em relação a uma direção de ondas, enquanto em outra, o mesmo trecho pode ser considerado semi-abrigado ou mesmo abrigado. Komar (1998), Longuet-Higgins (1970) e Andrade, Sousa e Siegle (2019) consideram que a capacidade máxima de transporte sedimentar longitudinal é atingida quando as ondas chegam à praia com uma inclinação de 45º em relação à linha de costa, enquanto há resultante nula de transporte quando as ondas incidem de uma direção a 90º da linha de costa.

Considerando que, para o estado do Rio de Janeiro, em ressacas, há uma concentração de ondas provenientes do quadrante sul, principalmente de SSO, e que sua linha de costa possui

orientação quase retilínea leste-oeste, é possível afirmar que suas praias possuem, em geral, uma vulnerabilidade média à perda de sedimentos devido ao transporte sedimentar longitudinal.

Em razão disso, para o presente trabalho, foram considerados os eventos de ressaca com essa direção de incidência para a classificação da orla quanto à exposição. A partir disso, foi possível classificar cada trecho da Smartline de acordo com a classificação em três graus de exposição: abrigado, semi-exposto e exposto. O Quadro 7 traz a descrição e justificativa de cada classe da variável.

Quadro 7 - Classes e descrição/justificativa da variável "Exposição a ondas"

Classe	**Descrição**	**Contribuição ao grau de vulnerabilidade**	**Pontuação**
Abrigado	Referem-se aos trechos de enseada, cercadas por promontórios rochosos em suas extremidades, uma vez que são ambientes protegidos de ondas de tempestade e de marulhos altos (Bulhões, 2011).	Muito baixa	1
Semi-exposto	Porções da linha de costa tipicamente de oceano aberto, retilínea, porém com obstáculos influentes em sua antepraia, capazes de atenuar a energia de ondas incidentes; trechos com orientação que oferecem proteção ao arco praial da incidência de ondas energéticas de ressacas.	Média	2
Exposto	Porções da linha de costa livre de obstáculos na antepraia, o que permite às ondas chegarem ao litoral com maior energia.	Muito alta	3

Fonte: Elaboração Própria (2025)

b) Potencial de colisão de ondas

Aqui, procura-se identificar as ondas mais destrutivas para a área de estudo, visto que a avaliação da altura de ondas em eventos de ressaca fornece informação sobre a intensidade das ondas nas praias (Peña-Alonso *et al.*, 2017).

Para essa variável, as classes foram definidas a partir do risco de colisão de ondas na duna frontal, segundo definido pela EIT (Sallenger, 2000): quanto menor a altura de ondas necessárias para ocorrência de colisão de ondas, maior será a vulnerabilidade. A metodologia EIT foi utilizada para definição dos valores de vulnerabilidade de alturas de ondas.

Visto que a EIT requer a inserção de valores de Tp e de nível do mar, utilizou-se um valor de 10 s para o primeiro e 0,75 m para o segundo, condições médias e medianas, respectivamente, de ressaca para o estado do Rio de Janeiro segundo Lima, Lins-de-Barros e Cirano (2021).

Para sua definição, a altura significativa variou em função da ocorrência de regime Colisão na EIT: a altura que marcava a transição da fase Espraiamento para Colisão foi utilizada para devolver o valor de *runup* máximo, ou seja, quando a relação R_{HIGH}/D_{HIGH} passa a ser maior ou igual que D_{LOW}/D_{HIGH}.

Dessa forma, quanto menor a altura de ondas necessária para que ocorra colisão no perfil, maior será a pontuação adquirida nessa variável (Quadro 8).

Quadro 8 - Intervalos, classes e suas respectivas pontuações para a variável "Potencial de colisão de ondas"

Intervalo (m)	**Contribuição ao grau de vulnerabilidade**	**Pontuação**
(4, ∞)	Muito baixo	1
(3, 4]	Baixo	2
(1,25; 3]	Médio	3
(0,5; 1,25]	Alto	4
[0; 0,5]	Muito alto	5

Fonte: Elaboração Própria (2024)

c) Declividade da face de praia

A face de praia é uma rampa onde ocorre o espraiamento e refluxo das ondas e é o setor do perfil praial que uma onda percorre após se quebrar. A depender do estado morfodinâmico, inclusive, é onde a onda se quebra.

Logo, a ideia geral para a inclusão desta variável no índice é de que a declividade está relacionada com o risco de inundação, devido ao aumento do nível do mar e à maré meteorológica. Essa é uma variável interessante e complexa para definir-se as classes e suas pontuações. Sabe-se que em um perfil mais plano há maior potencial para inundação (Kumar

et al. 2010), e de erosão à retaguarda, apesar de dissipar energia de ondas devido sua extensa zona de surfe (Bird, 2008).

Entretanto, em praias mais íngremes, típicas do estado refletivo, a energia das ondas é parcialmente refletida, de modo que ondas de maior energia tendem a arrebentar com maior intensidade, ampliando seu potencial erosivo (Bird, 2008).

Segundo a EIT, a inserção de valores maiores de declividade na equação traduz em um maior valor de *runup* e, logo, um favorecimento à ocorrência de transposição de ondas. Dessa forma, em vista a solucionar esta dicotomia, para o presente estudo considerou-se que maiores declividades do perfil praial possuem maior vulnerabilidade às ondas de ressaca, em vista da maior facilidade para a ocorrência de transposição de ondas (Quadro 9).

As faixas de valores entre classes foram definidas em intervalos numéricos regulares de 3,5%, utilizando a distribuição percentual para a definição das classes. O uso de porcentagens como critério de classificação também foi empregado por Pantusa *et al*. (2018) e De Serio *et al*. (2018) em estudos realizados na costa da Itália.

Quadro 9 - Intervalos, classes e pontuações para a variável “Declividade da face de praia”

Intervalo (%)	**Contribuição ao grau de vulnerabilidade**	**Pontuação**
[0; 3,5]	Muito baixa	1
(3,5; 7]	Baixa	2
(7; 10,5]	Média	3
(10,5; 14]	Alta	4
(14; ∞)	Muito alta	5

Fonte: Elaboração Própria (2025)

d) Granulometria

A classificação granulométrica de Wentworth (1922) foi utilizada (Quadro 10), onde os grãos de areia podem ser classificados, de acordo com seu tamanho, em areia muito grossa a areia muito fina. De acordo com Komar & Miller (1973), há uma maior facilidade de movimentação dos sedimentos quartzosos mais finos, visto que estes tendem a ser mais leves.

Dessa forma, a presença de sedimentos mais finos contribui para uma maior vulnerabilidade do trecho da praia, uma vez que são retirados mais facilmente.

Quadro 10 - Classificação da fração areia da escala de Wentworth (1922)

Classe	**Tamanho do sedimento (mm)**	**Contribuição ao grau de vulnerabilidade**	**Pontuação**
Muito grossa	2–1	Muito baixa	1
Grossa	1–0,5	Baixa	2
Média	0,5–0,25	Média	3
Fina	0,25–0,125	Alta	4
Muito fina	0,125–0,063	Muito alta	5

Fonte: Elaboração Própria (2025)

e) Elevação do pós-praia

Esta é uma variável que consta em trabalhos pioneiros, como Gornitz (1991). Áreas mais rebaixadas estão sujeitas a ataques destrutivos de ondas de ressacas, transposição, inundações, dentre outros (Bush *et al.*, 1999). No entanto, apesar de sua enorme importância, é muitas vezes mal definido por falta de dados locais ou por não se ter conhecimento das elevações consideradas mais vulneráveis. Como exposto por Bush *et al.* (1999), as elevações mais críticas irão variar para cada localidade dependendo da experiência com eventos pretéritos e níveis de maré meteorológica.

As classes de valores foram definidas com base em Sousa, Siegle e Tessler (2013), em índice de vulnerabilidade aplicado na praia de Massaguaçú, na costa norte do estado de São Paulo (Quadro 11).

Quadro 11 - Classes de intervalo e justificativas para a variável “Altitude do pós-praia”

Intervalo (m)	Contribuição ao grau de vulnerabilidade	Pontuação
(6, ∞)	Muito baixa	1
(5, 6]	Baixa	2
(4, 5]	Média	3
(3, 4]	Alta	4
[0, 3]	Muito alta	5

Fonte: Elaboração Própria (2025)

f) Feição do pós-praia

Aqui, relacionou-se a altura e tipo de cada feição com sua resistência à transposição e erosão e com o estoque de sedimentos. A presença de dunas no pós-praia é um grande aliado para a manutenção do perfil praial, uma vez que serve tanto como uma barreira natural contra a ocorrência de transposição de ondas, quanto para o suprimento de sedimentos após perda. Por outro lado, a presença de construções antrópicas no pós-praia — uma característica recorrente em praias urbanas ao redor do mundo — interfere na dinâmica natural da praia, dificultando sua capacidade de responder à perda de sedimentos causada pelo impacto de ondas de tempestade (Muehe, 2018).

A partir disso, foram definidas cinco classes para a avaliação da vulnerabilidade a partir dessa variável: Falésia; Duna frontal vegetada; Duna frontal não vegetada; Corpo d’água; Área urbana. Suas descrições são dadas no Quadro 12.

Quadro 12 - Classes e suas respectivas descrições da variável “Feições do pós-praia”

Classe	**Descrição**	**Contribuição ao grau de vulnerabilidade**	**Pontuação**
Falésia	Fornece suprimento de sedimentos e proteção à inundação devido às grandes alturas dessa feição, que podem chegar a dezenas de metros; alimentação arenosa das praias adjacentes em caso de alta energia das ondas (Suguio *et al*., 2008).	Muito baixa	1
Duna frontal vegetada	O crescimento da vegetação pode contribuir para a fixação destas, impedindo que as dunas sejam impulsionadas das praias para o interior pelos fortes ventos (Lins-de-Barros, 2010).	Baixa	2
Duna frontal degradada	Representam importante estoque de sedimentos, além de ser uma barreira elevada, dificultando a transposição de ondas. Apesar disso, estão degradadas e/ou não possui vegetação, o que pode facilitar sua migração.	Média	3
Corpo d’água	Corpos d’água localizadas no pós-praia, à retaguarda da praia, aumentam a vulnerabilidade da praia à ressaca no sentido de aumentar a susceptibilidade à inundação em vista do aumento do nível do corpo d’água.	Alta	4
Área urbana	Presença de construções antrópicas no pós-praia interfere na movimentação natural da praia em resposta à perda de sedimentos visto que impede o suprimento de sedimentos do pós-praia para a praia e vice-versa (Muehe, 2018).	Muito alta	5

Fonte: Elaboração Própria (2025)

g) Declividade da largura protetora

A largura protetora é obtida pela distância entre o limite terrestre da duna frontal até a linha de costa (Dong *et al*., 2018). Ao contrário da declividade da face de praia, as maiores inclinações foram consideradas de menor grau de vulnerabilidade. Isso se deve ao fato de que declividades mais acentuadas contribuem para reduzir o risco de transposição e inundação do perfil. De forma geral, uma onda que ultrapasse a antepraia e a face de praia já terá perdido grande parte de sua energia, tornando-se menos propensa a superar um perfil com inclinação íngreme ao longo de toda a sua extensão.

Os intervalos de valores foram definidos com base em Pantusa *et al*. (2018), também em porcentagem, em índice de vulnerabilidade costeira aplicado na região da Apúlia, sul da Itália (Quadro 13).

Quadro 13 - Classes de intervalo e pontuações para a variável "Declividade da largura protetora"

Intervalo (%)	**Contribuição ao grau de vulnerabilidade**	**Pontuação**
(12; ∞)	Muito baixa	1
(8; 12]	Baixa	2
(4; 8]	Média	3
(2; 4]	Alta	4
[0; 2]	Muito alta	5

Fonte: Elaboração Própria (2025)

h) Largura da praia

A disponibilidade de volume de areia na porção seca da praia antes de um evento disruptivo é peça chave na recuperação da praia (Dong *et al*., 2018). A largura, indicadora da capacidade de armazenamento de sedimento do perfil, é crucial na avaliação da vulnerabilidade uma vez que, durante ressacas, a areia é transportada em direção ao mar (Dong *et al. op. cit.*) e que, em um cenário de sobrelevação do nível do mar, típico de ressacas, o alcance de ondas no perfil é maior. Uma maior largura poderá fornecer ao perfil uma maior proteção devido ao seu maior poder de dissipação da energia de ondas. Baseado em Pantusa *et al*. (2018), as classes de valores foram definidas em intervalos regulares de 25 m (Quadro 14).

Quadro 14 - Classes de intervalo e pontuações para a variável “Largura da praia”

Intervalo (m)	Contribuição ao grau de vulnerabilidade	Pontuação
(100, ∞)	Muito baixa	1
(75; 100]	Baixa	2
(50; 75]	Média	3
(25; 50]	Alta	4
[0; 25]	Muito alta	5

Fonte: Elaboração Própria (2024)

5.4 Índice de Resiliência Costeira (IRC)

Foi aplicado na área de estudo o IRC, ferramenta utilizada pelo Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos (*United States Army Corps of Engineers* - USACE) e estabelecido por Dong *et al*. (2018) para quantificar a capacidade da praia de se recuperar de eventos disruptivos (Patsch *et al*., 2021). O IRC integra parâmetros do sistema praial, além de agentes disruptivos, como as ondas e a maré meteorológica, para calcular a soma de cinco fatores adimensionais (a, b, c, d, e) que incorporam parâmetros da praia, duna e ondas (Figura 13). As quatro escalas (PE_0, PW_0, CF_0, WR_0) são utilizadas para não dimensionalizar os fatores e controlar a contribuição de cada fator para o IRC, que é calculado aplicando a Equação 10. O Quadro 15 apresenta as variáveis utilizadas no modelo, acompanhadas de suas respectivas descrições, retiradas de Dong *et al*. (2018).

$$a = \frac{PE}{PE_0}; b = \frac{PE * PW * (1 - s)}{PE_0 * PW_0}; c = \frac{PW - MR}{PW_0};$$
$$d = \frac{DE - (MS + MHW)}{CF_0}; e = \frac{WR_0}{WR} \qquad (10)$$
$$IRC = a + b + c + d + e$$

Equação 10 - Determinação do IRC e dos fatores adimensionais

O cálculo do *runup* (Equação 11) é realizado com o modelo empírico proposto por Stockdon (2006), que utiliza a inclinação média da praia ($ß_f$) (calculada da posição do pé da

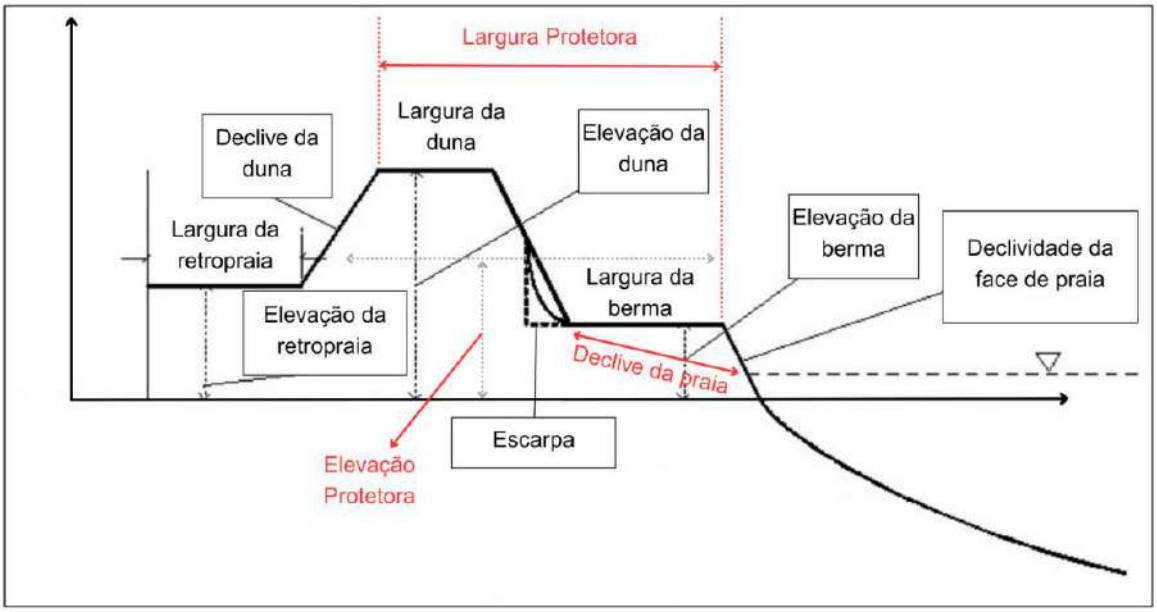
duna até a linha de costa), a altura da onda em águas profundas (H_0) e o comprimento de onda (L_0) para prever a altura do *runup* de onda na face da praia. A inclinação média da praia no perfil praial é medida desde a base da duna até a linha de costa.

$$WR = 1{,}1\{0{,}35\beta_f(H_0L_0)^{\frac{1}{2}} + \frac{\left[H_0L_0\left(0{,}563\beta_f{}^2 + 0{,}004\right)\right]^{\frac{1}{2}}}{2}\} \qquad (11)$$

Equação 11 - Modelo para determinação do *runup* (Stockdon, 2006) utilizado na metodologia

Os dados utilizados foram obtidos nas campanhas de trabalhos de campo e posteriormente processados para entrada no modelo. Assim como Dong *et al*. (2018), a classificação do IRC foi categorizada em três classes: Baixo (IRC < 1,5), Médio (1,5 < IRC < 2) e Alto (IRC > 2).

Figura 13 - Parâmetros praiais em um perfil típico



Fonte: Adaptado e traduzido de Rogers, Kristine e Gravens (2009) e Dong *et al*. (2018)

Quadro 15 - Siglas, nomes e descrições das variáveis utilizadas no IRC

Sigla	**Nome**	**Descrição**
PW	Largura Protetora	Distância horizontal que inclui a largura da duna, a inclinação da duna em direção ao mar e a largura da berma. Calculada como a distância do limite terrestre da duna frontal até a linha de costa.
PE	Elevação Protetora	Elevação média acima do nível médio da maré alta (MHW) no perfil. Em outras palavras, representa a elevação média da porção emersa do perfil, dentro da porção do PW.
s	Percentual de sedimentos finos	Percentual de sedimentos finos na praia. Afeta sua resistência e capacidade adaptativa.
DE	Elevação da Crista da Duna Frontal	Ponto mais alto da duna frontal dentro da porção do PW. O ponto mais alto é considerado o limite terrestre quando os perfis não possuem uma duna.
MR	Retração Máxima da linha de costa	Retração máxima horizontal do perfil induzida por tempestades.
MS	Sobrelevação do mar de origem meteorológica	Máxima sobrelevação do mar de origem meteorológica, ou seja, é o maior valor de maré meteorológica causado pela tempestade.
WR	*Runup* de ondas	Valor de *runup*, dado pela Equação 11.
MHW	Nível Médio da Maré Alta	Nível médio da maré alta. Usada como referência para calcular a elevação protetora.
CF	Altura Livre da Crista da Duna Frontal	Diferença de elevação entre o nível da água durante tempestades (soma do MS com o nível da maré durante tempestades) e a elevação da crista da duna frontal (DE).
PE_0	PE Médio	Elevação Protetora Média, sempre constante.
PW_0	PW Médio	Largura Protetora Média, sempre constante.
CF_0	CF Média	Altura Livre da Crista da Duna Frontal, sempre constante
WR_0	WR Médio	*Runup* médio, sempre constante.
a	Fator PE	Indica a elevação média do perfil.
b	Fator VD	Indica a densidade de volume do perfil.
c	Fator PW	Indica a largura protetora real durante a tempestade.
d	Fator CF	Indica a vulnerabilidade à sobrelevação do mar de origem meteorológica e à transposição de ondas.
e	Fator WR	Indica a vulnerabilidade ao *runup* e à transposição de ondas.

Fonte: Adaptado de Dong *et al.* (2018)

6 RESULTADOS

Os resultados estão organizados de acordo com a abordagem metodológica adotada neste trabalho. Inicialmente, são apresentados os resultados referentes ao IVP, com os subíndices Ex e CA e suas respectivas variáveis integrantes em diferentes seções. Na sequência, são expostos os resultados da avaliação de resiliência costeira, contemplando a análise da variabilidade dos perfis praiais e a aplicação do IRC. Por fim, são apresentados os resultados do estudo de caso da ressaca ocorrida em 13 de agosto de 2024, assim como os impactos decorrentes do evento.

6.1 Índice de Vulnerabilidade de Praias (IVP)

6.1.1 Subíndice Exposição (Ex)

a) Exposição à incidência de ondas

As praias da cidade do Rio de Janeiro apresentam-se, de modo geral, muito expostas às fortes ondulações do quadrante sul (68,15% da orla) (Figura 14) devido à orientação leste-oeste da linha de costa, embora a direção de ondas e algumas ilhas e costões tornem algumas praias mais ou menos expostas em determinadas condições.

Três segmentos divergem da classificação geral: RBT-3, RBT-8 (localização na Figura 1) e todo o arco de praias Copacabana-Leme, que juntos representam 31,85% da área de estudo. No RBT-3, os *beachrocks* na antepraia fornecem proteção adicional, reduzindo a exposição às ondas. No RBT-8, as Ilhas Tijucas funcionam como barreira natural. O arco Copacabana-Leme, com orientação SO-NE, oferece maior proteção contra ondas de alta energia originadas de SO.

b) Potencial de colisão de ondas

A área de estudo (Figura 14), no geral, apresenta potencial médio (52,54%) para ocorrência de colisão de ondas, seguido dos graus baixo (23,03%), muito baixo (20,28%) e alto (4,15%). Destacam-se os setores RBT-1, RBT-5 e RBT-7, que apresentam potencial muito baixo. Por outro lado, o único setor que apresentou potencial alto foi o LIA-1. Estes resultados refletem a maior ou menor declividade da face da praia que interferem no *runup* e na relação

deste alcance das ondas com a largura da praia e altitude da base da duna, quando existente, e do pós-praia.

c) Declividade da face de praia

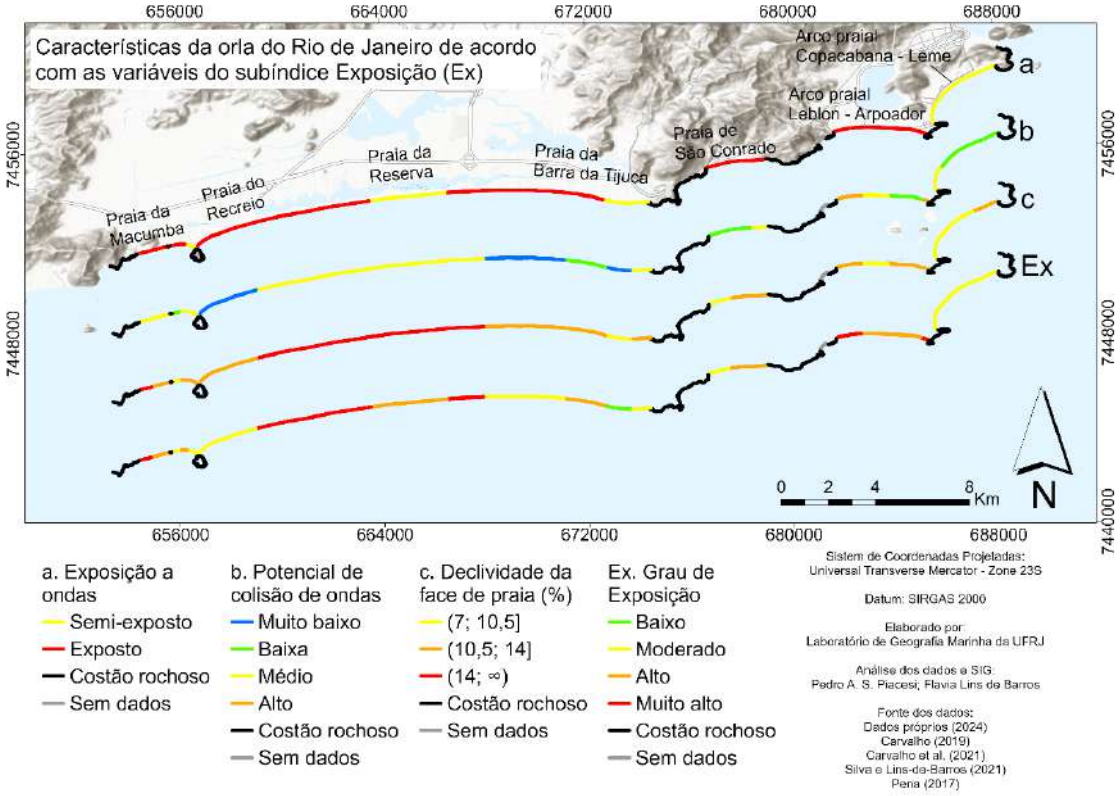
Uma maior declividade favorece um maior alcance das ondas (*runup*) no perfil praial (Sallenger, 2000). Portanto, nesse estudo, atribuiu-se às maiores declividades uma maior contribuição ao aumento do grau de vulnerabilidade. Na área de estudo (Figura 14), as declividades variam entre média (7% a 10,5%, representando 17,98% da área total), alta (10,5% a 14%, 44,85%) e muito altas (acima de 14%, 37,16%). As menores declividades podem ser encontradas nos setores ACL-1, RBT-7 e ACL-2, respectivamente; as maiores podem ser encontradas em PMC-1, RBT-3 e RBT-2, respectivamente.

- Síntese dos resultados de Ex

A síntese de todos as variáveis revela que a área de estudo apresenta, predominantemente, grau Médio de exposição (35,69%) para impactos de ressacas, seguido dos graus Alto (33,19%), Muito alto (27,85%) e Baixo (3,27%). Nenhum trecho apresentou grau de exposição Muito baixo (Figuras Figura 14 e Figura 15).

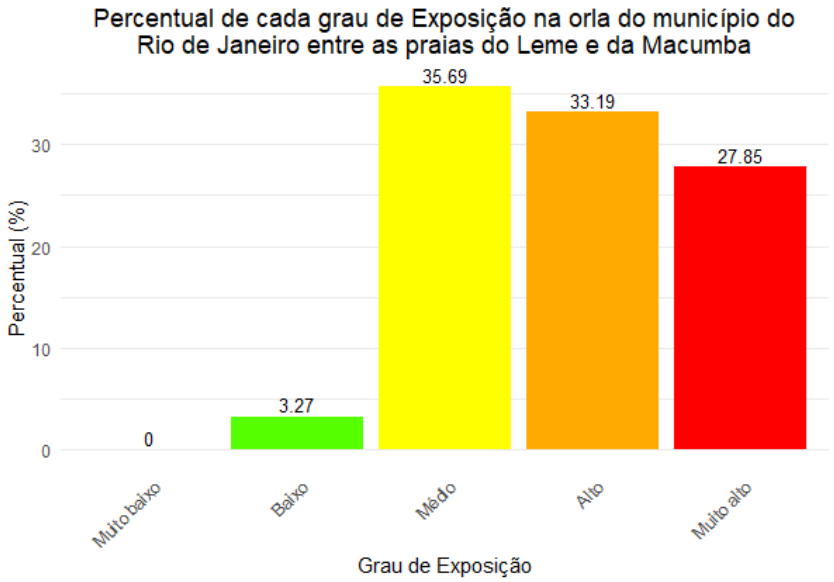
O grau máximo de exposição foi registrado nos segmentos PMC-1, RBT-2, RBT-4, LIA-1 e LIA-4. Por outro lado, o trecho com menor grau de exposição foi RBT-7, principalmente devido ao seu baixo potencial de colisão de ondas, orientação semi-exposta à incidência de ondas e face de praia com declives médios.

Figura 14 - Resultados do subíndice Ex e suas variáveis



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Figura 15 - Percentual de cada grau de exposição na área de estudo



Fonte: Elaboração Própria (2025)

6.1.2 Subíndice Capacidade Adaptativa (CA)

d) Granulometria

A área de estudo (Figura 16) apresentou predominantemente areias médias (92,9%). Apenas a praia da Macumba apresenta resultados diferentes, com areias grossas (7,1%), o que proporciona a esse arco praial uma maior resistência às ondas de ressaca do ponto de vista dessa variável.

e) Elevação do pós-praia

A elevação do pós-praia se mostrou variável por toda a área de estudo (Figura 16), percorrendo desde grandes altitudes, acima de 6 m (21,99%), até pequenas, abaixo de 3 m (6,26%), predominando altitudes entre 5 e 6 m (46,32%). Essa é uma variável que se correlaciona diretamente com a ocorrência de danos de ressaca, como erosão e transposição de ondas (Sallenger, 2000). De fato, trechos onde isso é frequente possuem menores elevações do pós-praia, como em LIA-2 e em ACL-1.

f) Feição do pós-praia

No pós-praia da área de estudo (Figura 16) predominam dunas frontais — vegetadas (50,54%) ou degradadas (19,52%) — e áreas urbanizadas (29,94%). As praias da zona sul (São Conrado, arcos praiais Leblon-Ipanema-Arpoador e Copacabana-Leme) possuem os maiores graus de antropização, o que se correlaciona com as maiores quantidades de notícias sobre danos de ressaca (Lins-de-Barros, Klumb-Oliveira e Lima, 2018). Da mesma forma, os segmentos antropizados da praia da Macumba também enfrentam repetidos danos na infraestrutura, induzidos por tempestades (Pereira *et al*. 2018).

g) Declividade da largura protetora

A área de estudo (Figura 16) apresenta, predominantemente, declividades da largura protetora que excedem 4% (86,68% da área de estudo). A faixa entre 4% e 8% é a classe individual mais frequente, ocupando 35,19 % da área. As menores declividades se encontram no arco praial Copacabana-Leme (ACL-2 e ACL-3), trechos esses que se correlacionam com

episódios recorrentes de transposição e inundação durante ressacas (Silva & Lins-de-Barros 2021).

h) Largura da praia

As larguras das praias da área de estudo (Figura 16) variam entre 25 e 100 m, sendo a faixa entre 50 m e 75 m a mais comum (54,4% da área de estudo). Os trechos mais estreitos concentram-se na praia da Macumba, em RBT-5, PSC-3 e ACL-1. Por outro lado, RBT-1, RBT-8, LIA-2, LIA-3 e ACL-3 e ACL-2 são trechos com larguras altas, sendo o último o setor com a maior largura média. As maiores larguras no arco Copacabana-Leme se devem aos projetos de alimentação artificial de areia concluídos no final da década de 1960, que mantêm elevados volumes de sedimentos até hoje (Silva & Lins-de-Barros 2021).

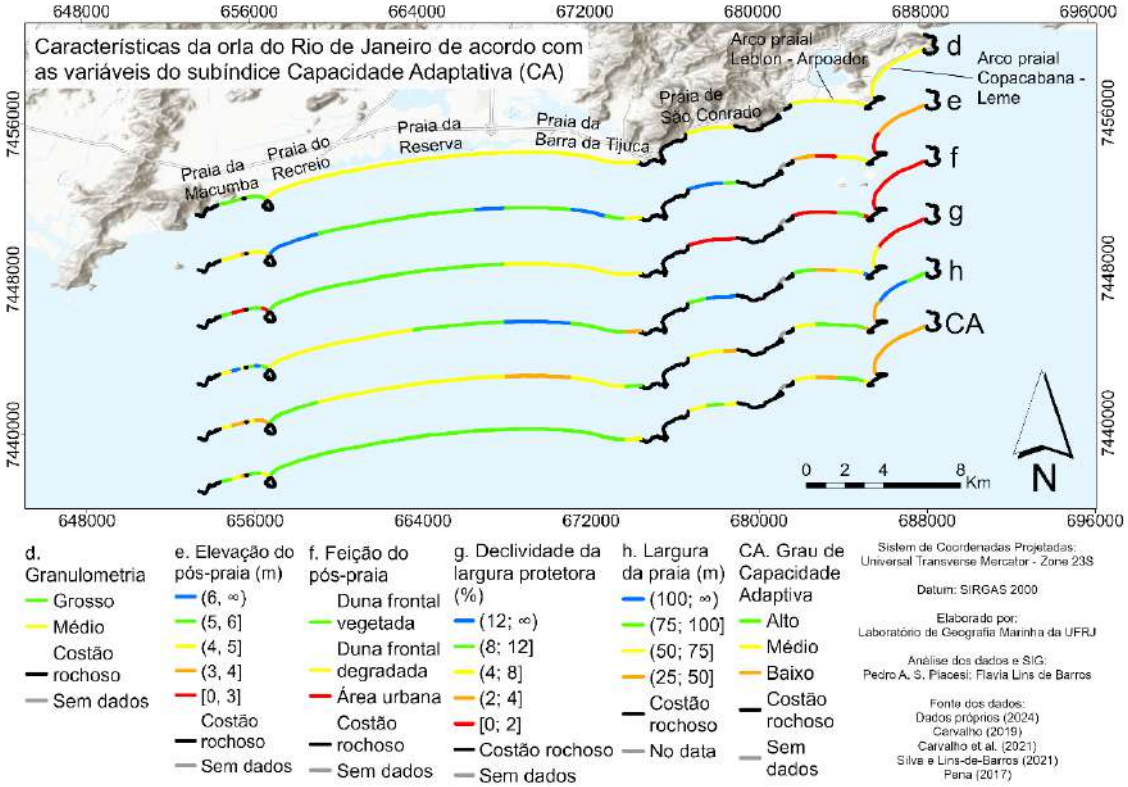
- Síntese dos resultados de CA

No geral, a área de estudo apresenta uma alta capacidade adaptativa a danos de ressaca segundo as variáveis aqui utilizadas (70,43%). A praia da Macumba alterna entre graus altos e moderados, potencializados pela combinação de uma granulometria mais grosseira, uma elevação moderada do pós-praia e dunas frontais vegetadas alternadas com áreas urbanas em seu pós-praia. Seu trecho central, porém, apresentou resistência baixa — trecho esse historicamente alvo de impactos de ressacas (Pereira *et al*., 2018).

O resultado deste subíndice (Figuras Figura 16 e Figura 17) indicou que o arco praial Recreio-Barra da Tijuca apresentou em sua maioria alta capacidade adaptativa aos eventos de ressaca, com exceção do setor RBT-8, com grau moderado. Neste último, a menor declividade da largura protetora contribui para uma menor capacidade adaptativa do setor.

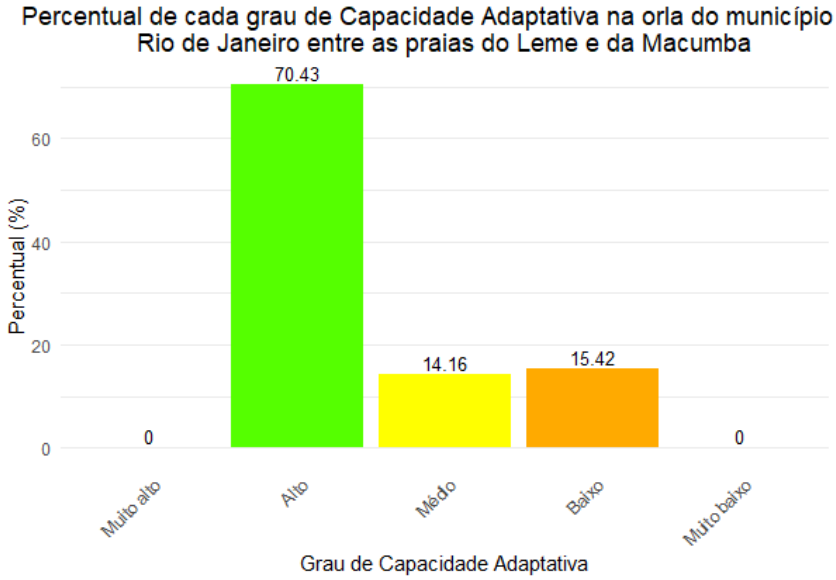
As praias da zona sul, por sua vez, apresentaram as menores capacidades adaptativas. A praia de São Conrado apresentou graus que variam de média, em PSC-1 e PSC-3, a alta, em PSC-2. O arco praial Leblon-Ipanema-Arpoador, apresentou graus que variam de alta em LIA-3, e baixa, em LIA-2. Copacabana-Leme apresentou baixa capacidade adaptativa em toda a sua extensão, potencializado pelo pós-praia pouco elevado, com baixas declividades e altamente antropizado.

Figura 16 – Resultados do subíndice CA e suas variáveis



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Figura 17 – Percentual de cada grau de capacidade adaptativa na área de estudo

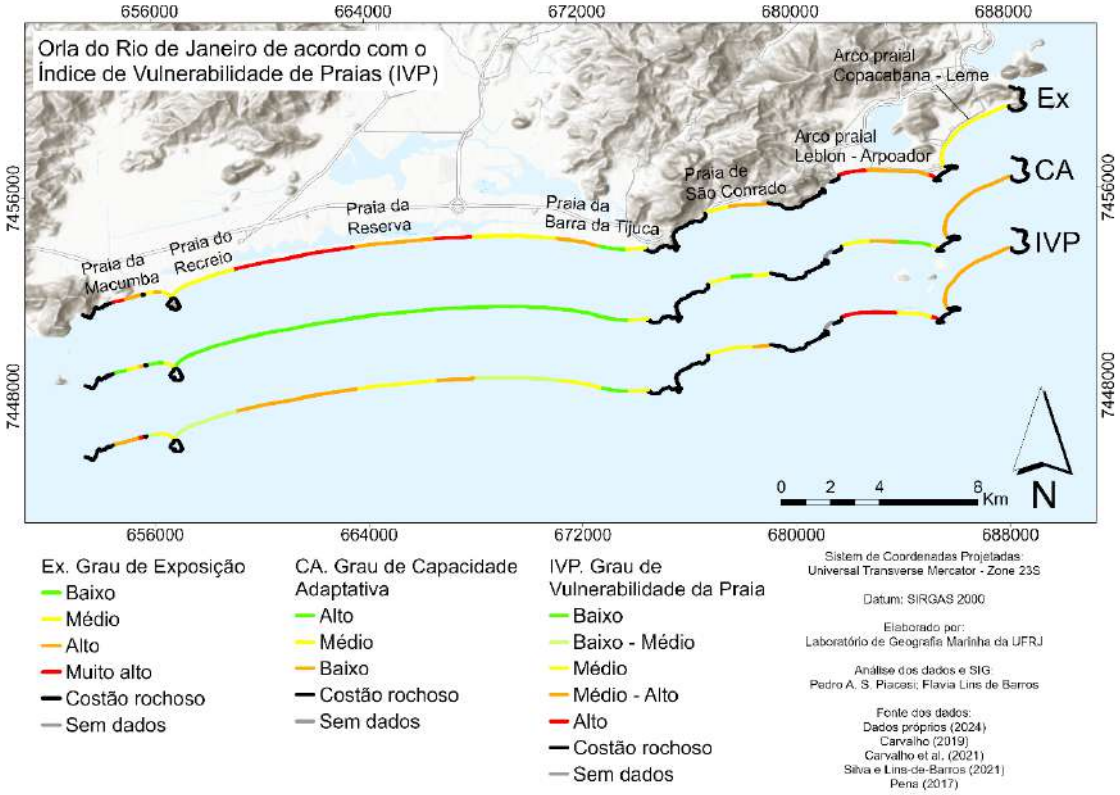


Fonte: Elaboração Própria (2025)

6.1.3 Resultados do IVP

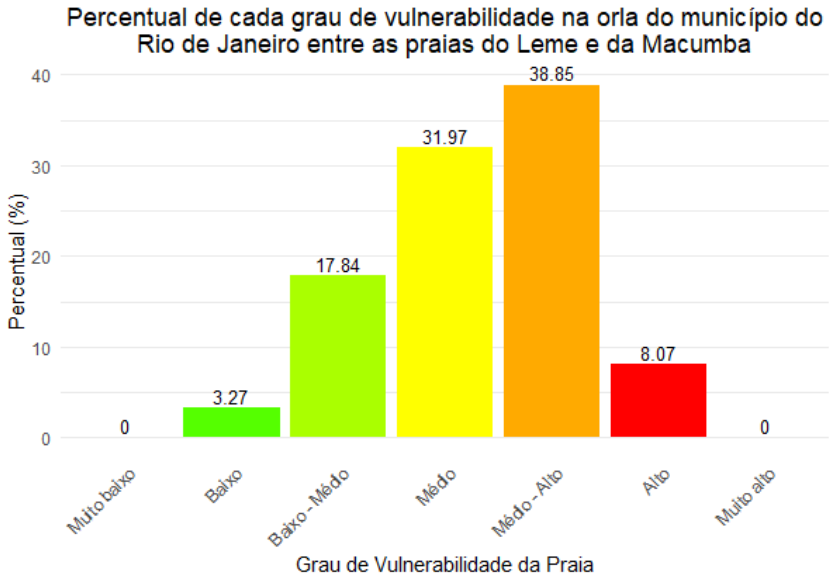
O resultado do índice final de vulnerabilidade física costeira (Figuras Figura 18 e Figura 19) indicou que 3,27% da orla possui vulnerabilidade baixa, 17,84% do litoral apresenta vulnerabilidade baixa a moderada, 31,97% vulnerabilidade moderada, 38,85% vulnerabilidade moderada a alta e 8,07% vulnerabilidade alta, sendo os trechos de alta vulnerabilidade nas praias da Macumba e no arco praial Leblon-Ipanema-Arpoador. A Figura 20 apresenta o percentual de cada classe das variáveis utilizadas no IVP.

Figura 18 – Resultados do IVP e de seus subíndices



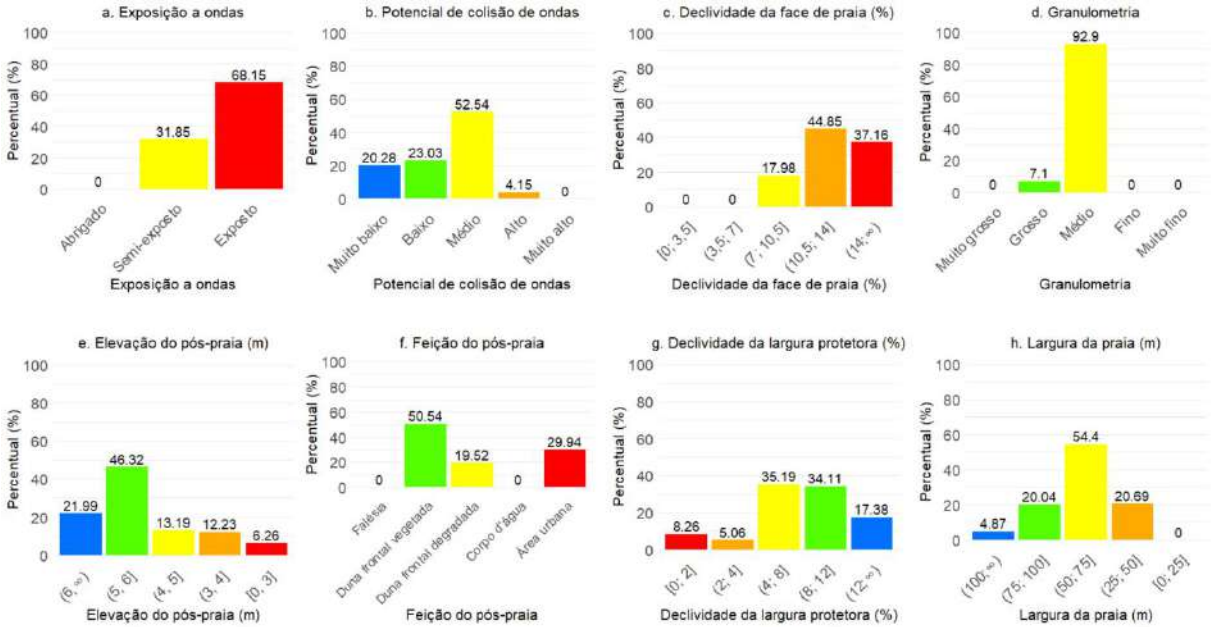
Fonte: Elaboração Própria (2025)

Figura 19 – Percentual de cada grau de vulnerabilidade para as praias da área de estudo



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Figura 20 – Percentual de cada classe das variáveis utilizadas no IVP



Fonte: Elaboração Própria (2025)

6.2 Avaliação de resiliência costeira

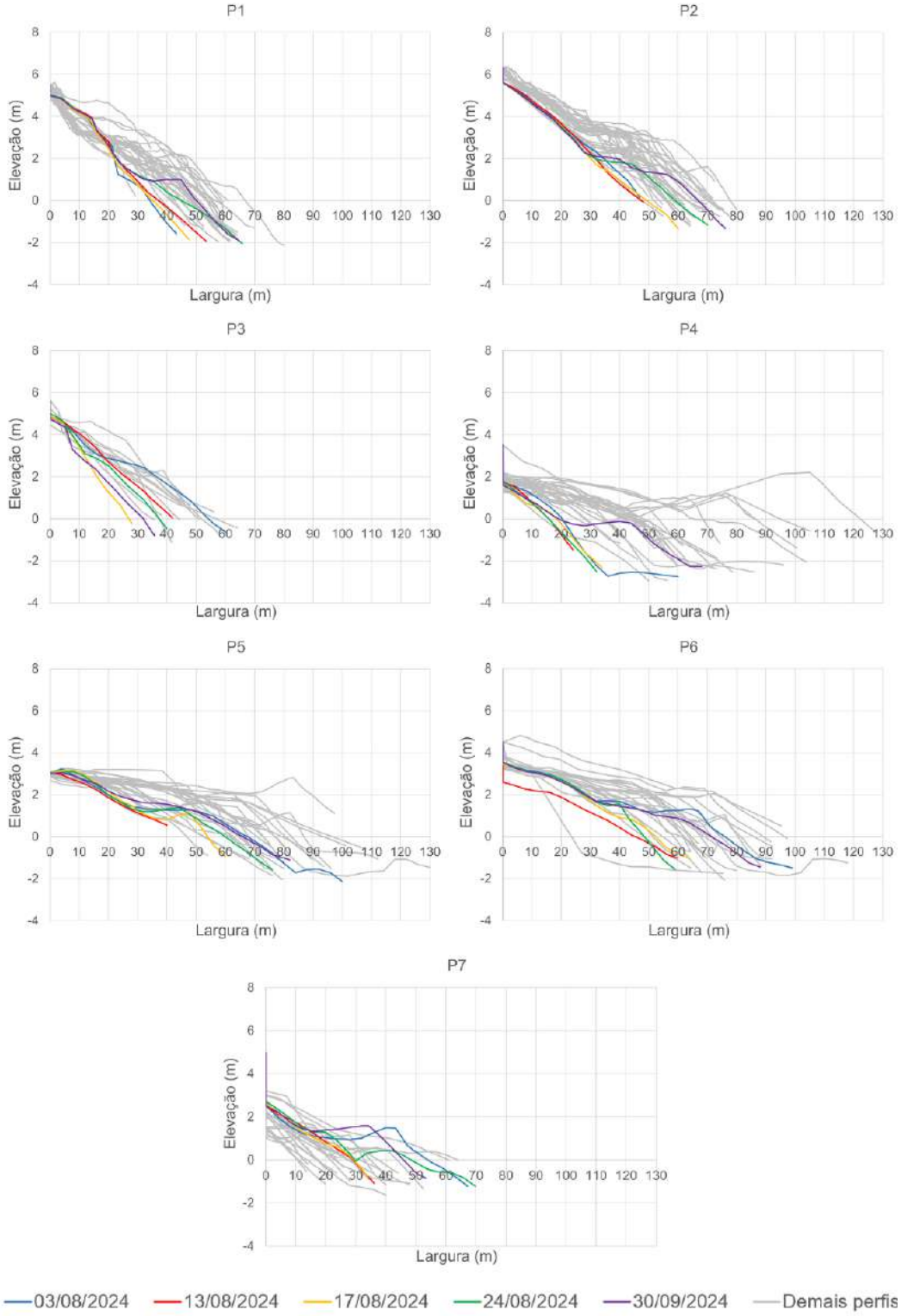
6.2.1 Variabilidade dos perfis

O monitoramento dos sete pontos permitiu registrar o comportamento médio de cada um desses perfis. A Figura 21 apresenta a sobreposição de todos os perfis medidos, com destaque para os perfis abordados no estudo de caso, que será detalhado adiante. As Figuras Figura 22 e Figura 23 apresentam gráficos lineares com a variabilidade do perfil, suas médias (μ) e desvios padrões (σ), aqui considerado como a faixa de variação típica do perfil, tanto para as larguras (Figuras Figura 22a e Figura 23a) quanto para os volumes (Figuras Figura 22b e Figura 23b).

A análise das larguras (Tabela 2) permite verificar que, no geral, os perfis do arco praial RBT apresentam menores médias (54,96 m) em relação aos perfis do arco LIA (65,37 m). Apesar disso, RBT apresenta menor variabilidade, sendo a variação de largura média (σ) de ± 9,29 m, enquanto LIA possui ± 18,35 m.

Os volumes de RBT (Tabela 3), por sua vez, apresentam médias maiores (152,35 m³) em relação a LIA (102,92 m³) — portanto, maior estoque sedimentar. Isso pode indicar um menor acúmulo de sedimentos verticalmente, reflexo do menor percentual de sedimentos finos (Pena, 2017; Carvalho, 2019) e do estado morfodinâmico predominantemente no espectro refletivo. Assim como a largura, a variabilidade do volume em LIA é maior (± 32,78 m³) em relação a RBT (± 22,68 m³).

Figura 21 – Sobreposição dos perfis praiais realizados nos arcos praias RBT (P1 a P3) e LIA (P4 a P7)



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 2 - Valores médios e desvios padrões de largura dos perfis para o período total entre 2016 e 2024. Medidas em metros (m)

Arco praial	Ponto	μ	σ	μ + σ	μ - σ
RBT	P1	55,41	9,65	65,07	45,76
	P2	63,58	8,89	72,47	54,69
	P3	45,88	9,32	55,20	36,56
LIA	P4	64,69	25,02	89,71	39,67
	P5	81,28	18,10	99,38	63,17
	P6	78,25	14,52	92,77	63,72
	P7	37,27	15,74	53,01	21,53

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 3 - Valores médios e desvios padrões de volume dos perfis para o período total entre 2016 e 2024. Medidas em metros cúbicos (m³)

Arco praial	Ponto	μ	σ	μ + σ	μ - σ
RBT	P1	134,03	19,92	153,95	114,11
	P2	205,85	24,44	230,29	181,40
	P3	117,17	23,69	140,86	93,49
LIA	P4	75,16	32,91	108,07	42,25
	P5	143,72	38,03	181,75	105,69
	P6	154,29	41,07	195,36	113,22
	P7	38,52	19,12	57,63	19,40

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Figura 22 – Gráficos de variabilidade da largura (a) e volume (b) cada perfil do arco praial RBT

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Figura 23 – Gráficos de variabilidade da largura (a) e volume (b) cada perfil do arco praial LIA

Fonte: Elaboração Própria (2025)

6.2.2 Índice de Resiliência Costeira (IRC)

A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam a média de todas as variáveis utilizadas no modelo. Os fatores e o IRC médios foram obtidos a partir da média de todos os dias monitorados em campo (Tabela 6). Todos os pontos monitorados apresentaram IRC alto de acordo com a classificação de Dong *et al*. (2018) (IRC > 2), indicando uma alta capacidade de recuperação dos perfis. Os perfis de RBT apresentaram maiores médias de IRC em relação a LIA, o que correlaciona com a menor variabilidade apresentada por aqueles.

Apesar disso, assim como o verificado na análise das larguras e volumes dos perfis, a maior parte dos pontos monitorados apresentaram tendências temporal de diminuição de IRC, ainda que fracas, mesmo nos perfis pouco antropizados de RBT. Por outro lado, o P7, na praia do Arpoador, apesar de possuir o menor IRC médio, foi o único perfil que apresentou tendência temporal de aumento do IRC (Figuras Figura 24 e Figura 25), assim como o verificado pela análise da largura e volume.

Tabela 4 - Valores médios de cada parâmetro do IRC obtidos em campo e utilizados no modelo. O significado de cada sigla pode ser encontrado no Quadro 15

Arco praial	**Ponto**	**PE_0 (m)**	**PW_0 (m)**	**CF_0 (m)**	**WR_0 (m)**	**s (%)**	**DE (m)**	**MR (m)**	**MS (m)**	**WR**	**MHW (m)**
RBT	**P1**	3,38	35,02	4,28	1,39	0	5,46	26,34	0,05	1,39	1,12
	P2	4,12	43,09	5,08	1,23	0	6,25	16,68	0,04	1,23	1,13
	P3	4,03	22,55	4,48	1,63	0	5,62	17,88	0,08	1,63	1,06
LIA	**P4**	1,46	41,60	2,34	1,12	0,21	3,50	40,69	0,04	1,10	1,13
	P5	2,33	52,38	1,89	0,93	0,25	3,05	41,41	0,04	0,93	1,11
	P6	2,71	52,46	3,35	1,02	0,25	4,51	19,19	0,05	1,02	1,11
	P7	2,69	13,88	3,84	1,35	0,29	5,00	23,72	0,05	1,35	1,11

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 5 - Valores médios de cada parâmetro do WR utilizados no modelo. H_0 representa a altura significativa de ondas a 20 metros de profundidade, L_0 o comprimento de onda e β_f a declividade média da praia

Arco praial	Ponto	H_0 (m)	L_0 (s)	β_f
RBT	**P1**	1,31	9,44	0,11
	P2	1,30	9,39	0,10
	P3	1,60	9,66	0,11
LIA	**P4**	1,52	10,06	0,07
	P5	1,53	10,08	0,05
	P6	1,53	10,16	0,06
	P7	1,51	9,98	0,09

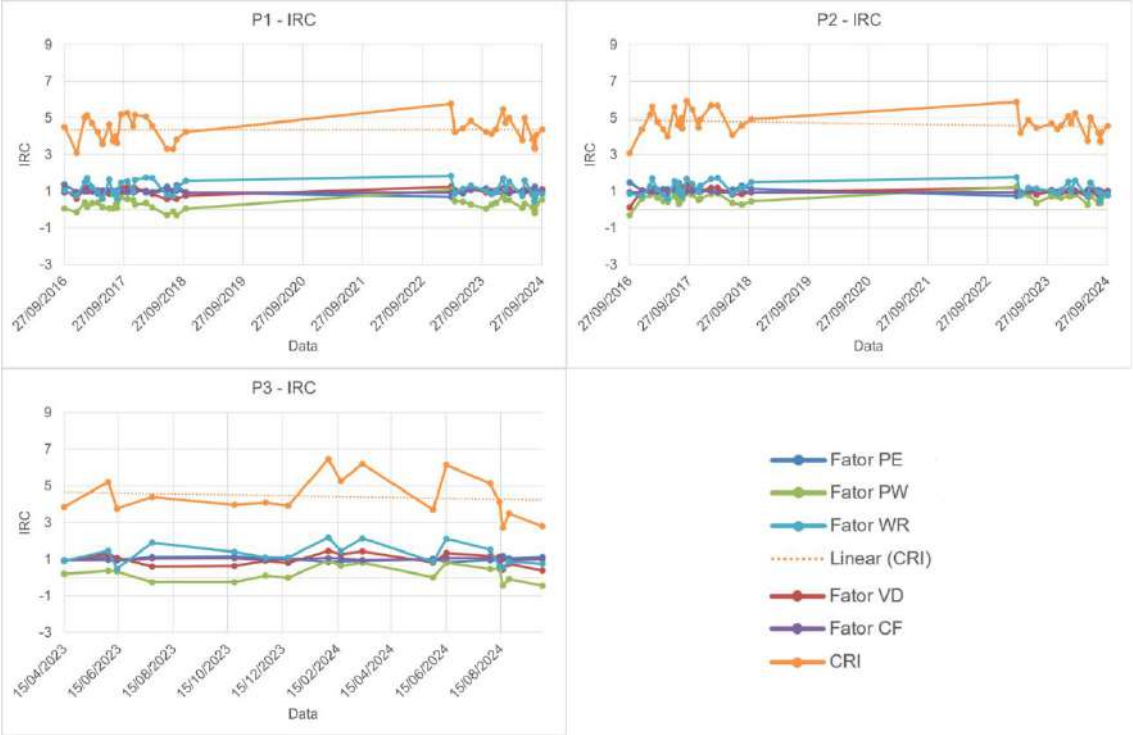
Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 6 - Valores médios de cada fator não-dimensional do IRC. O significado de cada sigla pode ser encontrado na seção 5.3 desta dissertação

Arco praial	Ponto	μ Fator PE (a)	μ Fator VD (b)	μ Fator PW (c)	μ Fator CF (d)	μ Fator WR (e)	μ IRC
RBT	**P1**	1,00	0,97	0,25	1,00	1,14	4,36
	P2	1,00	0,97	0,61	1,00	1,12	4,71
	P3	1,00	0,96	0,21	1,00	1,25	4,42
LIA	**P4**	1,00	0,69	0,02	1,00	1,23	3,94
	P5	1,00	0,72	0,18	1,00	1,12	4,02
	P6	1,00	0,74	0,62	1,00	1,12	4,48
	P7	1,00	0,48	-0,71	1,00	1,25	3,02

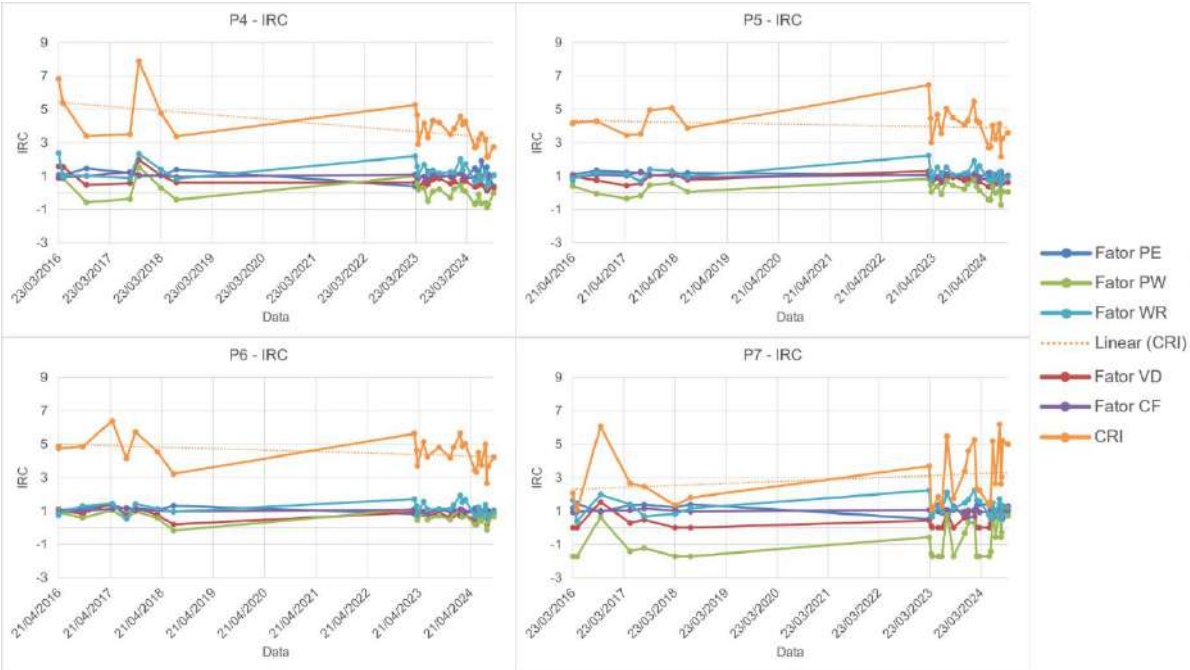
Fonte: Elaboração Própria (2025)

Figura 24 – Variação do IRC por dia monitorado entre 2016 e 2024 em RBT



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Figura 25 – Variação do IRC por dia monitorado entre 2016 e 2024 em LIA



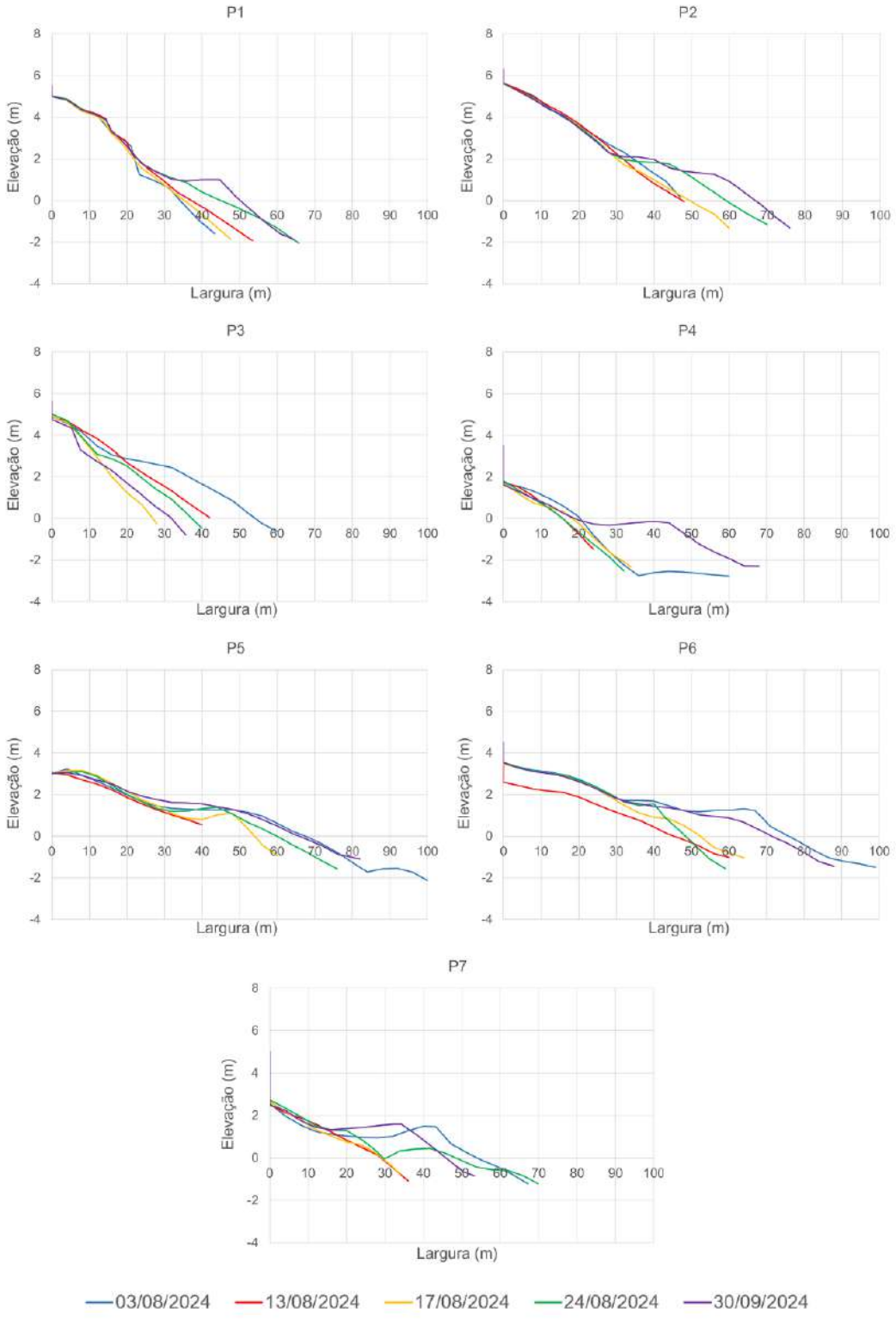
Fonte: Elaboração Própria (2025)

6.3 Estudo de caso: ressaca de 13 de agosto de 2024

A ressaca escolhida para o estudo de caso se iniciou no dia 13/08, com ondas provenientes de SSO superiores a 3 m de altura por 45 horas, segundo dados do modelo de reanálise, e por 72 horas segundo dados do SiMCosta. Atingiu altura máxima de ondas de 4,43 m em 14/08, segundo o modelo de reanálise, e de mais de 5,0 m em 13/08, segundo dados medidos pela boia do SiMCosta, e período máximo de aproximadamente 14 s.

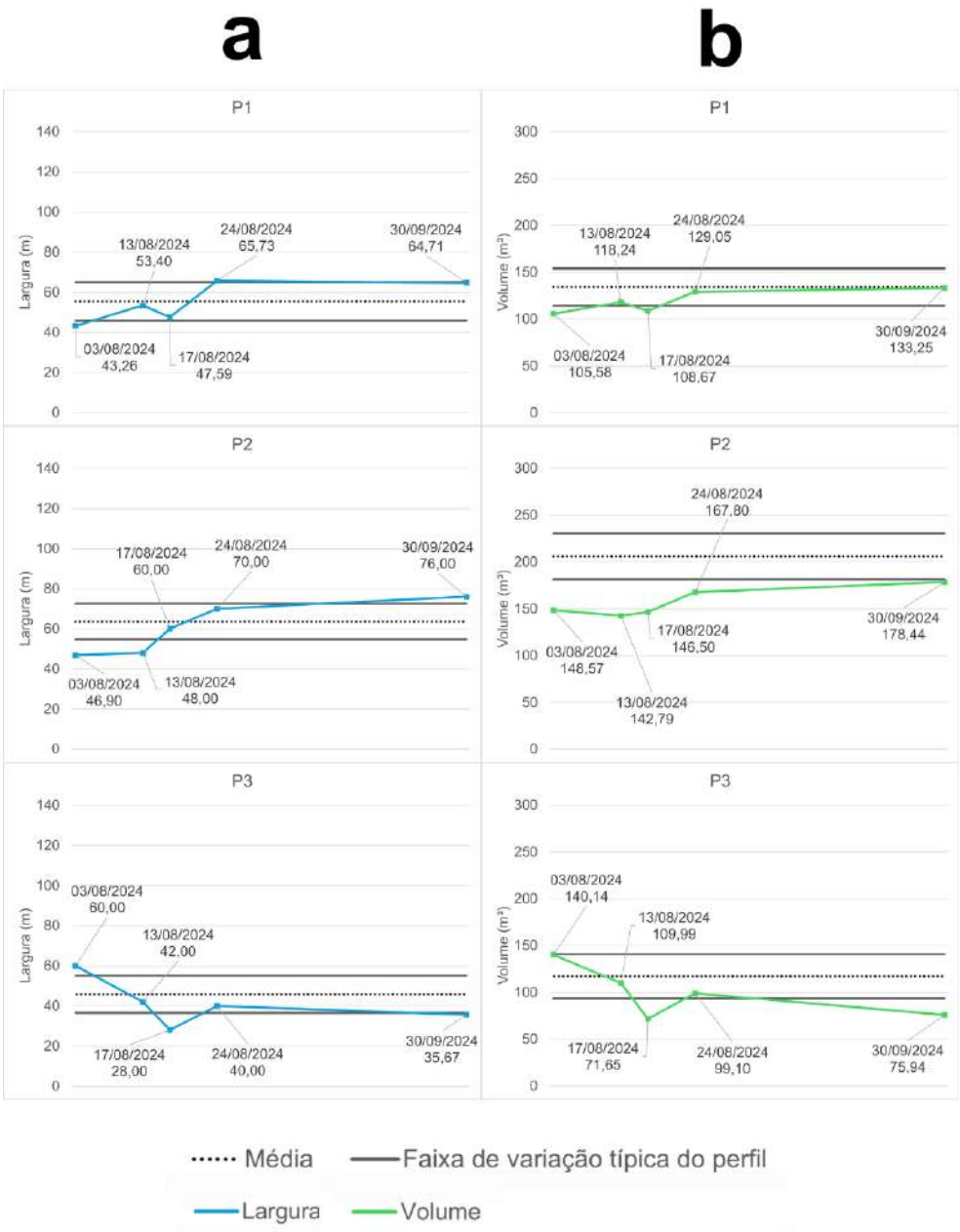
Com aplicação do SPI, ao considerar os dados do modelo de reanálise, a ressaca foi classificada como severa (SPI = 656). Ao aplicar o índice aos dados medidos pela boia oceanográfica do SiMCosta, foi considerada extrema (SPI = 1001). As Figuras Figura 26, Figura 27 e Figura 28 apresentam os gráficos dos perfis medidos sobrepostos, as linhas de variabilidade dos perfis e os valores de largura e volume para os arcos RBT e LIA, respectivamente.

Figura 26 - Sobreposição dos perfis do estudo de caso nos arcos praias RBT (P1 a P3) e LIA (P4 a P7)



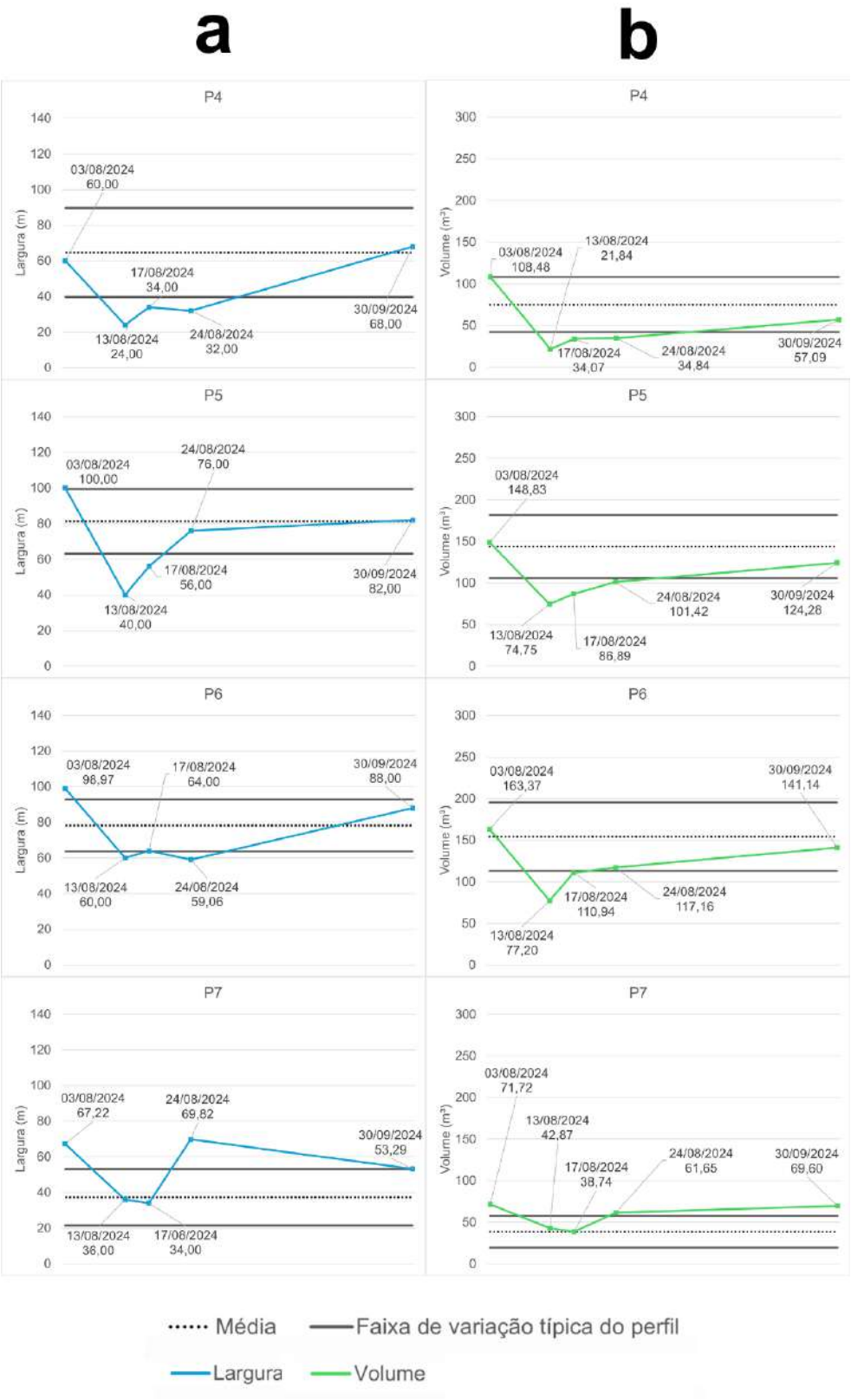
Fonte: Elaboração Própria (2025)

Figura 27 - Gráficos de variabilidade da largura (a) e volume (b) dos perfis do estudo de caso no arco praial RBT



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Figura 28 - Gráficos de variabilidade da largura (a) e volume (b) de cada perfil do estudo de caso no arco praial LIA



Fonte: Elaboração Própria (2025)

6.3.1 Impactos da ressaca

A Tabela 7 apresenta as variações percentuais dos perfis em relação ao perfil anterior à ressaca e em relação à variação média do perfil. O P1 apresentou acreção tanto em sua largura quanto em seu volume no dia 13/08. A erosão verificada no dia 17/08 indica a continuação do potencial erosivo das ondas após a ressaca, que terminou no dia 14/08. Posteriormente, entretanto, o perfil apresentou tendência de recuperação. O P2, apesar de apresentar uma alta acreção em sua largura até o fim do monitoramento, o volume não acompanhou: além de ter sofrido perda de 3,89% de seu estoque sedimentar em relação ao perfil anterior à ressaca, foi o único ponto que não se recuperou até o fim do monitoramento, potencializado pelo fato do perfil já estar abaixo de sua variabilidade média durante toda a série analisada. Apesar disso, apresentou tendência de ganhos nos dias seguintes. O P3 apresentou tendência erosiva, mesmo com o fato de o perfil estar bem alimentado antes da tempestade, com apenas um dia em que foi detectada acreção, 11 dias depois. Ao fim do monitoramento, tanto a largura quanto o volume apresentaram valores abaixo da variabilidade média do perfil.

Diferentemente do arco RBT, LIA apresentou expressivas taxas de recuo durante a ressaca, corroborando com a alta variabilidade encontrada nesse arco praial. O P4 apresentou as maiores taxas de retração (ΔV (%) = -79,87% e ΔV_{min} (%) = -48,31%, Tabela 7), o que colabora com o alto grau de vulnerabilidade encontrado para o setor com a aplicação do IVP. Nota-se ainda que os pontos P5 e P6 não retornaram à sua condição anterior à ressaca em termos de largura e volume da praia até a última data monitorada, em 30 de setembro, mas alcançaram a largura média em até 7 semanas depois da ressaca. Apesar desses dois pontos apresentarem as maiores larguras médias da área de estudo, foi observada ocorrência de transposição no P5, impacto recorrente na área de estudo (Pena, 2017) (Figura 29), e de ocorrência de retração significativa (-49,77 % e -52,74% do volume antecedente, respectivamente).

O P7, embora seja o mais curto e com menor estoque sedimentar, apresentou a menor taxa de retração do volume no arco praial, o que está correlacionado com o transporte longitudinal conduzido para leste em função das ondulações provenientes de SO, evidenciando o processo rotacional deste arco praial, já identificado em trabalhos anteriores. Apesar de sofrer retração, o perfil foi capaz de permanecer em sua faixa de variação média. Carvalho et al. (2021) em estudo de caso de uma ressaca ocorrida em agosto de 2017, cuja direção predominante foi de SE, ou seja, oposto ao estudo de caso do presente trabalho, observou maior retração no P7, pois o processo de rotação atuou no sentido contrário. As autoras também apontaram para recuperação do P4 em aproximadamente 4 semanas.

Tabela 7 - Diferença percentual de larguras e volumes durante a ressaca. ΔL e ΔV representam a variação percentual da largura e volume, respectivamente, entre o perfil do dia e o anterior à ressaca (03/08). ΔL_{min} e ΔV_{min} representam a variação percentual da largura e volume, respectivamente, em relação ao mínimo médio do perfil

Arco praial	Ponto	Data	Largura		Volume	
			ΔL (%)	**ΔL_{min} (%)**	**ΔV (%)**	**ΔV_{norm} (%)**
RBT	P1	03/08/2024	-	-5,46	-	-7,48
		13/08/2024	23,44	16,70	11,99	3,62
		17/08/2024	10,01	4,01	2,92	-4,77
		24/08/2024	51,94	43,65	22,23	13,09
		30/09/2024	49,58	41,42	26,20	16,77
	P2	03/08/2024	-	-14,25	-	-18,10
		13/08/2024	2,35	-12,23	-3,89	-33,83
		17/08/2024	27,93	9,71	-1,39	-30,58
		24/08/2024	49,25	27,99	12,95	-11,92
		30/09/2024	62,05	38,96	20,11	-2,59
	P3	03/08/2024	-	64,10	-	49,91
		13/08/2024	-30,00	14,87	-21,52	17,65
		17/08/2024	-53,33	-23,42	-48,87	-23,35
		24/08/2024	-33,33	9,40	-29,29	6,01
		30/09/2024	-40,55	-2,44	-45,81	-18,76
LIA	P4	03/08/2024	-	51,25	-	156,77
		13/08/2024	-60,00	-39,50	-79,87	-48,31
		17/08/2024	-43,33	-14,29	-68,59	-19,35
		24/08/2024	-46,67	-19,33	-67,88	-17,53
		30/09/2024	13,33	71,42	-47,37	35,14
	P5	03/08/2024	-	58,29	-	40,81
		13/08/2024	-60,00	-36,68	-49,77	-29,28
		17/08/2024	-44,00	-11,36	-41,62	-17,79
		24/08/2024	-24,00	20,30	-31,85	-4,04
		30/09/2024	-18,00	29,80	-16,49	17,59
	P6	03/08/2024	-	55,31	-	44,29
		13/08/2024	-39,38	-5,85	-52,74	-31,81
		17/08/2024	-35,33	0,43	-32,09	-2,02
		24/08/2024	-40,33	-7,32	-28,28	3,48
		30/09/2024	-11,08	38,09	-13,61	24,65
	P7	03/08/2024	-	212,17	-	269,69
		13/08/2024	-46,44	67,18	-40,22	121,00
		17/08/2024	-49,42	57,90	-45,98	99,69
		24/08/2024	3,87	224,25	-14,04	217,80
		30/09/2024	-20,72	147,48	-2,95	258,79

Fonte: Elaboração Própria (2025)

O Quadro 17 apresenta uma síntese dos impactos imediatos da ressaca, no dia 13/08. Para isso, as respostas da largura e volume foram categorizadas em onze classes, de “Acreção muito alta” a “Retração muito alta”. Os intervalos de valores estão expostos no Quadro 16.

Quadro 16 - Categorização das respostas dos perfis para o dia da ressaca (13/08) em relação ao perfil anterior (03/08). Tanto o volume quanto a largura são representados por “x” e referem-se às colunas “ΔL (%)” e “ΔV (%)” da Tabela 7 — portanto, são valores percentuais

Intervalo (%)	**Classificação**
$x \geq 80$	Acreção muito alta
$60 \leq x < 80$	Acreção alta
$40 \leq x < 60$	Acreção média
$20 \leq x < 40$	Acreção baixa
$0 < x < 20$	Acreção muito baixa
$x = 0$	Estabilidade
$-20 \leq x < 0$	Retração muito baixa
$-40 \leq x < -20$	Retração baixa
$-60 \leq x < -40$	Retração média
$-80 \leq x < -60$	Retração alta
$x \leq -80$	Retração muito alta

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Como esperado, a maior parte dos perfis sofreram retração tanto de largura quanto de volume, à exceção dos pontos mais preservados P1 e P2. Isso irá correlacionar diretamente com o fato de serem os dois perfis menos degradados da área de estudo, apesar de apresentarem graus moderados a altos segundo o IVP. O P3, apesar de apresentar um menor grau de vulnerabilidade, apresentou retração tanto na largura quanto no volume.

No arco LIA, todos os pontos apresentaram retração, o que correlaciona com o grau de vulnerabilidade predominantemente alto (à exceção do P6). Nota-se que, apesar de sofrerem erosão, o P3 e o P7 foram capazes de manter a largura e seu estoque sedimentar acima da variabilidade média do perfil (Figuras Figura 27 e Figura 28).

Quadro 17 - Respostas dos perfis no dia 13/08 ($Hs_{médio}$ = 3,70 m; $Tp_{médio}$ = 11,08 s; $Dir_{média}$ = 198,29º) e seus respectivos graus de vulnerabilidade segundo o IVP. Os valores de retração estão presentes na Tabela 7, nas colunas "ΔL (%)" e "ΔV (%)"

Arco praial	Ponto	Resposta da largura	Resposta do volume	Regime da EIT observado	Grau de vulnerabilidade
RBT	P1	Acreção baixa	Acreção muito baixa	Espraiamento	Médio
	P2	Acreção baixa	Retração muito baixa	Espraiamento	Médio-Alto
	P3	Retração baixa	Retração baixa	Espraiamento	Baixo-Médio
LIA	P4	Retração alta	Retração alta	Colisão	Alto
	P5	Retração alta	Retração média	Transposição	Alto
	P6	Retração baixa	Retração média	Colisão	Médio
	P7	Retração média	Retração média	Espraiamento	Alto

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Figura 29 - Garis realizando limpeza da avenida após ocorrência de transposição no P5

Fonte: Acervo próprio (2024)

O Quadro 18 apresenta a capacidade de recuperação dos perfis após as alterações decorrentes da ressaca, com seus respectivos tempos de recuperação. São apresentadas a recuperação do perfil segundo dois referenciais: o perfil do dia anterior à ressaca, do dia 03/09; e o limite inferior da variação média do perfil, que é igual à diferença entre a média (μ) e o desvio padrão (σ).

A utilização dos dois métodos de medição da recuperação do perfil permite fornecer uma visão mais completa do processo de recuperação dos perfis. Apesar de ser mais fácil de interpretar, a avaliação da recuperação em relação ao perfil anterior pode mascarar tendências naturais, no qual a praia pode se recuperar para uma configuração diferente, mas ainda funcional e normal, sem necessariamente voltar ao estado exato anterior, fator esse integrado pela avaliação em relação ao mínimo médio do perfil. Além disso, o perfil anterior pode não representar necessariamente um estado de equilíbrio, pois pode ter sido influenciado por variações sazonais ou outras forçantes, podendo se encontrar mais largo ou mais retraído que o comum. Por isso, nesse estudo, foi considerada, para a avaliação da resiliência, a segunda opção.

Isso vale também para a comparação da recuperação em relação à largura e ao volume. Apesar da largura fornecer uma visão facilitada do comportamento do perfil, sua utilização pode mascarar alguns fatores como a altitude e, com isso, a influência do nível do mar e da maré. Portanto, o volume será considerado para esse fim.

Quadro 18 - Tempo de recuperação dos perfis em relação ao mínimo médio do perfil após impactos da ressaca

		Em relação ao dia anterior à ressaca		**Em relação ao limite inferior médio**		
Arco praial	**Ponto**	**Recuperação da largura**	**Recuperação do volume**	**Recuperação da largura**	**Recuperação do volume**	**μ IRC**
RBT	**P1**	Acreção	Acreção	Perfil permaneceu acima da faixa de variação média	Perfil permaneceu acima da faixa de variação média	4,36
	P2	Acreção	Até 2 semanas	Até 1 semana	Não recuperou até a data limite	4,71
	P3	Não recuperou até a data limite	Não recuperou até a data limite	Perfil permaneceu acima da faixa de variação média	Perfil permaneceu acima da faixa de variação média	4,42
LIA	**P4**	Até 7 semanas	Não recuperou até a data limite	Até 7 semanas	Até 7 semanas	3,94
	P5	Não recuperou até a data limite	Não recuperou até a data limite	Até 2 semanas	Até 7 semanas	4,02
	P6	Não recuperou até a data limite	Não recuperou até a data limite	Até 1 semana	Até 2 semanas	4,48
	P7	Até 2 semanas	Não recuperou até a data limite	Perfil permaneceu acima da faixa de variação média	Perfil permaneceu acima da faixa de variação média	3,02

Fonte: Elaboração Própria (2025)

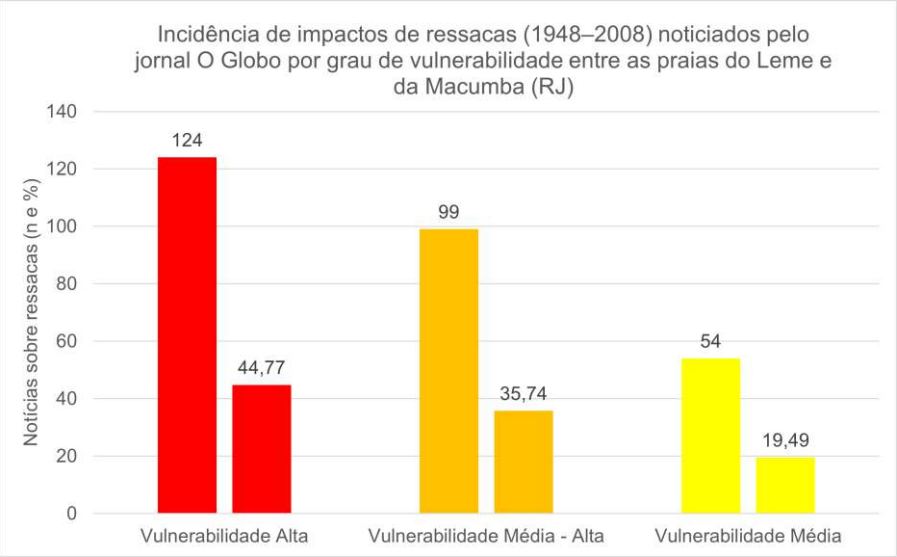
7 DISCUSSÃO

7.1 IVP e observações pretéritas

Os resultados trazem uma classificação que corresponde, de modo geral, ao que vem sendo observado em dados de trabalhos anteriores e em trabalhos de campo realizados em monitoramentos topográficos das praias desde 2016. Em inventário de notícias de ressacas do jornal O Globo para o período entre 1948 e 2008 (Lins-de-Barros, Klumb-Oliveira e Lima, 2018; Lima, 2022), é apontado que mais da metade das notícias mencionaram a praia do Leblon, com mais de 100 registros de ressacas neste período analisado.

A Figura 30 apresenta o número absoluto e percentual de ocorrências de danos de ressaca associados a cada grau de vulnerabilidade na área de estudo, noticiados pelo jornal O Globo entre 1948 e 2008 e levantados por Lima (2022). Observa-se que 124 eventos (44,77%) ocorreram em segmentos classificados com alta vulnerabilidade, 99 (35,74%) em segmentos de moderada a alta e 54 (19,49%) em trechos com moderada vulnerabilidade. Dentre os principais impactos relatados estão a ocorrência de transposição de ondas e alagamento de áreas urbanas; em menor escala, há relatos de danos a quiosques, calçadas e ciclovias (Figura 31).

Figura 30 - Impactos negativos de ressacas noticiados pelo jornal O Globo (1948–2008) em segmentos da área de estudo, classificados por grau de vulnerabilidade. Os números de ocorrências reportadas foram retirados de Lima (2022)



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Figura 31 - Exemplos de danos observados nas praias da área de estudo. a) Destruição do calçadão na Praia da Macumba em outubro de 2017; b) Episódio de erosão no Posto 8, praia da Barra da Tijuca, em agosto de 2020; c) Rampa de acesso à praia destruída na Praia de São Conrado em 2016; d) Equipes de limpeza e repórteres cobrindo eventos de inundação no Posto 11, Praia do Leblon, em agosto de 2024; e) Largura estreita da praia após um evento de tempestade na Praia de Copacabana em julho de 2018

Fonte: a) Ressaca..., 2017; b) Ressaca..., 2020; c) Após..., 2016; d) Acervo pessoal; e) Ressaca..., 2018

Pena (2017) encontra tendência de estabilidade em todo o arco praial Leblon-Ipanema-Arpoador, porém destaca a ocorrência de pulsos erosivos nas extremidades oeste e leste do arco, correspondentes aos setores LIA-1 e LIA-4, sendo esses os setores com os maiores graus de vulnerabilidade da área de estudo. Na praia de São Conrado, Pena (2017) identifica tendência de estabilidade em setores correspondentes aos setores PSC-1 e PSC-2 e tendência erosiva em PSC-3, aqui identificado com vulnerabilidade moderada a alta.

Na praia da Macumba, os trechos PMC-1 a PMC-3, classificados de vulnerabilidade Moderada a Alta e Alta, são os mesmos onde foram identificados episódios erosivos mais severos, com danos à infraestrutura, por Pereira *et al*. (2018). Pena (2017) identifica tendência erosiva para setor correspondente ao PMC-3. Entretanto, a autora identifica tendência de estabilidade para o restante da praia.

Carvalho e Guerra (2023) incorporaram variáveis geomorfológicas e oceanográficas juntamente com a densidade populacional para avaliar a vulnerabilidade no trecho costeiro entre

a Marambaia e a Barra da Tijuca. Identificaram alta vulnerabilidade no segmento leste da Barra da Tijuca, que corresponde à área mais densamente ocupada.

Embora se reconheça a relevância dos fatores sociais dada a sua utilidade na estimativa dos impactos sociais e das perdas financeiras decorrentes de eventos extremos, esta dissertação visou identificar áreas com maior suscetibilidade física aos impactos negativos das ressacas. A inclusão de variáveis socioeconômicas poderia mascarar os graus de vulnerabilidade física. Por exemplo, a área de alta renda da Praia do Leblon poderia ser classificada como menos vulnerável nesse caso, apesar de sua alta suscetibilidade à erosão e outros impactos de ressacas, como aqui apresentado. Por outro lado, praias como Recreio e seções da Macumba, Reserva e Barra da Tijuca, aqui classificadas com vulnerabilidade física baixa a moderada, podem ser mais expostas quando a densidade populacional é considerada.

A correspondência do resultado do IVP com os dados observados demonstra que a escolha das variáveis para desenvolvimento do índice se mostrou pertinente e refletiu a dinâmica de exposição e adaptação das praias, ou seja, conseguiram sintetizar a vulnerabilidade das praias adequadamente.

7.2 Recuperação do estoque sedimentar e resiliência

É importante notar que, apesar dos fortes impactos causados por tempestades em alguns trechos do litoral, muitas praias demonstram uma forte capacidade de recuperação do seu estoque sedimentar, evidenciado no estudo de caso. Estas praias não apresentam evidências de recuo da costa, indicando uma ausência de erosão costeira contínua.

Tal tendência também vem sendo notada em outras praias do estado do Rio de Janeiro por Muehe (2011) que afirma que, de acordo com os dados levantados, os processos erosivos ocorridos na orla costeira indicam ser o resultado de eventos extremos e não o efeito de uma retrogradação continuada da linha de costa. Esta conclusão, como alerta Muehe (*op. cit.*), não elimina o risco às construções localizadas muito próximas da praia. Ainda, Muehe *et al*. (2015) indica a ocorrência de pulsos erosivos periódicos em outras praias da Região dos Lagos do estado.

A avaliação morfológica demonstra baixa variabilidade praial nos trechos menos antropizados do arco praial RBT e alta em todo arco praial LIA, altamente urbanizado. Nesse último, há um menor estoque sedimentar nas extremidades, conforme apontado em trabalhos anteriores (Carvalho *et al*., 2021). Seis dos sete pontos monitorados apresentaram recuperação em até 7 semanas após eventos extremos de tempestade.

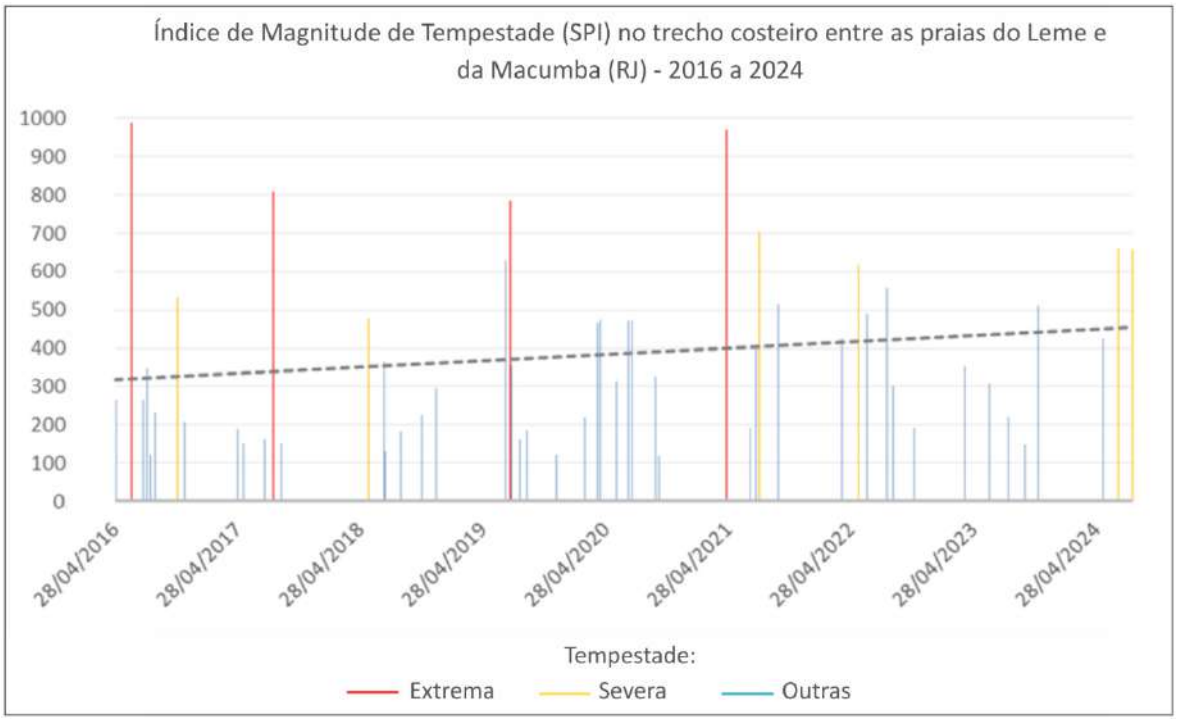
Por outro lado, quatro dos sete pontos apresentaram tendência temporal de diminuição do longo do tempo da largura e cinco do volume. O P2, apesar de apresentar tendência de estabilidade da largura, apresentou uma forte tendência de diminuição do volume.

Todos os pontos analisados apresentaram alta resiliência costeira segundo o IRC, inclusive maiores que as encontradas por Dong *et al*. (2018) em sua aplicação piloto do índice em uma porção vegetada da praia de Delray, na Florida, EUA. De fato, isso correlacionou com as recuperações dos perfis após a ressaca: seis dos sete ou permaneceram dentro da variabilidade média do perfil ou se recuperaram em até 7 semanas. O P2, o único que não se recuperou até a data limite, foi capaz de assumir volume muito próximo do valor mínimo médio (178,44 m³ e 181,40 m³, respectivamente) na data limite, indicando tendência de recuperação nos dias posteriores.

Isso denota uma alta capacidade de recuperação dos perfis ao considerar que, para eventos entre as classes Fraco e Severo, o tempo de retorno é de um ano; para eventos acima da classe Severo, o tempo de retorno é de 5 anos (Klumb-Oliveira, 2024). Ou seja, o perfil apresentou capacidade de recuperação de suas funções morfológicas antes da ocorrência de outros eventos mais energéticos.

Ainda, Piacesi e Lins-de-Barros (2024) identificaram, para a área de estudo entre 2016 e 2024, 52 eventos de tempestade (6,50/ano, 0,54/mês), dos quais 4 são considerados extremos (0,5/ano, 0,04/mês), 10 severos (1,25/ano, 0,10/mês), 14 significantes (1,75/ano, 0,15/mês), 10 moderados (1,25/ano, 0,10/mês) e outros 14 fracos (1,75/ano, 0,15/mês), seguindo a classificação proposta por Klumb-Oliveira (2024) para esta região do estado do Rio de Janeiro (Figura 32). A série de dados revelou uma tendência linear de aumento da intensidade dos eventos no futuro.

Figura 32 - SPI para o intervalo entre 2016 e 2024, segundo dados de ondas extraídos, entre as praias do Leme e da Macumba



Fonte: Adaptado de Piacesi e Lins-de-Barros (2024)

Logo, na média, os perfis seriam capazes de se recuperar antes da ocorrência de uma tempestade de qualquer magnitude. Entretanto, é necessária uma amostragem maior de eventos de ressaca para o estabelecimento de um modelo, considerando ainda a influência de fenômenos climáticos, como o El Niño e La Niña, na periodicidade mensal de tempestades. Por exemplo, como demonstra Klumb-Oliveira (2024), Pereira e Klumb-Oliveira (2015) verificaram que anos de La Niña apresentaram um aumento gradual da altura das ondas, enquanto que, em anos de El Niño, a altura de ondas diminuiu. Carvalho, Dalbosco e Guerra (2020) registraram uma frequência ligeiramente superior de tempestades em anos de El Niño.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS

Este trabalho visou identificar e examinar o grau de vulnerabilidade à ocorrência de impactos decorrentes de ressacas do mar na orla municipal do Rio de Janeiro, além da resiliência de alguns pontos nessa área. Revelou-se que 46,92% das praias do Rio de Janeiro, conhecidas por seus valores turísticos, possuem graus de vulnerabilidade entre médio-alto a alto.

Entretanto, o estudo de caso demonstrou que a maioria dos perfis demonstraram alta capacidade de recuperação após os impactos da ressaca. O único perfil diferente dessa condição foi capaz de resistir aos impactos da ressaca por estar bem alimentado anteriormente. Da mesma forma, a aplicação do IRC foi capaz de confirmar a condição resiliente dos pontos aqui analisados.

Portanto, a área de estudo, ao mesmo tempo que denota boa capacidade de recuperação após tempestades, sofre com recorrentes danos em sua orla. A antropização do perfil praial, nesse sentido, revela-se como o principal agravante da vulnerabilidade física ao posicionar construções na faixa móvel da praia e, por conseguinte, promovendo a ocorrência de danos a essas estruturas. Dada essa condição, é esperado que essas construções impediriam a movimentação natural dos perfis por funcionarem como barreiras à dinâmica completa e natural do sistema praial. Para a área de estudo isso ainda não é verdade, principalmente em vista das mesmas capacidades de recuperação nos dois arcos praiais aqui analisados. Apesar disso, o arco LIA, além de apresentar uma maior variabilidade da linha de costa, apresentou menores médias de IRC. Logo, esse ainda é um trecho de atenção necessária, visto as tendências de diminuição ao longo do tempo da largura, volume e IRC, e o aumento da tendência de intensidade dos eventos de tempestade e da ocupação antrópica na orla da praia.

Dessa forma, outros agentes e processos são apontados como fornecedores de carga sedimentar a esses trechos, como a capacidade de formação de bancos arenosos na antepraia durante e antes da tempestade, que funcionam como estoque de sedimentos para o perfil. Os processos de transporte sedimentar transversal e longitudinal são pivôs para que essa alimentação ocorra. Além disso, por ser um trecho costeiro totalmente influenciado pela energia das ondas, onde não há grandes cargas fluviais sendo ali depositadas, as ondas de tempo bom, após a ocorrência das ressacas, também possuem grande influência nesse processo.

Uma das possíveis aplicações dos índices aqui utilizados é a identificação de indicadores-chave para a criação de um sistema de alerta antecipado para impactos de

tempestades, além de subsidiar decisões sobre intervenções voltadas à erosão costeira. Para isso, devem ser implementados monitoramento em tempo real das praias antes de eventos de ressaca, possibilitando a adoção de uma abordagem dupla, comparando condições médias com dados em tempo real. Isso pode aprimorar as previsões de impactos e facilitar a identificação de áreas vulneráveis que demandam ação imediata durante eventos extremos.

A continuidade do monitoramento da área de estudo é crucial para o desenvolvimento de novos trabalhos em uma metrópole costeira como o Rio de Janeiro, principalmente em um cenário de discussões sobre mudanças climáticas em voga. Como sugestão de trabalhos futuros, recomenda-se a verificação da influência de anomalias climáticas, como o El Niño e La Niña, na taxa de impactos nos trechos e sua posterior recuperação. Além disso, a realização de novos monitoramentos para os outros arcos praiais abordados no IVP é desejada.

Por fim, este estudo ressalta a urgência de incorporar avaliações de vulnerabilidade costeira em estruturas formais de gestão, como o Projeto Orla e o Plano Municipal de Gerenciamento Costeiro, que ainda não foram implementados no Rio de Janeiro. Além disso, sua integração ao plano diretor da cidade é essencial para fortalecer a gestão costeira sustentável e garantir a resiliência dessas áreas no longo prazo.

REFERÊNCIAS

ABREU, J. J. **Transporte sedimentar longitudinal e morfodinâmica praial: exemplo do litoral norte de Santa Catarina.** 2011. 484 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Fiolosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

ADGER, W. N. *et al*. New indicators of vulnerability and adaptive capacity. **Technical Report 7**. p. 34 – 41. 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257343107_New_Indicators_of_Vulnerability_and_Adaptive_Capacity. Acesso em: 11 nov. 2024.

ALEXANDRAKIS, G.; POULOS, S. E. An holistic approach to beach erosion vulnerability assessment. **Scientific Reports**, s/l: Nature, n. 4, ed. 6078, p. 1 – 8, 2014. Disponível em: https://www.nature.com/articles/srep06078. Acesso em: 10 ago. 2022.

ALPACA-CHACÓN, C. M. *et al*. Updated review of longshore sediment transport: advantages, disadvantages, and comparisons using a satellite image methodology. **Journal of Marine Science and Engineering**, MDPI, v. 12, n. 9, 1660, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/jmse12091660. Acesso em: 8 fev. 2025.

ANDRADE, T. S.; SOUSA, P. H. G. D. O.; SIEGLE, E. Vulnerability to beach erosion based on a coastal processes approach. **Applied Geography**, s/l, v. 102, p. 12-19, 2019. DOI: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.11.003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143622817313127?via%3Dihub. Acesso em: 19 out. 2022.

APÓS reforma, Rio Águas disse que calçadão era ‘à prova de ressaca’. G1 Rio, Rio de Janeiro, 05 de mai. de 2016. Disponível em: https://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2016/05/apos-reforma-rio-aguas-disse-que-calcadao-era-prova-de-ressaca.html. Acesso em: 20 dez. 2022.

BATTJES, J. A. Surf similarity. **Coastal Engineering Proceedings**, *[S. l.]*, v. 1, n. 14, p. 466 - 480, 1974. DOI: 10.9753/icce.v14.26. Disponível em: https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/article/view/2921.. Acesso em: 18 jun. 2023.

BIRD, E. **Coastal Geomorphology**: An Introduction. 2ª Ed. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, 2008. 411p.

BULHÕES, E. M. R. Condições morfodinâmicas associadas a afogamentos: contribuição à segurança nas praias oceânicas da cidade do Rio de Janeiro. **Sociedade & Natureza**, v. 22, p. 121-140, 2010.

BULHÕES, E. M. R. **Condições morfodinâmicas associadas a riscos aos banhistas: contribuição à segurança nas praias oceânicas da cidade do Rio de Janeiro, RJ**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Curso de Geografia, Programa de Pós-graduação em Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro. 2006.

BULHÕES, E. M. R. **Exposição de Praias, Clima de Ondas e Processos Litorâneos em Praias de Enseada: Exemplos e Aplicações em Armação dos Búzios, Rio de Janeiro, Brasil.** 2010. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia e Geofísica Marinha, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica Marinha, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.

BUSH, D. M. *et al*. Utilization of geoindicators for rapid assessment of coastal- hazard risk and mitigation. **Ocean & Coastal Management**, v. 42, n. 8, p. 647–670, 1999.

CARVALHO, B. C.; DALBOSCO, A. L. P.; GUERRA, J. V. Shoreline position change and the relationship to annual and interannual meteo-oceanographic conditions in Southeastern Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 235, 2020. doi: 10.1016/j.ecss.2020.106582.

CARVALHO, B. C. *et al*. 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**, v. 25, p. 1 – 16, 2021.

CARVALHO, B. C.; GUERRA, J. V. Coastal vulnerability of Rio de Janeiro shoreline (SE Brazil) due to natural and social impacts. **Journal of Coastal Research**, v. 95, p. 759-763, 2020. doi: 10.2112/SI95-148.1.

CARVALHO, B. C.; GUERRA, J. V. Estudo das mudanças na linha de costa e vulnerabilidade costeira associada no litoral sul do Rio de Janeiro (SE Brasil). **Revista Cartográfica**, n. 107, p. 11-34, 2023. DOI: 10.35424/rcarto.i1070.2421. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2663-39812023000200011&lng=es&nrm=iso. Acesso em: 24 dez. 2024.

CARVALHO, B. C. **Variabilidade da resposta da linha de costa aos condicionantes hidrodinâmicos e às oscilações do nível do mar no litoral sul fluminense**. 2019. 192 f. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

DALPHINET, A. *et al*. Product User Manual for Global Ocean Wave Analysis and Forecasting Product - GLOBAL_ANALYSISFORECAST_WAV_001_027. **Mercator Ocean International**, Toulouse, versão 1.4, p. 1-23, 2023. Disponível em: https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-GLO-PUM-001-027.pdf. Acesso em: 15 dez. 2023.

DE SERIO, F. *et al*. How to define priorities in coastal vulnerability assessment. **Geosciences**, v. 8, n. 11, art. 415, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/geosciences8110415. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-3263/8/11/415. Acesso em: 15 mai. 2024.

DIAS, G. T. M. Introdução. *In*: MUEHE, D. (Org.). **Panorama da Erosão Costeira no Brasil**. Brasília: MMA, 2018. p. 7-10.

DIAS, G. T. M.; KJERFVE, B. Barrier and beach ridge systems of the Rio de Janeiro coast. *In*: DILLENGURG, S. R.; HESP, P. (eds). **Lecture Notes in Earth Sciences**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. p. 225-252. doi: 10.1007/978-3-540-44771-9_7.

DISSANAYAKE, P. *et al*. Effects of storm clustering on beach/dune evolution. **Marine Geology**, v. 370, p. 63–75, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.10.010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025322715300505. Acesso em: 17 jan. 2025.

DOLAN, R.; DAVIS, R. E. An intensity scale for Atlantic coast northeast storms. **Journal of Coastal Research**, v. 8, p. 840-853, 1992.

DONG, Z. *et al*. Quantifying beach and dune resilience using the coastal resilience index. **Coastal Engineering Proceedings**, n. 36, p. 30-30, 2018.

EMERY, K. O. A simple method of measuring beach profiles. **Limnology and Oceanography**, v. 6, p. 90–93, 1961. DOI: https://doi.org/10.4319/lo.1961.6.1.0090.

FERNANDEZ, G. B. *et al.* Impactos morfológicos e resiliência das praias do litoral Rio de Janeiro: referência especial à morfodinâmica praial. *In:* PAULA, D.P.; DIAS, J.A.D. (Orgs). **Ressacas do mar/temporais e gestão costeira**. Fortaleza: 1 ed.: Premius, 2015. 448p. ISBN: 978-85-7924-440-7.

FILHO, S. R. O.; SANTOS, R. A.; FERNANDEZ, G. B. Erosão e recuperação de praias refletivas de alta energia impactadas por ondas de tempestade geradas por ciclone tropical. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, p. 289-312, 2020. doi: 10.20502/rbg.v21i2.1455.

Global Ocean Waves Reanalysis - GLOBAL_REANALYSIS_WAV_001_032. **E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS)**. Marine Data Store (MDS), 2025. DOI: 10.48670/moi-00022. Acesso em: 10 jan. 2025.

Global Ocean Waves Analysis and Forecast - GLOBAL_ANALYSISFORECAST_WAV_001_027. **E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS).** Marine Data Store (MDS), 2025. DOI: 10.48670/moi-00017. Acesso em: 10 jan. 2025.

GORNITZ, V. Global coastal hazards from future sea level rise. **Global and Planetary Change**, v. 3, n. 4, p. 379-398, 1991.

GORNITZ, V.; WHITE, T. W.; CUSHMAN, R. M. Vulnerability of the East coast, U.S.A. to future sea level rise. **Journal of Coastal Research**, v. 9, p. 201–237, 1990.

HOLMAN, R A. Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. **Coastal Engineering**, v. 9, n. 6, p. 527-544, 1986.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Faces de logradouros do estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=recortes_para_fins_estatisticos/malha_de_setores_censitarios/censo_2010/base_de_faces_de_logradouros_versao_2021>. Acesso em: 13 out. 2022.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades.** Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/panorama. Acesso em: 29 jan. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha das Unidades Federativas do Brasil.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 10 jan. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha municipal do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022b. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 10 jan. 2024.

IPCC. **Climate change 2023: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. In: LEE, H.; ROMERO, J. (eds.). Geneva: IPCC, 2023. 184 p. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

KLUMB-OLIVEIRA, L. The climatology and classification of coastal storms on the Southeastern coast of Rio de Janeiro State, Brazil. **Ocean and Coastal Research**, v. 72, p. 1-17, 2024. doi: 10.1590/2675-2824072.23081.

KOMAR, P. D. **Beach Processes and Sedimentation.** 2. ed. New Jersey: Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1998. 544 p. ISBN: 9780137549382.

KOMAR, P. D.; MILLER, M. C. The threshold of sediment movement under oscillatory water waves. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 43, p. 1101-1110, 1973.

KUMAR, T. S. *et al*. Coastal Vulnerability Assessment for Orissa State, East Coast of India. **Journal of Coastal Research**, West Palm Beach, Florida, ed. 26, n. 3, 2010, p. 523-534.

LAW-CHUNE, S. Product User Manual For the Global Ocean Wave Multi Year product - GLOBAL_MULTIYEAR_WAV_001_032. **Mercator Ocean International**, Toulouse, versão 1.3, p. 1-20, 2023. Disponível em: https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-GLO-PUM-001-032.pdf. Acesso em: 15 dez. 2023.

LIMA, R. F.; LINS-DE-BARROS, F. M.; CIRANO, M. Análise das condições meteoceanográficas em eventos de ressaca do mar no litoral do estado do Rio de Janeiro, Brasil no período de 1948 a 2008. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, p. 41726, 2021. doi: 10.11137/1982-3908_2021_44_41726.

LIMA R. F. **Ressacas do mar e seus efeitos no litoral do estado do Rio de Janeiro**. 2022. 142 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

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. 2010. 295 f. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LINS-DE-BARROS, F. M. Integrated coastal vulnerability assessment: A methodology for coastal cities management integrating socioeconomic, physical and environmental dimensions - Case study of Região dos Lagos, Rio de Janeiro, Brazil. **Ocean & Coastal Management**, v. 149, p. 1-11, 2017.

LINS-DE-BARROS, F. M.; KLUMB-OLIVEIRA, L.; LIMA, R. F. 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**, v. 18, n. 2, p. 85-102, 2018. DOI DOI:10.5894/rgci-n146. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328845363_Avaliacao_historica_da_ocorrencia_de_ressacas_marinhas_e_danos_associados_entre_os_anos_de_1979_e_2013_no_litoral_do_estado_do_Rio_de_Janeiro_Brasil.

LINS-DE-BARROS, F. M.; PARENTE-RIBEIRO, L. How Much Is a Beach Worth: Economic Use and Vulnerability to Coastal Erosion: The Case of Ipanema and Arpoador Beaches, Rio de Janeiro (Brazil). *In*: FILHO, W. L.; FREITAS, L. E. de. **Climate Change Adaptation in Latin America**: Managing Vulnerability, Fostering Resilience: Springer, Cham, 2018. cap. 13, p. 207 - 222. ISBN 978-3-319-56946-8. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56946-8_13

LINS-DE-BARROS, F. M.; PAULA, D. P.; SOUSA, P. H. G. O. Vulnerabilidade costeira: conceitos, abordagens e aplicações. In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L. (orgs**.) Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos**. Rio de Janeiro: PGGM, 2020. p. 631-654. ISBN 978-65-992571-0-0

LONGUET-HIGGINS, M. S. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n. 33, p. 6778–6789, 1970. Disponível em: https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=bd72d092c7559ca7ee356544ebb06ff1291e77d0. Acesso em: 25 out. 2024.

MARTIN, L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; VILAS-BOAS, G. S. Primeira ocorrência de corais pleistocênicos da costa brasileira - datação do máximo da penúltima transgressão. **Ciências da Terra**, v. 3, p. 16-17, 1982.

MASSELINK, G.; LAZARUS, E. D. Defining coastal resilience. **Water**, v. 11, n. 12, p. 2587, 2019. doi:10.3390/w11122587.

MAZZER, A. M. **Proposta metodológica para análise de vulnerabilidade da orla marítima à erosão costeira:** aplicação em praias arenosas da costa sudeste da Ilha de Santa Catarina (Florianópolis, Santa Catarina, Brasil). 2007. 169 f. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MCFADDEN, L. Vulnerability analysis: a useful concept for coastal management? *In*: MCFADDEN, L.; NICHOLLS, R.; PENNING-ROWSELL, E. (eds.). **Managing coastal vulnerability**. Oxford: Elsevier, 2007. p. 15-28.

MUEHE, D.; CASTRO, L. B.; ALBINO, J. Perfis de praia: deve o método das Balizas de Emery ser abandonado? **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 21, n. 1, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i1.1725. Disponível em: https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1725. Acesso em: 12 jun. 2022.

MUEHE, D. Erosão costeira - tendência ou eventos extremos? O litoral entre Rio de Janeiro e Cabo Frio, Brasil. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 11, p. 315-325, 2011. doi: 10.5894/rgci282.

MUEHE, D. *et al*. Pulsos erosivos e resposta morfodinâmica associada a eventos extremos na costa leste do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, *[S. l.]*, v. 16, n. 3, 2015. DOI: 10.20502/rbg.v16i3.728. Disponível em: https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/728. Acesso em: 3 jan. 2025.

MUEHE, D. *et al.* Rio de Janeiro. *In:* MUEHE, D. (Org.). **Panorama da Erosão Costeira no Brasil**. Brasília: MMA, 2018, p. 475 – 540.

MUEHE, D. O sistema praial: formas, termos, processos e medição. *In*: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L.S. (orgs.) **Geografia Marinha**: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos. Rio de Janeiro: PGGM, 2020. p. 27-55. ISBN 978-65-992571-0-0

MUEHE, D.; VALENTINI, E. **O Litoral do Estado do Rio de Janeiro**: uma caracterização físico-ambiental. Rio de Janeiro: Ed. FEMAR. 1998, 99 p.

NASCIMENTO, M. X. **Análise das condições meteoceanográficas na região da Bacia de Santos.** 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NEVES, C. F.; *et al*. **Estudo de vulnerabilidades no litoral do Estado do Rio de Janeiro devido às mudanças climáticas**: relatório final. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC, 2007.

NGUYEN, T. T. X *et al*. Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: a review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. **Ocean and Coastal Management**, Wollongong, n. 123, p. 18-43, 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0964569115300715. Acesso em: 2 ago. 2022.

OPPENHEIMER, M. *et al.* Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. *In*: **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. 2019. cap. 4, p. 321 - 445. Disponível em: https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-4-sea-level-rise-and-implications-for-low-lying-islands-coasts-and-communities/. Acesso em: 9 fev. 2021.

PANTUSA, D. *et al*. Application of a Coastal Vulnerability Index. A Case Study along the Apulian Coastline, Italy. **Water**, v. 10, n. 9, p. 1218, 2018. doi:10.3390/w10091218

PATSCH, K. *et al*. Beach sustainability assessment: The development and utility of an interdisciplinary approach to sandy beach monitoring. **Journal of Coastal Research**, v. 37, n. 6, p. 1130-1157, 2021.

PAULA, D. P. **Análise dos riscos de erosão costeira no litoral de Fortaleza em função da vulnerabilidade aos processos geogênicos e antropogênicos**. 2012. 335f. Tese de doutorado (Ciências do Mar, da Terra e do Ambiente / Ramo Gestão costeira) – Universidade do Algarve, UALG, Faro, Portugal, 2012.

PAULA, D. P. Análise histórica das ressacas do mar no litoral de Fortaleza (Ceará, Brasil): origem, características e impactos. *In*: PAULA, D. P. D.; DIAS, J. A. (Org.). **Ressacas do mar/temporais e gestão costeira.** Fortaleza: Premius, 2015. cap. 2. p. 173-201, ISBN: 9788579244407.

PEÑA-ALONSO, C. *et al*. Measuring geomorphological vulnerability on beaches using a set of indicators (GVI): A tool for management. **Journal of Environmental Management**, v. 204, p. 230 -245, 2017. DOI 10.1016/j.jenvman.2017.08.053. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319620100_Measuring_geomorphological_vulnerability_on_beaches_using_a_set_of_indicators_GVI_A_tool_for_management. Acesso em: 13 fev. 2024.

PENA, J. N. **Dinâmica Geomorfológica das Praias Oceânicas Urbanas da Cidade do Rio de Janeiro e Impactos Associados a Ressacas do Mar**: Uma Contribuição à Gestão Costeira. 2017. 147 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

PEREIRA, N. E. S.; KLUMB-OLIVEIRA, L. A. Analysis of the influence of ENSO phenomena on wave climate on the central coastal zone of Rio de Janeiro (Brazil). **Revista de Gestão Costeira Integrada/Journal of Integrated Coastal Zone Management**: APRH, v. 15, ano 2015, n. 3, p. 353-370, 30 mar. 2015. Disponível em: https://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-570_Pereira.pdf. Acesso em: 28 dez. 2024. doi: 10.5894/rgci570

PEREIRA, T. *et al*. Morfodinâmica praial e os episódios erosivos na praia da Macumba, cidade do Rio de Janeiro, RJ. *In*: **Anais do XII Simpósio Nacional de Geomorfologia (SINAGEO)**, 12, 2018, São Paulo. Disponível em: https://www.sinageo.org.br/2018/trabalhos/2/2-248-1646.html. Acesso em: 23 jun. 2023.

PIACESI, P. A. S.; LINS-DE-BARROS, F. M. Dinâmica morfológica do arco praial Leblon-Ipanema-Arpoador (RJ) frente às ressacas do mar entre 2016 e 2024: subsídios à compreensão da vulnerabilidade e resiliência de praias. In: **Anais do VI Simpósio Brasileiro de Geologia & Geofísica Marinha (VI SBGGM)**, 6, 2024, Belém.

PUGH, D. T. **Tides, Surges and Mean Sea-Level**. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1987. 472 p.

RAMIERI, E. *et al*. Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. **ETC CCA Technical Paper**, v. 1, n. 2011, p. 1-93, 2011.

RESSACA destrói parte do calçadão na Barra da Tijuca, Zona Oeste do Rio. **G1 Rio**, Rio de Janeiro, 22 de ago. de 2020. Disponível em: https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2020/08/22/ressaca-destroi-parte-do-calcadao-na-barra-da-tijuca-zona-oeste-do-rio.ghtml. Acesso em: 20 jun. 2024.

RESSACA faz sumir quase toda faixa de areia no Posto 6, em Copacabana. **Extra**, Rio de Janeiro, 05 de jul. de 2018. Disponível em: https://extra.globo.com/rio/ressaca-faz-sumir-quase-toda-faixa-de-areia-no-posto-6-em-copacabana-23139416.html. Acesso em: 11 dez. 2022.

RESSACA na Praia da Macumba provoca novos estragos. **O Globo**, Rio de Janeiro, 24 de out. de 2017. Disponível em: https://oglobo.globo.com/rio/ressaca-na-praia-da-macumba-provoca-novos-estragos-21984406. Accesso em: 01 jun. 2024.

ROGERS, C. M.; KRISTINE, A. J.; GRAVENS, M. **Beach-fx user's manual: version 1.0**. Report No. ERDC/CHL SR-09-6. Vicksburg, MS: Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, 2009. 262 p.

SALLENGER, A. H. Storm Impact Scale for Barrier Islands. **Journal of Coastal Research**, St. Petersburg, FL, EUA, v. 16, n. 3, p. 890-895, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/287588116_Storm_impact_scale_for_barrier_islands.

SGB – Serviço Geológico do Brasil. **Batimetria do Brasil**. 2013. Disponível em: <https://geosgb.sgb.gov.br/downloads/>. Acesso em: 15 out. 2024.

SHARPLES, C. Indicative Mapping of Tasmanian Coastal Vulnerability to Climate Change and Sea-Level Rise: **Explanatory Report**, 2nd Edition; Consultant Report to Department of Primary Industries & Water, Tasmania, 173 pp. 2006.

SHARPLES, C.; MOUNT, R.; PEDERSEN, T. **The Australian Coastal Smartline Geomorphic and Stability Map Version 1**: Manual and Data Dictionary; School of Geography & Environmental Studies, University of Tasmania, 2009.

SHARPLES, C. **The Smartline: An effective Coastal Data Mapping Format**. Apresentado no I Simpósio de Erosão Costeira. Ministério do Meio Ambiente (org.) Recife, 2008.

SILVA, P. L.; LINS-DE-BARROS, F. M. A alimentação artificial da Praia de Copacabana (RJ) após 51 anos: transformações geomorfológicas e dinâmica atual. **Terra Brasilis**, v. 16, p. 1-26, 2021. doi: 10.4000/terrabrasilis.9980.

SILVA, P. L.; LINS-DE-BARROS, F. M. História geomorfológica da Praia de Copacabana ao longo do século XX e análise preliminar da subida do nível do mar. *In*: **Anais do XII Simpósio Nacional de Geomorfologia (XII SINAGEO)**, 12, 2018, São Paulo. Disponível em: https://www.sinageo.org.br/2018/trabalhos/2/2-123-2073.html. Acesso em: 6 jan. 2024.

SOUSA, P. H. G. O.; SIEGLE, E.; TESSLER, M. G. Vulnerability assessment of Massaguaçú Beach (SE Brazil). **Ocean and Coastal Management**, v. 77, p. 23-40, 2013. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0964569112000506. Acesso em: 22 ago. 2023. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2012.03.003.

STOCKDON, H. F. **Predicting the longshore-variable coastal response to hurricanes**. 131 f. 2006. Tese (Doutorado em Filosofia) - Oregon State University, Oregon, 2006.

SUGUIO, K. *et al*. Paleoníveis do mar e paleolinhas de costa. *In*: SOUZA, C. R. G. *et al*. (ed.). **Quaternário do Brasil**. 1. ed. rev. Ribeirão Preto: Holos, Editora, 2008. cap. 7, p. 130 - 152. ISBN 85-86699-47-0.

SUMAN, D. O. Prefácio. *In*: SOUTO, R.D. (org.). **Gestão ambiental e sustentabilidade em áreas costeiras e marinhas**: conceitos e práticas. Vol. 1. Edição da autora. Rio de Janeiro: Instituto Virtual para o Desenvolvimento Sustentável - IVIDES.org, 2020. p. 13 - 21. ISBN: 9786500115314. https://doi.org/10.5281/zenodo.389966

TOMINAGA, L. K. Análise e mapeamento de risco. *In*: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. D. (Org.). **Desastres Naturais:** conhecer para prevenir. 3 ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015. p. 147 - 160.

UNDP - United Nations Development Programme. **Reducing disaster risk**: a challenge for development. New York: Bureau for Crisis Prevention and Recovery, 2004. Disponível em: https://www.undp.org/publications/reducing-disaster-risk-challenge-development. Acesso em: 30 out. 2024.

WENTWORTH, C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **Journal of Geology**, [S. l.]: The University of Chicago Press, ed. 30, n. 5, p. 377-392, 1922. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/30063207?seq=1. Acesso em: 19 out. 2022.

WRIGHT, L. D. *et al*. Modes of cross-shore sediment transport on the shoreface of the Middle Atlantic Bight. **Marine Geology**, Elsevier, v. 96, n. 1-2, p. 19–51, 1991. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002532279190200N. Acesso em: 7 fev. 2025. doi: https://doi.org/10.1016/0025-3227(91)90200-N

WRIGHT, L. D.; SHORT, A. D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. **Marine Geology**, v. 56, p. 93-118, 1984. doi: 10.1016/0025-3227(84)90008-2.