

EROSÃO COSTEIRA NAS PRAIAS DE COPACABANA - LEME, ZONA SUL DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

COASTAL EROSION ON THE BEACHES OF COPACABANA - LEME, SOUTH ZONE OF RIO DE JANEIRO CITY

Karem Moreno de CARVALHO^{1,2}, Willian Cruz GOUVEA JUNIOR^{1,3}, Frederico Maciel Pinheiro Sampaio de MIRANDA^{1,3}, Gabrielle Tavares CARVALHO^{1,3}, João Olavo Paim CYPRIANO^{1,3}, Guilherme Tenório Smith da COSTA^{1,3}, Agenor Cunha da SILVA¹, Daniel FERNANDES¹, João Wagner Alencar CASTRO^{1,2,3}

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro. Museu Nacional. Laboratório de Geologia Costeira, Sedimentologia e Meio Ambiente. Quinta da Boa Vista - Bairro Imperial de São Cristóvão, Rio de Janeiro – RJ.

²Programa de Pós-graduação em Geociências. Quinta da Boa Vista - Bairro Imperial de São Cristóvão, Rio de Janeiro – RJ.

³Programa de Pós-Graduação em Geologia - UFRJ. Avenida Athos da Silveira Ramos, 274, Cidade Universitária - Rio de Janeiro.

E-mails: karemmoreno35@gmail.com; williangouveajr@gmail.com; fredericosampaiodemiranda@gmail.com; gabbytavares2011@hotmail.com; joaoalavoc@gmail.com; guilhermetenoriosc@ufrj.br; fernandes.geol@gmail.com; castro@mn.ufrj.br; prof_agenor@hotmail.br

Introdução
Área de estudos
Material e método
Sensoriamento remoto e geoprocessamento
Análises granulométricas
Resultados
Discussão
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO: A erosão costeira nas praias da Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro é um desafio econômico e ambiental, tendo em vista as mudanças climáticas em curso. A expansão urbana nas últimas seis décadas, alterou a dinâmica do transporte de sedimentos induzido por ondas ao longo desse segmento de litoral. O presente trabalho objetiva analisar o comportamento espaço - temporal da linha de praia na orla de Copacabana - Leme durante sessenta anos. Procedimentos metodológicos, constaram de interpretação de imagens aéreas do acervo militar brasileiro e de sensoriamento remoto, envolvendo, imagens de satélites Maxar Technologies, referentes aos anos de 2002, 2015 e 2024, obtidas pelo software Google Earth Pro. As imagens foram georreferenciadas e organizadas em mosaicos correspondentes a cada período através do software ArcGIS 10.6. Na delimitação da posição da linha de praia, utilizou-se o ArcGIS e a ferramenta DSAS, visando quantificar taxas de recuo e deposição de sedimentos na área investigada. Resultados obtidos sugerem erosão severa na área do Posto 6 (Forte de Copacabana), estabilidade no segmento central e deposição de sedimentos na praia do Leme. Mantidas as condições erosivas, recomenda-se reposição do estoque de sedimentos (engordamento) como medida de proteção da infraestrutura urbana local.

Palavras-chave: Recuo da linha de praia. Dinâmica do transporte de sedimentos. Risco Geológico. Gestão costeira.

ABSTRACT: Coastal erosion on the beaches of South Zone of Rio de Janeiro is an economic and environmental challenge, considering the ongoing climate change. Urban expansion over the last 60 years has altered the dynamics of wave-induced sediment transport along this coastal segment. This study aims to analyze the spatiotemporal behavior of the Copacabana shoreline over sixty years. Methodological procedures consisted of information involving aerial images from the Brazilian military archive and remote sensing data, including Maxar Technologies satellite images from 2002, 2015, and 2024, obtained using Google Earth Pro software. The images were georeferenced and organized into mosaics corresponding to each period using ArcGIS 10.6 software. ArcGIS and the DSAS tool were used to delineate the shoreline position, aiming to quantify the rates of sediment retreat and deposition in the investigated area over the 60 years period. Results obtained suggest severe erosion in the Post 6 area (Copacabana Fort), stability in the central segment, and sediment deposition on Leme beach. If erosive conditions persist, replenishment of the sediment stock (beach nourishment) is recommended as a measure to protect local urban

Keywords: Shoreline retreat. Sediment transport dynamics. Geological hazard. Coastal management.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e a expansão urbana das grandes e médias cidades litorâneas em direção à linha de praia frequentemente aceleram os processos de erosão costeira alterando o suprimento de sedimentos e o fluxo natural das ondas, marés e correntes de deriva litorânea (Gouvea Junior et

al., 2022; Castro et al., 2024). A ação combinada de ondas, marés e correntes em praias submetidas à ocupação urbana exerce um papel determinante na dinâmica do transporte de sedimentos e na manutenção da estabilidade do ambiente praiar. As ondas atuam na retirada ou no aporte de

sedimentos, variando conforme a força e a direção com que atingem a costa. As marés, por sua vez, controlam a variação da linha de praia, ampliando a zona de atuação hidrodinâmica. Já as correntes litorâneas redistribuem o material arenoso ao longo da praia, acarretando muitas vezes déficit sedimentar em determinados trechos (Fernandes e Castro, 2024).

As ondas de tempestade representam um dos fatores naturais mais significativos na variabilidade morfológica da linha de praia a curto e médio prazo. Eventos de alta energia podem mobilizar grandes volumes de sedimentos, desencadeando um rápido transporte transversal de material e recuo da linha de praia episódico (Castro et al., 2025). Em costas muito urbanizadas, como é o caso da praia de Copacabana, onde as barreiras naturais de retenção de sedimentos foram impermeabilizadas pela construção da Avenida Atlântica e calçadão, os impactos da erosão costeira induzida por ressacas são mais pronunciados. Os eventos extremos podem acelerar ainda mais, processos de erosão costeira e inundação marinha sobre a infraestrutura urbana (Gouveia Junior et al., 2024).

As causas do processo erosivo em praias da cidade do Rio de Janeiro relacionam-se principalmente à ação de ondas de tempestade e à passagem de ciclones extratropicais potencializadas pela ocupação urbana do ambiente de pós-praia (Carvalho & Guerra, 2023; Castro et al., 2024). A construção de avenidas e a instalação de equipamentos públicos em áreas submetidas a esses fatores, favorecem a ocorrência de riscos geológicos de diferentes magnitudes, traduzidos em erosão costeira, inundações marinhas, além de destruição da infraestrutura urbana local (Castro et al., 2025).

O processo de urbanização desse segmento do litoral carioca nos últimos oitenta anos através da

construção de avenidas, calçadas e ciclovias interrompeu em diversos segmentos da área investigada a dinâmica natural do transporte de sedimentos induzido por ondas e correntes de deriva litorânea (Castro et al., 2024). A alta concentração urbana sobre a pós-praia impede a adaptação da linha de costa a eventos de alta energia. Durante o outono e o inverno, caracterizado pelo aumento da intensidade e frequência das ondas, ocorrem episódios severos de erosão costeira e perdas patrimoniais (Castro et al., 2025).

Amplos recursos financeiros dos governos federal e estadual foram alocados para a urbanização da orla carioca por meio da recuperação de praias e proteção costeira (Castro et al., 2024). Antes do aterro, a praia de Copacabana encontrava-se em processo de erosão costeira acelerada devido a fortes ondas de tempestades que atingiam edifícios e infraestrutura urbana local. Em 1965, a Prefeitura do Rio de Janeiro – PMRJ, contratou o Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC / Portugal para realizar estudos de viabilidade através de modelo reduzido para alimentação artificial (Angulos, 2021; Castro et al., 2024). Em 1971 a nova praia de Copacabana foi inaugurada com o alargamento da faixa de praia em 80 m em direção à zona de arrebentação das ondas. Nascia, assim, um dos maiores ícones do turismo do litoral brasileiro. O presente trabalho objetiva quantificar as taxas de erosão e de deposição de sedimentos na área investigada em uma escala decadal. Para tanto, o processamento e a análise espacial de imagens de satélite e fotografias aéreas foram realizados no software ArcGIS 10.6, utilizando a extensão Digital Shoreline Analysis System (DSAS), desenvolvida pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), que permitiu o cálculo estatístico das variações da linha de costa.

ÁREA DE ESTUDOS

A área investigada localiza-se na enseada de Copacabana - Leme, na Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro. A morfologia caracteriza-se por uma enseada limitada pelos promontórios do Leme e Forte de Copacabana. A linha de praia é de aproximadamente 4,15 km com orientação geral Nordeste - Sudoeste (Figura 1). Nos últimos 60 anos, registrou-se processos de erosão costeira em diversos trechos desse segmento de litoral, comprometendo a infraestrutura urbana, recrea-

tiva e econômica da área (Castro et al., 2025)

As praias arenosas, caracterizadas por diferentes propriedades granulométricas, limitam-se nos extremos por afloramentos de gnaiss facoidal da Suíte Rio de Janeiro (Mansur et al., 2008). A morfodinâmica do ambiente de enseada apresenta estágios que variam de dissipativos a intermediários, conforme a classificação de Wright e Short (1984), com uma antepraia (zona de surf) de gradientes suaves e largura moderada a estreita.

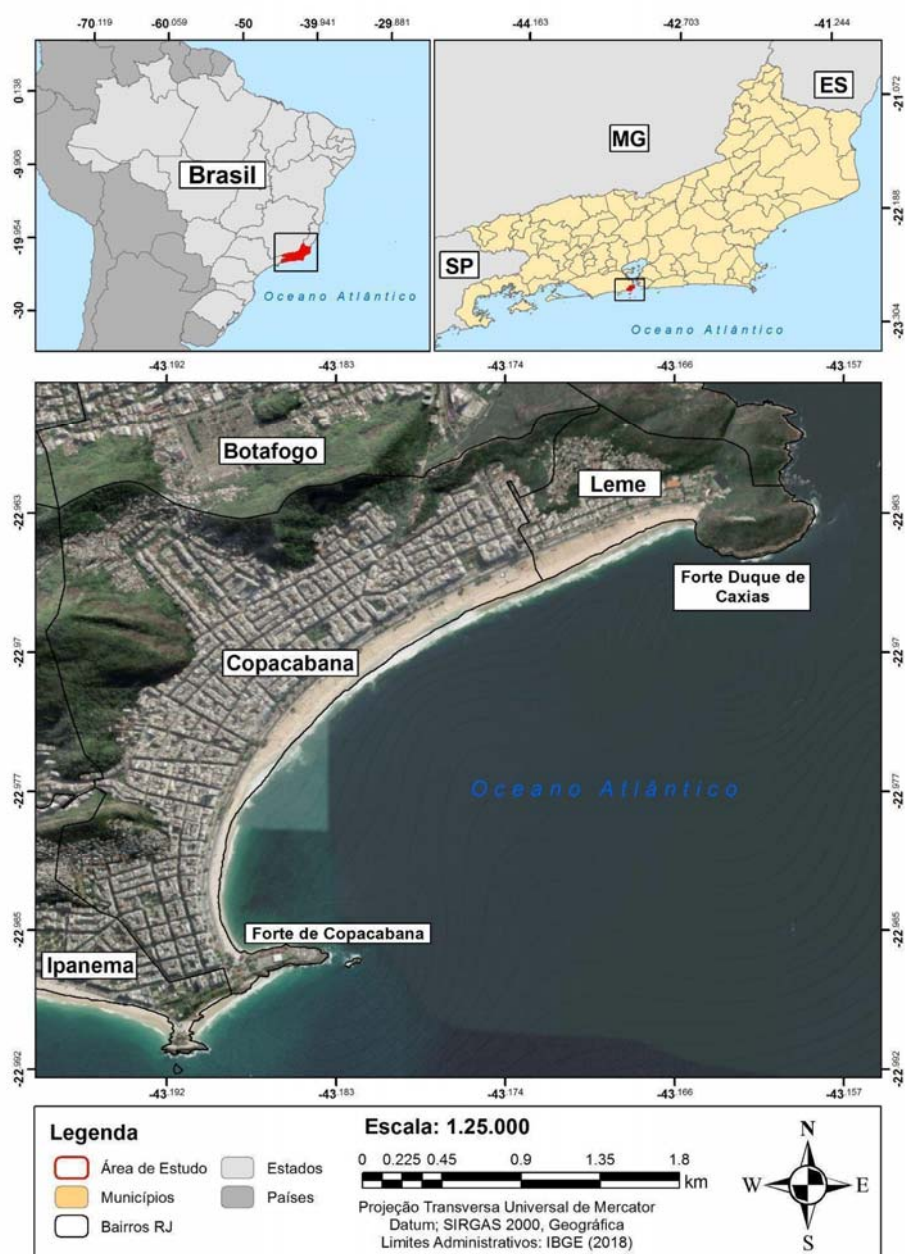


Figura 1 - Localização da área investigada no contexto da Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro.

Durante o outono e o inverno, a passagem de sistemas frontais provenientes de sudoeste gera eventos de ressacas com alturas das ondas na arrebentação superiores a 2,5 m (Castro et al., 2024; Fernandes & Castro, 2024; Gouveia Junior & Castro, 2024; Castro et al., 2025).

A área investigada caracteriza-se por regimes de micro-maré e clima de ondas proveniente do quadrante sul com ondulações de sudoeste e sudeste. Durante a primavera e o verão, as ondas são menos esbeltas, favorecendo a recomposição do perfil morfológico de praia erodido durante os eventos de ressacas (Castro et al., 2025). Conforme o trabalho realizado por Pinho et al., (2023) as ressacas no litoral da cidade do Rio de Janeiro são responsáveis pelas maiores taxas de transporte longitudinal de sedimentos, induzidos

por ondas.

A praia de Copacabana - Leme é fortemente influenciada por agentes oceanográficos, meteorológicos, geológicos e antrópicos que moldaram a configuração morfológica e urbana da linha de costa nos últimos 80 anos exigindo intervenções estruturais para conter o avanço do mar e a degradação da infraestrutura local (Castro et al., 2024). Historicamente, a área investigada passou por profundas alterações morfológicas e antrópicas destacando-se o engordamento artificial de praia em 80 m e a duplicação da Avenida Atlântica. Essas modificações alteraram profundamente o perfil de equilíbrio da praia e, conseqüentemente, a dinâmica do transporte de sedimentos induzidos por ondas (Kowsmann, 1970; Vera-Cruz, 1972; Abreu, 1987).

MATERIAIS E MÉTODO

As principais técnicas empregadas para o desenvolvimento da pesquisa envolveram a aquisição e tratamento de imagens em diferentes datas (tabela 1 e 2), coleta de sedimentos, preparação e análise das amostras em laboratório. O levantamento bibliográfico reuniu informações de artigos, teses e dissertações. Procedimentos adotados envolveram a análise de imagens de sensoriamento remoto, correspondente a 60 anos e a interpretação de seis (6) amostras de sedimentos de praia, com suporte de informações contidas na literatura.

Sensoriamento remoto e geoprocessamento

Os procedimentos metodológicos basearam-se no processamento de fotografias aéreas analó-

gicas e imagens de satélite digitais, ambas com alta resolução espacial de 0,5 a 1,0 m. As fotografias aéreas do acervo militar brasileiro foram obtidas através de levantamentos aerofotogramétricos realizados nos voos AST10 (1964-1967) e FAB/DRM (1976). Utilizou-se imagens do satélite da Maxar Technologies, sensores QuickBird e WorldView-1, referentes aos anos de 2002, 2015 e 2024 na plataforma Google Earth Pro, visando calcular as taxas de variações da linha de costa durante 60 anos. Todos os produtos cartográficos foram compatibilizados no Sistema de Coordenadas Projetadas, Datum SIRGAS 2000, fuso 22S (Tabela 1).

Tabela 1 - Especificações das imagens de sensoriamento remoto constando informações sobre satélite, sensores, órbita, datas e horas de aquisição, alturas e período de maré, e RMSE (*Root Mean Squared Error*). Fonte: Google Earth Pro e BNDO – Banco Nacional de Dados Oceanográficos.

SATÉLITE	SENSOR	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m)	ÓRBITA	DATA	HORA	ALTURA DE MARÉ (m)	RMSE (m)	MARÉ
Maxar	QuickBird	0,5	Heliossíncrona 450 km	24/09/2002	9h00	1,85 m	0,40	Sizígia
Maxar	WorldView-1	0,5	Heliossíncrona 490 km	29/10/2015	9h20	1,85 m	0,30	Quadratura
Maxar	WorldView-1	0,5	Heliossíncrona 490 km	28/02/2024	9h10	1,95 m	0,30	Sizígia

As especificações das fotografias aéreas utilizadas na pesquisa sobre a enseada de Copacabana - Leme, encontram-se detalhadas na Tabela 2. A relação inclui a resolução espacial, as datas de aquisição e o Erro Médio Quadrático

(RMSE) obtido pelo georreferenciamento. As fotografias aéreas de 1964 e 1976, constituem os registros históricos da série temporal, apresentando resolução espacial de 1,0 m e RMSE de 1,5 m após o processo de ortorretificação.

Tabela 2 - Especificações das imagens de sensoriamento remoto constando informações sobre voo, datas e RMSE (*Root Mean Squared Error*). Fontes: Imagens do Acervo Militar Brasileiro (1964 e 1976).

VOO	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m)	DATA	RMSE
AST10	1,0 m	29/11/1964	1,5 m
FAB-DRM	1,0 m	- / - / 1976	1,5 m

A análise temporal da variação da linha de praia é um dos indicadores mais utilizados em pesquisas relacionadas a risco geológico em zonas costeiras (Carvalho et al., 2020; Gouvea Junior et al., 2022). As imagens aéreas utilizadas neste estudo foram georreferenciadas por meio do método de triangulação descrito por Richards (2022). O processo envolveu a utilização de pontos de controles em solo (*Ground Control Points* - GCPs), identificados em elementos estáveis, entre estes, avenidas e edificações, visíveis nas imagens do mapa base (*basemap*) do ArcGIS. Nessa análise, utilizou-se o software ArcGIS 10.6 para identificação e delimitação das linhas de praia, adotando-se como indicador o registro

máximo de espreamento das ondas (*High Water Line* - HWL), descrito por Boak e Turner (2005). Selecionou-se o referido indicador por representar o limite hidrodinâmico extremo sobre o perfil praiar, permitindo assim, aferir variações morfológicas em direção *onshore*.

As taxas de erosão e acreção de sedimentos foram calculadas através do *plug-in* Digital Shoreline Analysis System (DSAS), versão 5.0, período de 1964 a 2024. Os parâmetros adotados no DSAS, incluíram:

- Linha de base: posicionada a cerca de 300 m da praia, servindo como referência para os cálculos a serem obtidos.
- Transectos: traçados perpendiculares à

linha de base com espaçamento de 30 m entre si, permitindo a interseção com as diferentes linhas de praia ao longo do tempo. O espaçamento entre os transectos foi definido de modo a garantir a ortogonalidade em relação à linha de costa, evitando a sobreposição (*overlap*) de vetores nas extremidades da enseada, onde a curvatura acentuada poderia gerar redundância estatística e distorções dos resultados do LRR.

- Pontos de interseção: local de tangência dos transectos com as linhas de praia, utilizados para medir taxas de acreção e erosão.

As taxas de variação de linha de praia foram calculadas através da ferramenta DSAS no software ArcGIS. Aplicou-se os métodos *Linear Regression Rate* - LRR com objetivo de calcular a variação da faixa de praia em m /ano,

correspondente ao período entre 1964 a 2024 (Himmelstoss et al., 2018; Gouveia Junior & Castro, 2024). A precisão da delimitação da linha de praia, relaciona-se ao menor erro médio quadrático de georreferenciamento das imagens em RMSE e condições oceanográficas correspondentes ao dia e horário da aquisição dos dados pelo satélite (Castro et al., 2024; Gouveia Junior & Castro, 2024).

Análises granulométricas

Procedimentos de campo envolveram, coleta de sedimentos entre os Postos 5 (Copacabana) e Posto 1 (Leme) na orla costeira investigada. As amostras, em um total de seis (6), foram coletadas no dia 06 de junho de 2024 em condições de maré baixa na face de praia (*shoreface*) e na pós-praia (*backshore*), conforme figura 2.

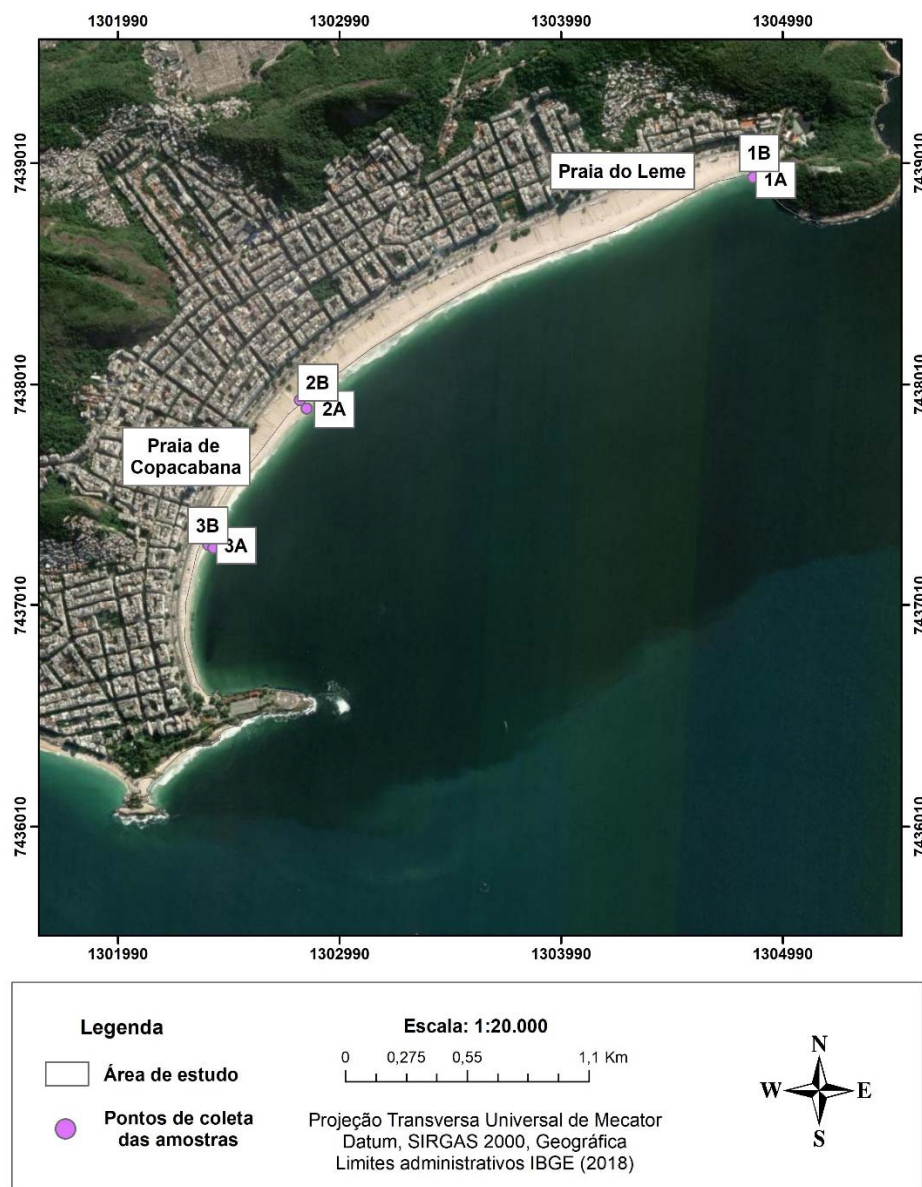


Figura 2 - Localização dos pontos de coleta das amostras de sedimentos de praia na enseada, Copacabana - Leme, Zona Sul da Cidade do Rio de Janeiro – RJ. Os pontos em cor amarela representam os locais de coleta, nomeados de “1, 2 3A” face da praia e “1,2,3B” na pós-praia.

A coleta das amostras visou identificar as propriedades granulométricas, associadas às características morfodinâmicas do ambiente praial. Foram posteriormente processadas no Laboratório de Geologia Sedimentar do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.

Em laboratório, as amostras foram lavadas com água destilada em bquer de 500 ml até a remoção de sais solúveis, confirmada pela coloração branca com nitrato de prata (AgNO_3). Foram secas em estufa a 60°C por 24 horas, desagregadas com rolo de madeira e quarteadas até obter 30 gramas. Para a remoção dos carbonatos, adicionou-se 30 ml de ácido clorídrico (HCl), seguido por repouso

de 12 horas e nova secagem. A diferença de peso, quantificou o material bioclástico presente. O peneiramento foi realizado com jogo de peneiras por 15 minutos. Em laboratório foram removidos os sais e carbonatos presentes em cada amostra com água corrente e água oxigenada.

A classificação granulométrica, seguiu protocolos estabelecidos por Wentworth (1922). As propriedades físicas dos sedimentos incluíram: Diâmetro mediano do grão (D^{50}), que reflete a granulometria predominante no ambiente praial e grau de seleção (σ), que avalia a uniformidade dos tamanhos de grão, conforme os métodos de Folk e Ward (1957).

RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir da aplicação do método *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) visaram analisar o comportamento da linha de praia (*shoreline*) da área investigada no intervalo espaço - temporal entre 1964 e 2024 através de 138 transectos perpendiculares à costa. A análise identificou áreas em processo de erosão, estabilidade e deposição de sedimentos ao longo de diferentes segmentos da área investigada.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos das taxas de deslocamento da linha de praia ao longo da enseada Copacabana - Leme, entre 1964 e 2024

(60 anos). Os dados obtidos sugerem processos de acreção de sedimentos no segmento central da praia de Copacabana, entre os transectos 42 e 101, onde registrou-se progradação da linha de praia em aproximadamente 35,0 m durante o período analisado. De acordo com o método de Regressão Linear (*Linear Regression Rate* - LRR), a taxa média anual de progradação da linha de praia foi de 0,58 m/ano, ou seja, 35 m / 60 anos. A progradação da linha de costa em direção à zona de arrebenção das ondas, apresentou picos de até 0,75 m/ano no segmento central da enseada investigada.

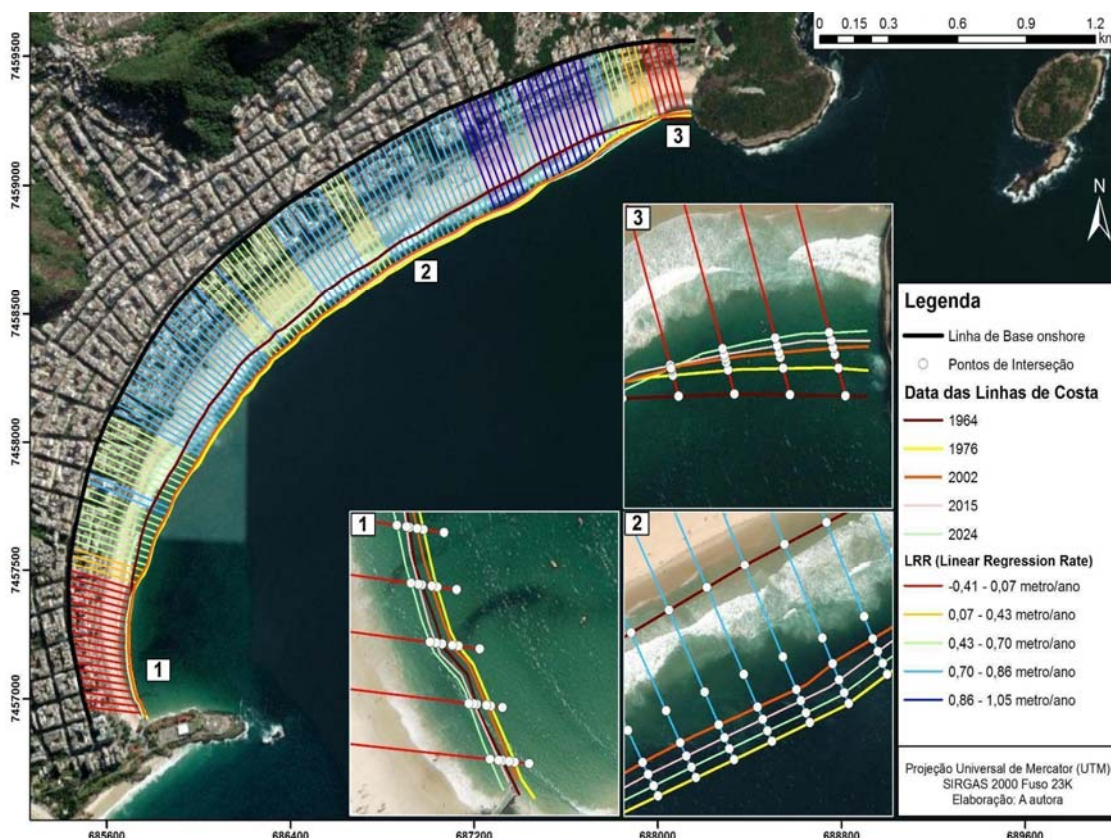


Figura 3 - Resultados obtidos através do método DSAS em 60 anos na área da enseada Copacabana – Leme, Zona Sul do Rio de Janeiro.

No segmento correspondente à praia do Leme, transectos 102 a 138, verificou-se progradação da linha de praia em aproximadamente 15,0 m em direção à zona de arrebentação das ondas ao longo dos 60 anos analisados. A taxa média anual de acreção de sedimentos, calculada pelo método LRR, foi de 0,25 m/ano, ou seja, 15,0 m / 60 anos. Especificamente no transecto 108, localizado no segmento central da enseada, verificou-se taxa de progradação de 0,85 m/ano. Em contraste, no extremo nordeste correspondente a praia do Leme, transectos 134 a 138, registrou-se processos ero-sivos na ordem de 0,5 m/ano (figura 3).

Na área correspondente ao Posto 6 da praia de Copacabana entre os transectos 1 a 41, verificou-se recuo da linha de praia (erosão) na ordem de 10,0 m durante o intervalo de 60 anos. A taxa anual de recuo da linha de praia é de 0,20 m/ano. A retrogradação da linha de praia é representada

por valores negativos de LRR na ordem de - 0,20 m/ano no segmento correspondente ao transecto 3. A média geral de LRR nesse segmento é na ordem de -0,05 m/ano, equivalente a uma taxa de recuo médio de 2,5 m em 60 anos. A figura 3 apresenta todas as informações obtidas, mostrando em coloração vermelha os valores de LRR entre - 0,40 e - 0,10 m/ano (processos erosivos). Em azul, registram-se processos de acreção de sedimentos na ordem de 0,70 a 0,86 m e em verde áreas de estabilidade.

A figura 4 apresenta as taxas de regressão linear – LRR (*Linear Regression Rate*) obtidas através do método DSAS do Serviço Geológico dos Estados Unidos. Dados obtidos permitem visualizar as variações espaciais das taxas de erosão, estabilidade e deposição de sedimentos ao longo dos 138 transectos analisados, destacando áreas de recuo de linha de praia (vermelho) e progradação da linha de praia (azul).

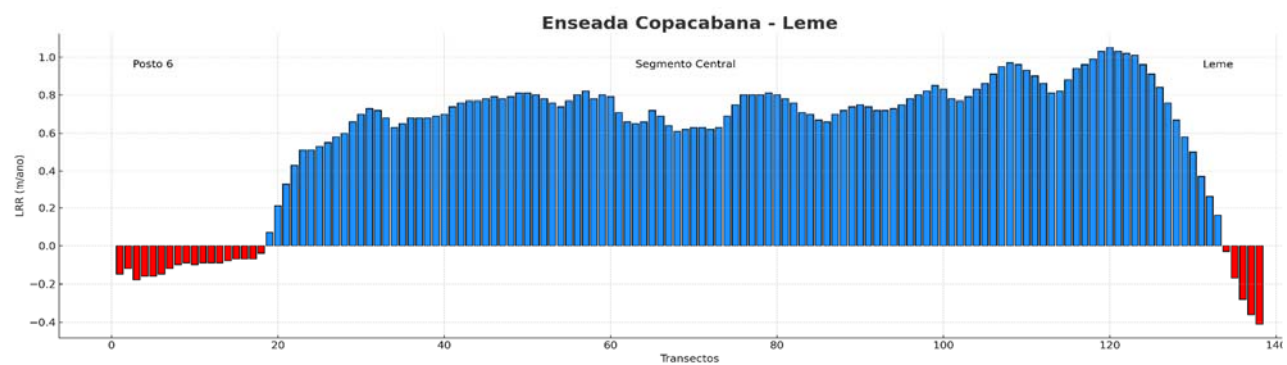


Figura 4 - LRR (*Linear Regression Rate*) obtido através do método DSAS, destacando as áreas em erosão e deposição de sedimentos.

Dados sobre propriedades granulométricas dos sedimentos são apresentados através da tabela 3. As propriedades físicas dos sedimentos envolvem o diâmetro mediano do grão (D^{50} , em Phi), grau de seleção (σ), assimetria (Sk), curtose

e coordenadas para cada ponto de coleta.

Os resultados estatísticos indicam padrões distintos de granulometria, seleção e distribuição das amostras na enseada Copacabana - Leme, Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro.

Tabela 3 - Coordenadas (*Coordinate System Geographic Datum SIRGAS 2000*) e resultados dos parâmetros estatísticos referentes ao diâmetro mediano do grão (D^{50}), grau de seleção (σ) e classificação das amostras do segmento entre os bairros de Leme e Copacabana - Cidade do Rio de Janeiro.

LOCALIZAÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE	D_{50} (Phi)	σ	SK	KURTOSIS
Leme (1A)	22°57'48.79"S	43°9'59.42" W	1,246	0,415	-0,028	1,163
Leme (1B)	22°57'47.14"S	43°9'59.73" W	1,055	0,593	-0,065	1,029
Copacabana (Posto 3) (2A)	22°58'25.69"S	43°11'3.879"W	1,430	0,506	0,003	1,004
Copacabana (Posto 3) (2B)	22°58'24.46"S	43°11'5.36"W	1,476	0,490	-0,022	1,010
Copacabana (Posto 5) (3A)	22°58'45.56"S	43°11'18.92"W	1,818	0,448	0,066	1,089
Copacabana (Posto 5) (3B)	22°58'45.46"S	43°11'19.38"W	1,933	0,543	0,189	1,386

A tabela 4 apresenta as coordenadas geográficas referentes ao Sistema de Coordenadas Geográficas Datum SIRGAS 2000, UTM Zona 23. São apresentados o diâmetro mediano do grão (D^{50}) em mm, o grau de seleção (σ) e declividade das praias referentes a área investigada.

Os resultados granulométricos da Enseada de

Copacabana - Leme revelam padrão de areias médias, com diâmetro mediano (D^{50}) variando entre 0,26 mm e 0,47 mm. Quanto ao grau de seleção (σ) das amostras foram classificadas predominantemente como moderadamente selecionadas. A declividade da face da praia apresentou valores entre 2° a 7°.

Tabela 4 - Coordenadas (Coordinate System Geographic Datum SIRGAS 2000) UTM Zona 23 e resultados dos parâmetros estatísticos referentes ao diâmetro mediano do grão (D^{50}), grau de seleção (σ), e classificação das amostras do segmento entre os bairros de Copacabana e Leme – Cidade do Rio de Janeiro.

AMOSTRAS	COORDENADAS		D^{50} (mm)	D_{50}	GRAU DE SELEÇÃO (σ)	DECLIVIDADE
1A	687972 E	7459341 S	0,42	Areia Média	Moderadamente Selecionado	2°
1B	687964 E	7459392 S	0,47	Areia Média	Mal Selecionado	-
2A	686122 E	7458229 S	0,37	Areia Média	Mal Selecionado	7°
2B	686080 E	7458267 S	0,35	Areia Média	Mal Selecionado	-
3A	685686 E	7457623 S	0,28	Areia Média	Moderadamente Selecionado	5,5°
3B	685673 E	7457626 S	0,26	Areia Média	Mal Selecionado	-

DISCUSSÃO

Dados obtidos sobre os processos relacionados à erosão, estabilidade e deposição de sedimentos na área investigada corroboram informações contidas em estudos históricos realizados por Vera-Cruz (1972) e trabalhos mais recentes (Pinho et al., 2023; Castro et al., 2024; Castro et al., 2025). Resultados referentes ferramenta Digital *Shoreline Analysis System* (DSAS) objetivaram analisar o comportamento morfológico da linha de praia (*shoreline*) no intervalo espaço – temporal entre 1964 - 2024 através de 138 transectos perpendiculares à costa. Identificou áreas em processo de erosão, estabilidade e deposição de sedimentos ao longo de diferentes segmentos analisados. As informações de modo geral, aproximam-se dos resultados obtidos por Castro et al., (2025).

A resolução espacial das imagens de satélite 0,5 a 1,0 m, associada ao RMSE de 1,5 m apresenta resultados compatíveis com o rigor estatístico necessário para validar taxas de variação da linha de praia obtidas em escala década (Gouveia Junior et al., 2024). Essa precisão metodológica permitiu constatar que a dinâmica de transporte de sedimentos na enseada investigada não é uniforme, apresentando setores de progradação que divergem de segmentos erosivos. Esses resultados corroboram dados obtidos por Castro et al. (2024, 2025). O ajuste morfológico da praia investigada relaciona-se

principalmente ao engordamento artificial, concluído em 1971, onde registra-se acresção de sedimentos no setor central da enseada, enquanto nas extremidades verificou-se maior vulnerabilidade ao recuo da linha de praia durante eventos de ressaca (Vera-Cruz, 1972).

Dados obtidos pelo método DSAS, sugerem variabilidade espacial significativa na área da enseada Copacabana - Leme nos últimos 60 anos. No Posto 6, transectos 1 a 41, nas imediações do Forte de Copacabana, verificou-se recuo da linha de praia. Resultados aqui apresentados corroboram dados obtidos por Castro et al., (2025) versando sobre o impacto das mudanças climáticas e riscos geológicos nas praias da cidade do Rio de Janeiro.

No segmento central da área investigada, correspondente aos transectos 42 a 101, verificou-se uma tendência de estabilidade sedimentar através da acreção de sedimentos. O processo de progradação da linha de praia relaciona-se ao ajuste morfológico decorrente do engordamento artificial, concluído em 1971 (Angulo, 2021). As informações obtidas nesse trabalho sugerem uma redistribuição eficiente de sedimentos por correntes de retorno principalmente no segmento central da enseada, estabelecendo, assim, estágios morfo-dinâmicos intermediários a dissipativos, conforme modelo proposto por Wright e Short (1984). Essa configuração de proteção parcial, conferida pelos

promontórios rochosos e ilhas costeiras adjacentes, favorece a retenção de sedimento no segmento central minimizando as perdas de material arenoso decorrentes do transporte litorâneo longitudinal durante eventos de moderada a alta energia (Castro et al., 2024, 2025).

A estabilidade no segmento central, contrasta com os processos erosivos registrados nas extremidades da enseada, especificamente no extremo sudoeste entre os Postos 5 e 6 e no extremo nordeste referentes ao Posto 1 na praia do Leme. O processo erosivo nessas extremidades da praia deve-se principalmente a ausência de reposição de sedimentos durante o projeto de engordamento artificial realizado em 1971 pelo antigo governo do Estado da Guanabara (Vera-Cruz, 1972; Pinho et al., 2023; Castro et al., 2025).

Os dados obtidos de modo geral corroboram estudos desenvolvidos por Castro et al., (2025) quanto aos processos erosivos associados à intensificação de frentes frias provenientes do quadrante sul (S) e sudoeste (SSW) durante o outono e inverno. Esses eventos de tempestades

atingem diretamente a infraestrutura da Avenida Atlântica através de inundações marinhas (Carvalho & Guerra, 2023; Castro et al., 2024).

De acordo com os resultados obtidos sobre as propriedades físicas dos sedimentos de praia, verificou-se que o diâmetro mediano do grão (D^{50}) é constituído por areia média com declividades na face da praia na ordem de 5° . Em condições de baixa ou média energia (bom tempo) esses sedimentos são mantidos na praia. Por ocasião de eventos de tempestades (ressacas) parte desses sedimentos são remobilizado para zona de arrebenção, retornando-os à praia em condições de bom tempo (Wright e Short, 1984). Quanto ao grau de seleção (σ) verificou-se que amostras coletadas se apresentam como moderadamente a mal selecionadas, decorrentes de diferentes energias do agente transportador (Folk e Ward, 1957). Diante desse cenário de vulnerabilidade, faz-se necessário a adoção de medidas de mitigação, envolvendo projetos de engordamento artificial principalmente entre os Postos 5 e 6 (Pinho et al., 2023; Castro et al., 2025).

CONCLUSÕES

De acordo com os dados obtidos através de fotografias aéreas analógicas e imagens de satélite digitais de diferentes datas, inseridas no contexto espaço - temporal de 60 anos, complementadas por análises das propriedades físicas dos sedimentos, chegou-se às seguintes conclusões sobre as condições de risco geológico na área investigada:

Constatou-se tendência de processo erosivo mais acentuado no extremo sudoeste, correspondente aos Postos 5 e 6. No segmento central da enseada, verificou-se estabilidade sedimentológica e no extremo nordeste, referente ao Posto 1, registrou-se processos predominantemente

deposicionais. Verificou-se a importância de implementar projetos localizados de engordamento artificial de praia no segmento correspondente ao extremo sudoeste da área investigada, visando mitigar o processo de erosão costeira em curso.

Resultados obtidos contribuem para uma compreensão abrangente da dinâmica do transporte de sedimento, envolvendo erosão, estabilidade e deposição de material arenoso na enseada Copacabana - Leme. Nesse contexto, a pesquisa fornece subsídios para o gerenciamento de riscos geológicos em áreas costeiras submetidas a processos erosivos e inundações marinhas decorrentes de ondas de tempestades.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio financeiro para o desenvolvimento dessa pesquisa. Ao Laboratório de Geologia Costeira, Sedimentologia & Meio Ambiente / LAGECOST do Museu Nacional – UFRJ e ao Laboratório de Geologia Sedimentar / LAGESED do Departamento de Geologia – UFRJ pelo suporte logístico no desenvolvimento desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M.A. *Evolução urbana no Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: IPLANRIO - Zahar, 1987.
- ANGULOS. **50 anos de inauguração da Nova Copacabana**. *Revista do CREA* - Rio de Janeiro online. <https://angulos.crea-rj.org.br/50-anos-da-inauguracao-da-nova-copacabana>, 2021.
- BOAK, E.H. & TURNER, I.L. *Shoreline Definition and Detection: A Review*. University of New South Wales, 2005. DOI: 10.2112/03-0071.1.
- 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.
- 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, p.

- 106582, 2020.
- CASTRO, J. W. A.; GOUVEA JUNIOR, W. C.; FERNANDES, D.; CABRAL, C. L.; COSTA, G. T. S.; SAMPAIO DE MIRANDA, F. M. P.; SERRANO, J. S.; CARVALHO, K. M.; LIMA JUNIOR, S. B. Impacts of climate change on coastal erosion and marine flooding in Rio de Janeiro city, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, p. 105680, 2025. Disp. em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105680>.
- CASTRO, J.W.A.; FERNANDES, D.; GOUVEA JUNIOR, W.C.; MIRANDA, F.M.P.S.; MIGUEL, L.L.A.J. Comments on Palanisamy et al. (2024) "Spatio-temporal analysis of shoreline changes and future forecast using remote sensing, GIS and Kalman filter model: A case study of Rio de Janeiro, Brazil". **Journal of South American Earth Sciences**, p. 104844, 2024.
- COUTINHO, N.M. **Erosão e deposição de sedimentos no arco de praia da Barra da Tijuca-Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro-RJ**. Rio de Janeiro, 2007. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- FERNANDES, D. & CASTRO, J.W.A. Longshore sediment transport rate in Formosa Bay, Rio de Janeiro State-Southeast Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, p. 104834, 2024.
- FOLK, R.L. & WARD, W.C. Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters. **SEPM Journal of Sedimentary Research**, v. 27, n. 1, p. 3-26, 1957. DOI: 10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D.
- GOUVEA JUNIOR, W.C. & CASTRO, J.W.A. Morphological variations and erosion of beaches in central segment of the state of Rio de Janeiro: remote sensing using techniques and grain size parameters. **Geociências**, v. 43, n. 4, p. 633-644, 2024.
- GOUVEA JUNIOR, W.C.; FERNANDES, D.; CASTRO, J.W.A. Análise das variáveis físicas e dinâmicas do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) na enseada da Baía Formosa, Região dos Lagos Fluminense, Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 4, p. 1812-1833, 2022.
- HIMMELSTOSS, E.A.; HENDERSON, R.E.; KRATZMANN, M.G.; FARRIS, A.S. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 User Guide**. U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1179, 110 p., 2018.
- KOWSMANN, R. Variações de curto e longo prazo de um perfil da praia de Copacabana, Rio de Janeiro. **Instituto de Pesquisa da Marinha**, n. 39, 1970.
- MANSUR, K.L.; CARVALHO, I.S.; DELPHIM, C.F.M.; BARROSO, E.V. O gnaiss facoidal: a mais carioca das rochas. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 31, n. 2, p. 9-22, 2008.
- PINHO, D.S.; SILVA, R.A.G.; ROSMAN, P.C.C. Análise de solução para estabilizar a morfologia da praia na região do Posto 6 em Copacabana-RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 25, 2023, São Paulo. **Resumos Expandidos...** São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2023.
- RICHARDS, J.A. Remote sensing digital image analysis. 5. ed. Berlin: Springer, 2022.
- VERA-CRUZ, D. Artificial Nourishment of Copacabana Beach. In: COASTAL ENGINEERING, 13th. 1972. Khaskhachikh. **Proceedings...** Khaskhachikh: 1972, Chapter 80.
- WENTWORTH, C.K. A Scale of grade and class terms for clastic sediments. **Journal of Geology**, v.30, p. 377-392, 1922.
- WRIGHT, L.D. & SHORT, A.D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. **Journal of Marine Geology**, v. 56, n. 1-4, p. 93-118, 1984.

*Submetido em 10 de setembro de 2025
Aceito para publicação em 13 de março de 2026*