



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Oceanografia

Marcia Carolina de Oliveira Costa

**Análise da estabilidade em planta e dinâmica de praias do Rio de Janeiro:
um estudo de caso nas praias de Copacabana, Macumba e Grumari (Rio de
Janeiro – Brasil)**

Rio de Janeiro

2020

Marcia Carolina de Oliveira Costa

Análise da estabilidade em planta e dinâmica de praias do Rio de Janeiro: um estudo de caso nas praias de Copacabana, Macumba e Grumari (Rio de Janeiro – Brasil)

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Processos Oceanográficos na Interface Continente-Oceano.

Orientadora: Prof.^a Dra. Josefa Varela Guerra

Coorientadora: Prof.^a Dra. Flávia Moraes Lins de Barros

Rio de Janeiro

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/CTCC

C837 Costa, Marcia Carolina de Oliveira.
Análise da estabilidade em planta e dinâmica de praias do Rio de Janeiro: um estudo de caso nas praias de Copacabana, Macumba e Grumari (Rio de Janeiro – Brasil) / Marcia Carolina de Oliveira Costa.– 2020.
115 f. : il.

Orientadora: Josefa Varela Guerra.

Coorientadora: Flávia Moraes Lins de Barros.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Oceanografia.

1. Praias - Rio de Janeiro (RJ) - Teses. 2. Dinâmica costeira - Teses. 3. Geomorfologia - Teses. 4. Ecologia costeira – Rio de Janeiro (RJ) - Teses. 5. Erosão de praias – Teses. I. Guerra, Josefa Varela. II. Barros, Flávia Moraes Lins de. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Oceanografia. IV. Título.

CDU: 551.46(815.3)

Bibliotecária Responsável: Priscila Freitas Araujo/ CRB-7: 7322

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Marcia Carolina de Oliveira Costa

Análise da estabilidade em planta e dinâmica de praias do Rio de Janeiro: um estudo de caso nas praias de Copacabana, Macumba e Grumari (Rio de Janeiro – Brasil)

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Processos Oceanográficos na Interface Continente-Oceano.

Aprovada em 27 de novembro de 2020.

Orientadora: Prof.^a Dra. Josefa Varela Guerra
Faculdade de Oceanografia - UERJ
Coorientadora: Prof.^a Dra. Flávia Moraes Lins de Barros
Instituto de Geociências- UFRJ

Banca Examinadora: _____
Prof. Dr. Alexandre Macedo Fernandes
Faculdade de Oceanografia - UERJ

Prof. Dr. Marcos Nicolás Gallo
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof.^a Dra. Breylla Campos Carvalho
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Rio de Janeiro

2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Mariana, que trouxe doçura ao significado de futuro.
E a Maria Ducarmo Freitas da Costa, minha voinha, meu amor, meu exemplo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha primeira família, que me nutriu enquanto eu ainda não conseguia caminhar com minhas próprias pernas e que ainda me nutre quando fraquejo no caminhar. Em especial a meu pai, Antônio Carlos, por acreditar em sonhos, e a voinha, Maria Ducarmo, por me ensinar dessas coisas de se amar mais para sofrer menos: “pessoas bonitas nunca ficam feias”; “saudade sempre vai existir, porque a gente se ama”, “vá viver sua vida, ganhe o mundo”. Obrigada por ser meu primeiro exemplo de mulher forte.

Muito obrigada a minha segunda família: os amigos. Vocês foram e são essenciais para a minha caminhada. Nesse sentido, preciso agradecer a tia Vânia Vasconcelos e tio André Barros por me ensinar que o amor não tem lógica nem biológica. Tia Vânia acreditou quando eu não acreditava e eu serei eternamente grata por isso. Agradeço a minha amiga Hanna (Banana) Vasconcelos, por ainda ser, depois de tantos anos, meu centro de alta pressão, ou como ela diz, “a calma antes e após o caos”. Agradeço a Dona Eloísa, Seu Alípio, Erika e Ivenis, os quais me acolheram em meus primeiros passos no Rio de Janeiro e acreditaram nesse sonho comigo. Agradeço ao meu querido professor da monografia José Maria Landim Dominguez, que me deu bastante apoio e as ferramentas necessárias para iniciar essa nova jornada longe de seu ninho.

Aos amigos que fiz na UERJ, muito obrigada pelo acolhimento. Em especial, agradeço a Carol Lyra por dividir tantos campos e conversas, trazendo leveza a nova trajetória que iniciei no Rio, obrigada pela sua generosidade e companheirismo. Agradeço também a Luana Riscado, Douglas Fraga, Dan e Breylla. Ainda da UERJ, agradeço aos professores das disciplinas que dividiram seus conhecimentos e enriqueceram o meu caminho. Em especial, agradeço a minha orientadora, Josefa Guerra pelo acolhimento, liberdade criativa e direcionamentos – obrigada por acreditar que seria possível. Agradeço também a minha coorientadora Flávia Lins-de-Barros. Obrigada também a Charline Dalinghaus e ao Prof Dr Antonio Klein da UFSC, por todo o apoio relacionado ao SMC-Brasil.

Aos amigos de fora das paredes da UERJ, muito obrigada a Talita (Talis) por me ajudar com o meu português tão poético e pouco preciso; e Marta (Martita) por me ajudar a desvendar a programação; e a Kamila (Kami) pelo “calma, gurial!”. Agradeço aos meus colegas da OceanPact – Carlos Leandro, Leo, Victor e Rogério por toda a compreensão e apoio nessa fase final de conclusão da dissertação. Em especial, agradeço a Leo, pela sensibilidade em perceber que eu precisava de ajuda (e perceber a dificuldade que tenho em

pedir esta ajuda!) – obrigada pelo empréstimo dos livros sobre como desenvolver escrita acadêmica e matemática.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a sorte que me encontra, o amor que me alimenta e a proteção que rodeia – obrigada, Deus.

Olho d'água, beira de rio
Vento, vela a bailar
Barcarola do São Francisco
Me leve para o mar
(...)
Era quem sabe a esperança
Indo a outro lugar
Barcarola do São Francisco
Velejo agora no mar
Sem leme, mapa ou tesouro
De prata ou luar
Geraldo Azevedo

RESUMO

COSTA, Marcia Carolina de Oliveira. **Análise da estabilidade em planta e dinâmica de praias do Rio de Janeiro**: um estudo de caso nas praias de Copacabana, Macumba e Grumari (Rio de Janeiro – Brasil). 2020. 115 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

As praias de Copacabana, Macumba e Grumari (Rio de Janeiro – Brasil) exibem características distintas em relação ao nível de intervenção humana, à orientação da linha de costa e à geomorfologia. Assim, o objetivo desse estudo foi analisar a estabilidade costeira dessas praias no Rio de Janeiro, utilizando uma metodologia que avalie a estabilidade da sua forma em planta e aspectos relacionados à dinâmica costeira. Foram avaliadas as seguintes variáveis: clima de ondas; o fluxo de energia das ondas quebrando na praia (EF); o transporte longitudinal de sedimentos (LST); a variação da linha de costa (VLCO) e quão próxima do ângulo da forma em planta de equilíbrio estático a linha de costa média da praia se encontra (qcosta). A análise das informações compiladas revelou a identificação de quatro zonas de estabilidade na praia de Copacabana: a zona 1 que representa uma região estável, relativamente protegida da energia das ondas; a zona 2, uma região mais instável, evidenciando aumento de VLCO e EF e diminuição de LST médio; a zona 3, considerada mais estável, indicando uma região de menor variação na largura da faixa de areia; e a zona 4, uma região instável com elevados valores de EF. Na praia da Macumba foram identificadas quatro zonas com base na classificação de estabilidade: na zona 1, onde a instabilidade é principalmente atribuída aos elevados valores de EF e VLCO; a zona 2, uma região mais estável, evidenciando células de convergência e divergência do LST; na zona 3 é observada a presença de uma célula de convergência do LST, no entanto a presença do afloramento da Pedra da Macumba nesse local, atua em alguns momentos aprisionando sedimentos resultando em erosão; a zona 4 é uma região de alta instabilidade causada principalmente pelo \square costa, VLCO e LST médio. Em Grumari, foram identificadas três zonas: a zona 1 é geralmente estável, exibindo uma célula de convergência do LST; a zona 2 abrangendo uma região relativamente instável; e a zona 3 é uma região bastante instável, onde o VLCO desempenha um papel crucial nessa classificação. Este trabalho mostrou que ao longo de uma mesma praia, diferentes fatores podem ser responsáveis pela instabilidade costeira observada. Além disso, praias localizadas em regiões próximas podem estar sujeitas a diferentes condições contribuindo para a instabilidade observada em cada uma delas. De maneira geral, nas praias analisadas, a orientação da forma em planta, em conjunto com outros parâmetros, mostrou-se um indicador eficaz de estabilidade, evidenciando uma tendência de valores mais elevados de \square costa em regiões consideradas instáveis. Além disso, as avaliações de estabilidade costeira devem considerar não apenas a dinâmica da zona costeira, mas também a herança geológica observada em cada local.

Palavras-chave: estabilidade costeira; dinâmica costeira; forma em planta de praias arenosas.

ABSTRACT

COSTA, Marcia Carolina de Oliveira. **Stability analysis of beach planform and dynamics in Rio de Janeiro**: a study case on the beaches of Copacabana, Macumba, and Grumari (Rio de Janeiro – Brazil). 2020. 115 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

The beaches of Copacabana, Macumba, and Grumari (Rio de Janeiro – Brazil) exhibit distinct characteristics regarding the level of human intervention, coastline orientation, and geomorphology. The objective of this study is to analyze the coastal stability of these beaches in Rio de Janeiro, using a methodology that assesses the stability of their planform and aspects related to coastal dynamics. The following variables were evaluated: wave climate; the energy flux of breaking waves on the beach (EF); longitudinal sediment transport (LST); variation in the coastline (VLCO); and how close the average coastline angle is to the angle of the static equilibrium planform (α_{costa}). The analysis of compiled information revealed the identification of four stability zones in Copacabana beach: zone 1 representing a stable region, relatively protected from wave energy; zone 2, a more unstable region, showing an increase in VLCO and EF and a decrease in average LST; zone 3, considered more stable, indicating a region with less variation in the width of the beach; and zone 4, an unstable region with high EF values. In Macumba beach, four stability zones were identified based on the stability classification: zone 1, where instability is mainly attributed to high EF and VLCO values; zone 2, a more stable region, showing cells of convergence and divergence of LST; in zone 3, the presence of a convergence cell of LST is observed, but the presence of the Macumba Rock outcrop in this location acts at times trapping sediments, resulting in erosion; zone 4 is a region of high instability caused mainly by α_{costa} , VLCO, and average LST. In Grumari, three zones were identified: zone 1 is generally stable, displaying a convergence cell of LST; zone 2 covering a relatively unstable region; and zone 3 is a highly unstable region, where VLCO plays a crucial role in this classification. This study demonstrated that along the same beach, different factors can be responsible for observed coastal instability. Additionally, beaches located in nearby regions may be subject to different conditions contributing to the instability observed in each of them. Overall, in the analyzed beaches, the planform orientation, combined with other parameters, proved to be an effective indicator of stability, highlighting a trend of higher α_{costa} values in regions considered unstable. Furthermore, evaluations of coastal stability should consider not only the dynamics of the coastal zone but also the geological inheritance observed at each location.

Keywords: coastal stability; coastal dynamics; planform of sandy beaches.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Esquema mostrando as principais feições de uma praia encaixada entre promontórios.....	23
Figura 2 –	Área de estudo.....	25
Figura 3 –	Imagem do Google Earth da praia de Copacabana do dia 30 de junho de 2018.....	26
Figura 4 –	Imagem do Google Earth da praia da Macumba, na qual é possível ver o Morro do Pontal, a Pedra da Macumba e o Canal de Sernambetiba.....	27
Figura 5 –	Imagem do Google Earth mostrando a praia de Grumari, bem como a localização das ilhas das Palmas e das Pecas.....	28
Figura 6 –	Definição do esboço da forma em planta através da equação da espiral logarítmica. E diferença entre a espiral do modelo logarítmico e o formato real da praia.....	32
Figura 7 –	Esboço esquemático definindo as variáveis da equação 3.....	33
Figura 8 –	Esboço esquemático do modelo de Moreno e Kraus (1999).....	35
Figura 9 –	Esboço esquemático exemplificando a metodologia do SMC-Brasil.....	40
Figura 10 –	Fluxograma da metodologia executada neste trabalho.....	43
Figura 11 –	Divisão de setores na praia de Copacabana.....	44
Figura 12 –	Divisão de setores na praia da Macumba.....	44
Figura 13 –	Divisão de setores na praia de Grumari.....	45
Figura 14 –	Datas das imagens do Google Earth que foram utilizadas na análise de linha de costa.....	46
Figura 15 –	Esboço mostrando o cálculo da VLCO e da LCO MÉDIA, a partir de diferentes LCO).....	46
Figura 16 –	Carta náutica 1511 usada para obtenção das cotas batimétrica na praia de Copacabana.....	47
Figura 17 –	Cartas náuticas 1620 e 23100 disponíveis para a região oceânica adjacente as praias da Macumba e de Grumari.....	47
Figura 18 –	Pontos onde foram coletados dados batimétricos nas praias da Macumba e Grumari.....	48

Figura 19 – Registro da coleta de dados batimétricos utilizando ecobatímetro de mão.....	49
Figura 20 – Resultado da batimetria das praias da Macumba e Grumari após a união de cotas batimétricas coletadas e compiladas de cartas náutica....	49
Figura 21 – Localização dos pontos de coleta de sedimentos na praia de Copacabana e da divisão de setores nesta praia.....	50
Figura 22 – Localização dos pontos de coleta de sedimentos na praia da Macumba (Carvalho, 2019) e da divisão de setores nesta praia.....	51
Figura 23 – Localização dos pontos de coleta de sedimentos na praia de Grumari e da divisão de setores nesta praia.....	52
Figura 24 – Metodologia para propagação dos casos de ondas para águas rasas no SMC-Brasil.....	53
Figura 25 – Localização dos pontos DOW em cada uma das praias.....	53
Figura 26 – Malhas utilizadas para propagação dos casos de ondas até a costa.....	55
Figura 27 – Mapa batimétrico mostrando a localização das boias RJ-3 e RJ-4 do SiMCosta e do ponto DOW selecionado em Copacabana.....	56
Figura 28 – Esboço demonstrando a relação entre a q_s , a LCO MÉDIA e o q_{costa} ..	58
Figura 29 – Rosa direcional de H_s no ponto DOW de Copacabana e rosas direcionais sazonais neste ponto.....	62
Figura 30 – Série temporal de H_s (m) das boias do SiMCosta RJ-3 e RJ-4.....	64
Figura 31 – Comparação entre as rosas de ondas das boias do SiMCosta RJ-3 e RJ-4 e o ponto DOW da Praia de Copacabana.....	65
Figura 32 – Percentual de ocorrência de direções de ondas nas boias RJ-3 e RJ-4...	66
Figura 33 – Esquerda: Gráfico com os resultados de EF e θ_{EF} nos setores da praia de Copacabana. Direita: mapa mostrando a distribuição dos valores de EF na praia de Copacabana de acordo com os percentis.....	67
Figura 34 – Rosa de ondas de H_s na arrebentação em cada um dos setores da praia de Copacabana.....	68
Figura 35 – Gráficos mostrando o LSTR e o somatório do módulo de todos os LSTs entre 1948 e 2008 em cada um dos setores de Copacabana.....	69
Figura 36 – Esquerda: gráfico com o resultado do $LST_{MÉDIO}$ na praia de Copacabana. Direita: zonas de convergência e divergência do LST na praia de Copacabana e distribuição dos valores de LST de acordo com	

	os percentis 20, 50 e 80.....	71
Figura 37 –	Gráfico mostrando os valores de VLCO na praia de Copacabana.....	72
Figura 38 –	Mapa mostrando as LCOs, $LCO_{MÉDIA}$ e a distribuição dos valores de VLCO na praia de Copacabana de acordo com os percentis.....	73
Figura 39 –	Gráfico mostrando os valores de q_{costa} na praia de Copacabana.....	74
Figura 40 –	Mapa mostrando a distribuição dos valores de q_{costa} na praia de Copacabana de acordo com os percentis.....	74
Figura 41 –	Mapa final de estabilidade costeira da praia de Copacabana.....	76
Figura 42 –	Valores de EF, VLCO, q_{costa} e $LST_{MÉDIO}$ da praia de Copacabana normalizados entre 0 e 1 em cada um dos setores.....	76
Figura 43 –	Rosa direcional de Hs no ponto DOW da praia da Macumba e rosas direcionais sazonais neste ponto.....	78
Figura 44 –	Esquerda: Gráfico com os resultados de EF e θ_{EF} nos setores da praia da Macumba. Direita: mapa mostrando a distribuição dos valores de EF na praia da Macumba de acordo com os percentis.....	80
Figura 45 –	Rosa de ondas de Hs na arrebentação em cada um dos setores da praia da Macumba.....	81
Figura 46 –	Gráficos mostrando o LSTR e o somatório do módulo de todos os LSTs entre 1948 e 2008 em cada um dos setores da Macumba.....	82
Figura 47 –	Esquerda: gráfico com o resultado do $LST_{MÉDIO}$ na praia da Macumba. Direita: zonas de convergência e divergência do LST na praia da Macumba e distribuição dos valores de LST de acordo com os percentis 20, 50 e 80.....	84
Figura 48 –	Gráfico mostrando os valores de VLCO na praia da Macumba.....	85
Figura 49 –	Mapa mostrando as LCOs, $LCO_{MÉDIA}$ e a distribuição dos valores de VLCO na praia da Macumba de acordo com os percentis.....	86
Figura 50 –	Imagens do Google Earth onde é possível ver diferentes momentos de LCO principalmente nos setores B, B2, G, G2, L e L2.....	86
Figura 51 –	Gráfico mostrando os valores de q_{costa} na praia da Macumba.....	87
Figura 52 –	Mapa mostrando a distribuição dos valores de q_{costa} na praia da Macumba de acordo com os percentis.....	88
Figura 53 –	Mapa final de estabilidade costeira da praia da Macumba.....	89
Figura 54 –	Valores de EF, VLCO, q_{costa} e $LST_{MÉDIO}$ da praia da Macumba	

	normalizados entre 0 e 1 em cada um dos setores.....	90
Figura 55 –	Rosa direcional de Hs no ponto DOW da praia de Grumari e rosas direcionais sazonais neste ponto.....	91
Figura 56 –	Esquerda: Gráfico com os resultados de EF e θ_{EF} nos setores da praia de Grumari. Direita: mapa mostrando a distribuição dos valores de EF na praia de Grumari de acordo com os percentis.....	93
Figura 57 –	Rosa de ondas de Hs na arrebentação em cada um dos setores da praia de Grumari.....	94
Figura 58 –	Gráficos mostrando o LSTR e o somatório do módulo de todos os LSTs (LST_{TOTAL}) entre 1948 e 2008 nos setores da praia de Grumari...	95
Figura 59 –	Esquerda: gráfico com o resultado do $LST_{MÉDIO}$ na praia de Grumari. Direita: zonas de convergência e divergência do LST na praia de Grumati e distribuição dos valores de LST de acordo com os percentis 20, 50 e 80.....	97
Figura 60 –	Gráfico mostrando os valores VLCO na praia de Grumari.....	98
Figura 61 –	Mapa mostrando as LCOs, $LCO_{MÉDIA}$ e a distribuição dos valores de VLCO na praia de Grumari de acordo com os percentis.....	98
Figura 62 –	Imagem do Google Earth da praia de Grumari em diferentes momentos mostrando uma larga faixa de areia nos setores de K a M2 no dia 11 de abril de 2002 e um outro momento em que não há faixa de praia nesses setores no dia 02 de maio de 2016.....	99
Figura 63 –	Gráfico mostrando o valor de qcosta nos setores da praia de Grumari...	100
Figura 64 –	Mapa mostrando a distribuição dos valores de qcosta na praia de Grumari de acordo com os percentis.....	100
Figura 65 –	Mapa final de estabilidade costeira da praia de Grumari.....	101
Figura 66 –	Valores de EF, VLCO, qcosta e $LST_{MÉDIO}$ da praia de Grumari normalizados entre 0 e 1 em cada um dos setores.....	102
Figura 67 –	Imagem da praia de Copacabana no dia 09/06/2015 onde é mostrada uma região adjacente ao promontório do Forte de Copacabana, entre os setores A e D, protegida do ataque de ondas.....	104
Figura 68 –	Esquerda: praia de Copacabana no dia 03 de agosto de 2015. Direita: praia de Copacabana no dia 25 de agosto de 2017.....	105
Figura 69 –	Gráfico mostrando a relação entre o VLCO e o θ_{costa} nas praias	

estudadas em cada um dos setores.....	107
Figura 70 – Gráfico mostrando a relação entre o LST_{TOTAL} e o θ_{costa} nas praias estudadas em cada um dos setores.....	107
Figura 71 – Imagens das praias de Copacabana.....	109
Figura 72 – Imagem da praia da Macumba onde são mostradas plumas de sedimentos perpendiculares a costa.....	110
Figura 73 – Imagem da praia de Grumari onde são mostradas plumas de sedimentos perpendiculares a costa.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Valores de D_{50} nos pontos 1, 2, 3 e 4 da praia de Copacabana.....	50
Tabela 2 –	Valores de D_{50} nos pontos 1, 2, 3 e 4 da praia da Macumba.....	51
Tabela 3 –	Valores de D_{50} nos pontos 1, 2, 3 e 4 da praia de Grumari.....	52
Tabela 4 –	Fonte dos parâmetros utilizados como entrada para aplicação do modelo de Gainza et al. (2018).....	58
Tabela 5 –	Relatório de altura significativa de ondas (H_s) obtido do SMC-Brasil para o ponto DOW selecionado na praia de Copacabana.....	35
Tabela 6 –	Percentual de direções de ondas na boia RJ-3, com os percentis 50, 75 95 e 99 de H_s de cada uma dessas direções.....	61
Tabela 7 –	Percentual de direções de ondas na boia RJ-4, com os percentis 50, 75 95 e 99 de H_s de cada uma dessas direções.....	63
Tabela 8 –	Resultado do $LST_{MÉDIO}$, $LSTR$ e o somatório dos valores de LST para o período de 1948 a 2008 na praia de Copacabana.....	70
Tabela 9 –	Relatório de altura significativa de ondas (H_s) obtido do SMC-Brasil para o ponto DOW selecionado na praia da Macumba.....	78
Tabela 10 –	Resultado do $LST_{MÉDIO}$, $LSTR$ e o somatório dos valores de LST para o período de 1948 a 2008 na praia da Macumba.....	83
Tabela 11 –	Relatório de altura significativa de ondas (H_s) obtido do SMC-Brasil para o ponto DOW selecionado na praia de Grumari.....	91
Tabela 12 –	Resultado do $LST_{MÉDIO}$, $LSTR$ e o somatório dos valores de LST (LST_{TOTAL}) para o período de 1948 a 2008 na praia de Grumari.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2DH	Duas dimensões horizontais
AECID	Agência Internacional de Cooperação da Espanha
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
C0	Coefficiente 0
C1	Coefficiente 1
C2	Coefficiente 2
Cf	Coefficiente de arrasto
Cg	Celeridade de grupo
COPLA	Modelo de correntes devido à quebra da onda em praias
D50	Tamanho mediano do grão
DOW	Downscaled Ocean Waves
Dp	Direção de pico
E	Leste
e	Coefficiente de viscosidade turbulenta
E	Dissipação da energia das ondas por unidade de tempo e de área
E	Energia da onda
EF	Fluxo médio de energia
ENE	Leste-Nordeste
EROS	Modelo de erosão/ sedimentação
ESE	Leste-Sudeste
F	Fluxo de energia de ondas
GOW	Global Ocean Waves
Hrms	Altura média quadrática de onda
Hs	Altura significativa de ondas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LCO	Linha de interface entre o continente e o oceano
LST	Transporte longitudinal de sedimentos
LST _{MÉDIO}	Transporte de sedimentos médio
LSTR	Transporte de sedimentos residual
LST _{TOTAL}	Transporte de sedimentos total

MaxDiss	Máxima dissimilaridade
MMA	Ministério do Meio Ambiente do Brasil
MP-SPU	Ministério de Planejamento, Orçamento e Gestão/Secretaria do Patrimônio Público
N	Norte
NE	Nordeste
NNE	Nor-Nordeste
NNW	Nor-Noroeste
NW	Noroeste
O	Oeste
OLUCA	Modelo de propagação de ondas
OSO	Oeste-Sudoeste
PETRA	Modelo de evolução do perfil transversal de praia
Po	Ponto de controle
qb	Ângulo formado entre q_{twb} e q_s
q_{EF}	Direção do fluxo médio de energia das ondas
q_s	Orientação da linha de costa em equilíbrio estático
q_{twb}	Ângulo de incidência da crista de onda na quebra
r	Densidade da água
Rb	Linha de controle
RBF	Radial Basis Functions
Rn	Linha a partir do ponto de difração
S	Sul
SE	Sudeste
SMC	Sistema de Modelagem Costeira
SO	Sudoeste
SSE	Sul-Sudeste
SSW	Sul-sudoeste
SW	Sudoeste
SWAN	Simulating WAVes Nearshore
T_p	Período de pico
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

USP	Universidade de São Paulo
VLCO	Varição da posição da linha de costa
W	Oeste
w	Declividade da praia
WNW	Oeste-Noroeste
WSW	Oeste-Sudoeste
xb	Distância entre a linha de costa e a local de arrebentação das ondas
y	Distância longitudinal a praia
θ	Ângulo

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	22
1	ÁREA DE ESTUDO	25
1.1	Geomorfologia	26
1.2	Condições meteoceanográficas	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
2.1	Morfodinâmica costeira	30
2.2	Modelos para o cálculo da forma em planta de praias encaixadas entre promontórios	31
2.2.1	<u>Modelo da espiral logarítmica</u>	31
2.2.2	<u>Modelo da equação parabólica</u>	32
2.2.3	<u>Modelo da tangente hiperbólica</u>	35
2.2.4	<u>Prós e contras dos modelos da espiral logarítmica, equação parabólica e da tangente hiperbólica para o cálculo da forma em planta</u>	36
2.2.5	<u>Modelo proposto por Gainza et al. (2018)</u>	36
2.3	SMC-Brasil	38
3	METODOLOGIA	42
3.1	Divisão da praia em setores	43
3.2	Análise do comportamento da linha de costa	45
3.3	Aquisição e compilação de dados batimétricos	47
3.4	Compilação de dados sedimentológicos	50
3.5	Modelagem de ondas em água rasa	53
3.6	Análise de dados de boias do SiMCosta	55
3.7	Transporte longitudinal de sedimentos (LST)	56
3.8	Análise da forma em planta de equilíbrio estático	57
3.9	Classificação de estabilidade das praias	58
4	RESULTADOS	60
4.1	Praia de Copacabana	60
4.1.1	<u>Clima de ondas (1968 – 2008)</u>	60
4.1.2	<u>Comparação entre os dados de boias e o ponto DOW em Copacabana</u>	63
4.1.3	<u>Fluxo de energia de ondas (EF e θ_{EF}) de 1948 a 2008</u>	66

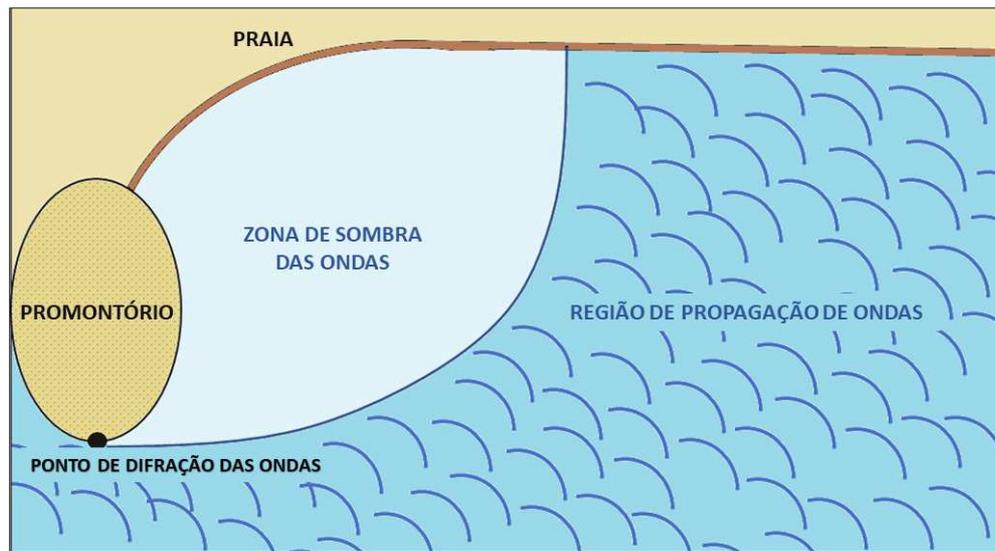
4.1.4	<u>Transporte longitudinal de sedimentos e suas tendências (1948 – 2008)</u>	69
4.1.5	<u>Variação da linha de costa (VLCO)</u>	72
4.1.6	<u>Forma em planta de equilíbrio estático (θ_{costa})</u>	73
4.1.7	<u>Classificação de estabilidade</u>	75
4.2	Praia da Macumba	77
4.2.1	<u>Clima de ondas (1968 – 2008)</u>	77
4.2.2	<u>Fluxo de energia de ondas (EF e θ_{EF}) de 1948 a 2008</u>	79
4.2.3	<u>Transporte longitudinal de sedimentos e suas tendências (1948 – 2008)</u>	82
4.2.4	<u>Variação da linha de costa e forma em planta de equilíbrio estático (VLCO e θ_{costa})</u>	85
4.2.5	<u>Forma em planta de equilíbrio estático (θ_{costa})</u>	87
4.2.6	<u>Classificação de estabilidade</u>	88
4.3	Praia de Grumari	90
4.3.1	<u>Clima de ondas (1968 – 2008)</u>	90
4.3.2	<u>Fluxo de energia de ondas (EF e θ_{EF}) de 1948 a 2008</u>	92
4.3.3	<u>Transporte longitudinal de sedimentos e suas tendências (1948 – 2008)</u>	95
4.3.4	<u>Variação da linha de costa e forma em planta de equilíbrio estático (VLCO e θ_{costa})</u>	98
4.3.5	<u>Forma em planta de equilíbrio estático (θ_{costa})</u>	99
4.3.6	<u>Classificação de estabilidade</u>	101
5	DISCUSSÃO	103
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	112
	REFERÊNCIAS	113

INTRODUÇÃO

As cidades costeiras são regiões intrinsecamente vulneráveis, já que abrangem diferentes aspectos relacionados à alta exposição a perigos ou impactos e baixa capacidade adaptativa (LINS-DE-BARROS, 2017). Um levantamento de notícias de jornais feito por LINS-DE-BARROS et al. (2018) mostrou que entre 1979 e 2013, praias do Rio de Janeiro foram citadas 100 vezes no Jornal O Globo devido às ressacas e suas consequências. Na praia da Macumba, um estudo realizado por Carvalho et al. (2020) mostrou que entre 1986 e 2018, esta praia apresentou variação anual da posição da linha de costa entre -0,39 e 0,86 m/ano, sendo valores negativos indicadores de erosão. Observando as praias do Rio de Janeiro em imagens de satélite percebe-se que elas apresentam algumas peculiaridades em relação ao seu grau de urbanização. Observando estas praias, vemos que são constituídas de faixa de areia intercalada por promontórios rochosos, conhecida na literatura como praias encaixadas entre promontórios.

Este tipo de praia apresenta algumas feições comuns: zona de sombra curva, uma zona de transição levemente curvada e, em alguns casos, uma zona relativamente retilínea (YU et al., 2018). O formato destas praias foi estudado por diversos autores que se ocuparam em desenvolver equações que comportassem o seu desenho peculiar curvo (e.g.: KRUMBEIN, 1944; YASSO, 1965; HSU e EVANS, 1989; MORENO e KRAUS, 1999). Sabe-se atualmente que a zona de sombra curva adjacente ao promontório está em uma região parcialmente protegida do ataque das ondas, e tem o seu grau de “entalhe” (do inglês *indentation*), isto é o quão curvo é o seu formato, diretamente relacionado à obliquidade das ondas e à quantidade de sedimentos disponibilizados para transporte através do embaiamento (SILVESTER e HO, 1972). Alguns autores se ocuparam em estudar a forma em planta dessas praias e descrevê-la através de equações. Dentre os principais modelos pode-se citar: o modelo da espiral logarítmica (KRUMBEIN, 1944; YASSO, 1965; apud HSU et al. 2008), o modelo da equação parabólica (HSU e EVANS, 1989) e o modelo da tangente hiperbólica (MORENO e KRAUS, 1999). Dentre estes, apenas o modelo da equação parabólica aborda a temática do estado de equilíbrio em planta da praia, sendo portanto, útil para análise do potencial erosivo de praias e também para estudo de soluções mitigadoras em casos de erosão (HSU e EVANS, 1989; HSU et al. 2008; HSU et al. 2010; KLEIN et al., 2010).

Figura 1 – Esquema mostrando as principais feições de uma praia encaixada entre promontórios



Fonte: A autora, 2019.

O grau de estabilidade da forma em planta das praias encaixadas entre promontórios pode ser estático ou dinâmico, e de acordo com Klein et al. (2010), esta classificação em planta independe de outras classificações de praia, tais como os estágios morfodinâmicos. Assim, três são os estados principais da forma em planta reconhecidos na literatura: equilíbrio estático, equilíbrio dinâmico ou instável. O equilíbrio estático é o estado em que quase não há deriva litorânea trazendo ou retirando sedimentos da praia. Neste estado as ondas incidentes são refratadas e difratadas dentro da zona de sombra do promontório, de modo que as ondas quebram simultaneamente em toda a periferia da praia; este é o estado considerado de máximo recuo da linha de costa. No equilíbrio dinâmico a taxa de entrada de sedimentos na praia é igual à taxa de saída, sendo assim a praia mantém a posição da linha de costa constante, desde que este balanço sedimentar seja mantido. Finalmente, a forma em planta é considerada instável quando algum fator altera o balanço sedimentar da praia, resultando em retrabalhamento da linha de costa. Se essa instabilidade ocorrer devido à construção de estruturas, a praia é dita estar em “remodelamento natural” (HSU e EVANS, 1989; SILVESTER e HO, 1972; HSU et al., 2008; HSU et al., 2010; KLEIN et al., 2010; ELSHINNAWY et al., 2018; YU et al., 2018).

Ao redor do mundo, a maioria das praias encaixadas entre promontórios naturais está em situação de equilíbrio dinâmico, o que quer dizer que elas necessitam do suprimento de sedimentos para manter a estabilidade, ou mesmo em situação de instabilidade. Este fato, somado à pressão da ocupação humana na zona costeira torna necessário o manejo e a busca

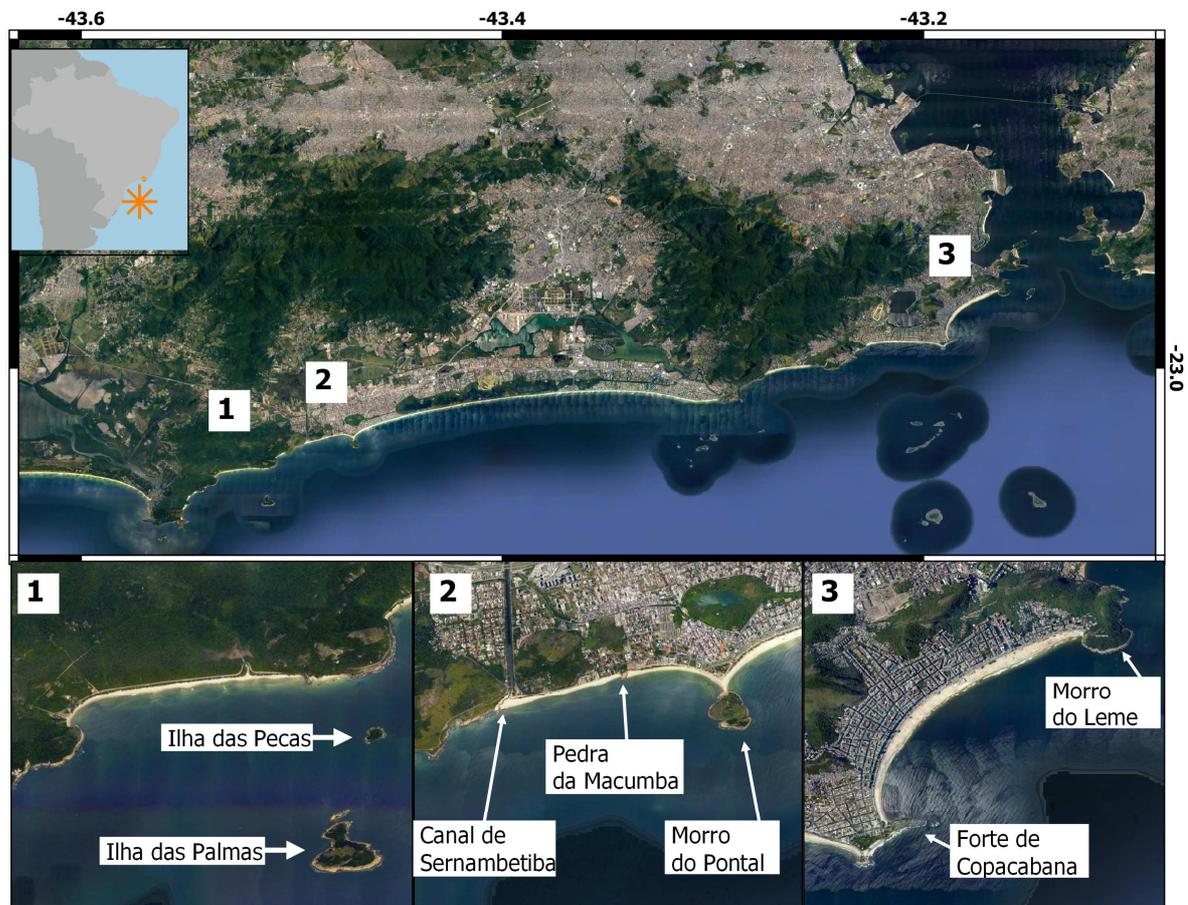
por soluções para redução das perdas devido a eventos erosivos. O estudo da estabilidade da forma em planta de praias encaixadas entre promontórios pode ser aplicado à estabilização costeira. De maneira geral, para prevenir a erosão dessas praias pode ser feita a conversão desta praia para o estado de equilíbrio estático através da instalação de um promontório artificial, de modo que esta praia não seria mais afetada pela redução do suprimento de sedimentos. Para praias em estado de instabilidade, o combate à erosão pode ser feito através de uma “engenharia quase mole”, com um engordamento de praia sendo protegido por um quebra-mar, mantendo a linha de costa com o sedimento adicionado em estado de equilíbrio estático (GONZÁLEZ e MEDINA, 2001; HSU et al., 2008; HSU et al., 2010).

As praias de Copacabana, Macumba e Grumari apresentam peculiaridades quanto ao seu grau de interferência antrópica, a orientação da linha de costa e as características geomorfológicas. Desse modo, o objetivo deste trabalho é analisar a estabilidade costeira das praias de Copacabana, Macumba e Grumari, na cidade do Rio de Janeiro, a partir de uma metodologia que avalie a estabilidade da sua forma em planta e aspectos relacionados a dinâmica costeira. Pretende-se com isso contribuir para melhor compreensão da dinâmica sedimentar destas praias a partir de análises pertinentes para os estudos de evolução da linha de costa e vulnerabilidade à erosão costeira.

1 ÁREA DE ESTUDO

Este trabalho tem como área de estudo as praias arenosas de Copacabana, Macumba e Grumari, localizadas na cidade do Rio de Janeiro na região Sudeste do Brasil, onde fica a Bacia de Campos (Figura 2).

Figura 2 – Área de estudo.



Legenda: 1 – Praia de Grumari, 2 – Praia da Macumba, 3 – Praia de Copacabana, 4 – Ilha de Palmas, 5 – costão rochoso em Grumari, 6 – Ilha das Pecas, 7 – Canal de Sernambetiba, 8 – Pedra da Macumba, 9 – Morro do Pontal, 10 – Forte de Copacabana, e 11 – Morro do Leme.

Fonte: A autora, 2020.

1.1 Geomorfologia

A praia de Copacabana (22,9°S; 43,17°W) possui aproximadamente 4 km de extensão com orientação NE-SO e está localizada entre dois promontórios, um deles onde está localizado o Forte de Copacabana e o outro no Morro do Leme. Esta praia passou por um processo de engordamento de praia durante a década de 1960 na qual teve a sua largura original em torno de 55 m, ampliada para aproximadamente 140 m (VERA-CRUZ, 1972). Atualmente, observando imagens aéreas dessa praia percebe-se que esta apresenta um padrão quase que constante em relação a largura de sua faixa de areia: (I) uma porção da praia adjacente ao Forte de Copacabana que possui uma largura de 010 m; (II) uma outra região que apresenta largura aproximadamente constante de 0100 m; (III) um local onde é observada a presença de uma protuberância em torno de 50 m mais larga que a faixa de areia em II; (IV) uma região mais estreita da faixa de areia adjacente ao Morro do Leme (Figura 3). As características granulométricas do sedimento utilizado no engordamento dessa praia na década de 1960 não foram as mesmas do sedimento que era encontrado naturalmente no local, utilizou-se sedimentos mais grossos, o que reduziu a qualidade do engordamento (MUEHE e LINS-DE-BARROS, 2016).

Figura 3 – Imagem do Google Earth da praia de Copacabana do dia 30 de junho de 2018



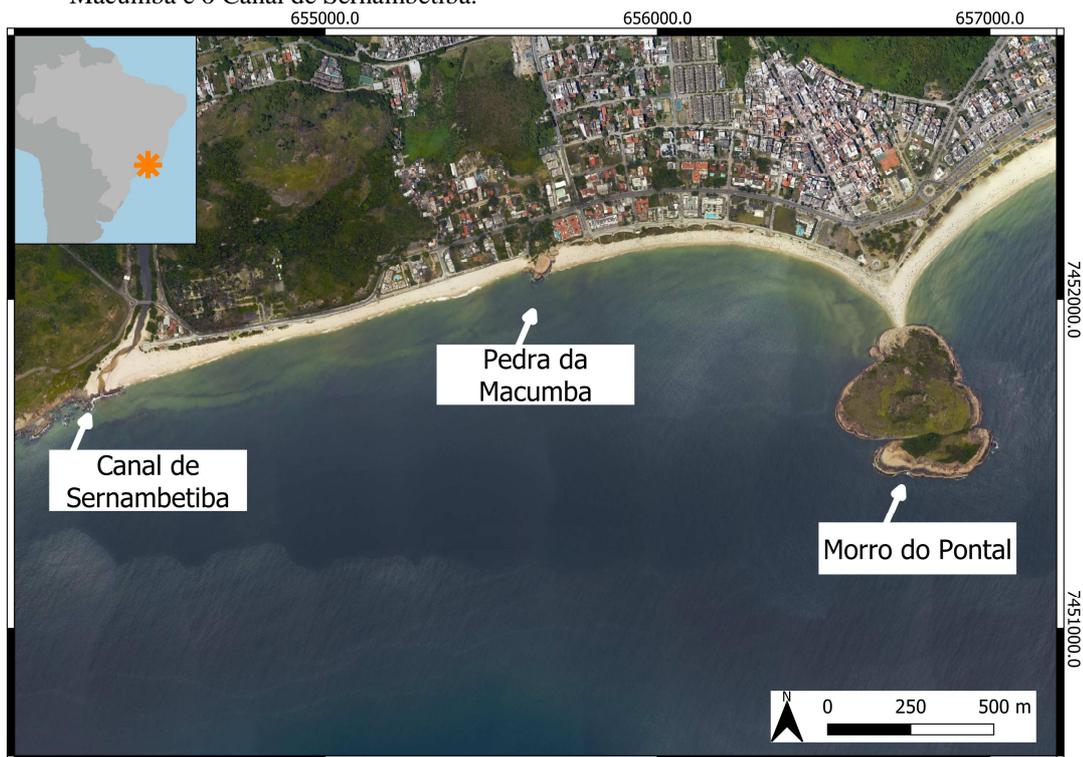
Legenda: (I) região com uma largura de 010 m; (II) região com largura aproximadamente constante de 0100 m; (III) protuberância em torno de 20 m mais larga que a faixa de areia citada anteriormente; (IV) região em que se observa estreitamento da faixa de areia em direção ao Morro do Leme.

Fonte: modificado do Google Earth.

A praia da Macumba, localizada na longitude -43,47° e latitude -23,03°, apresenta orientação ENE-OSO e aproximadamente 2,5 km de extensão, e está localizada entre o Canal

de Sernambetiba (a oeste) e o Pontal de Sernambetiba (a leste), onde se observa a formação de um tombolo. Na região central desta praia, observa-se um afloramento rochoso com aproximadamente 85 m de extensão entre sua extremidade que toca o calçadão e a que toca a água, chamado popularmente de Pedra da Macumba (Figura 4). Em relação a largura da faixa de areia, estudos recentes indicam que o valor de mudança no envelope da linha de costa, uma medida entre um ponto fixo e o máximo avanço da praia em direção ao mar, na praia da Macumba foi de 40 m em média, com o valor máximo de 91 m entre 1986 e 2018 (CARVALHO et al., 2020). Os maiores valores encontrados por estas autoras dessa variação do envelope costeiro foram encontrados na porção central da praia (próximo a Pedra da Macumba), na região do tombolo adjacente ao Morro do Pontal e na região mais a oeste da praia, próximo a saída do Canal de Sernambetiba.

Figura 4 – Imagem do Google Earth da praia da Macumba, na qual é possível ver o Morro do Pontal, a Pedra da Macumba e o Canal de Sernambetiba.

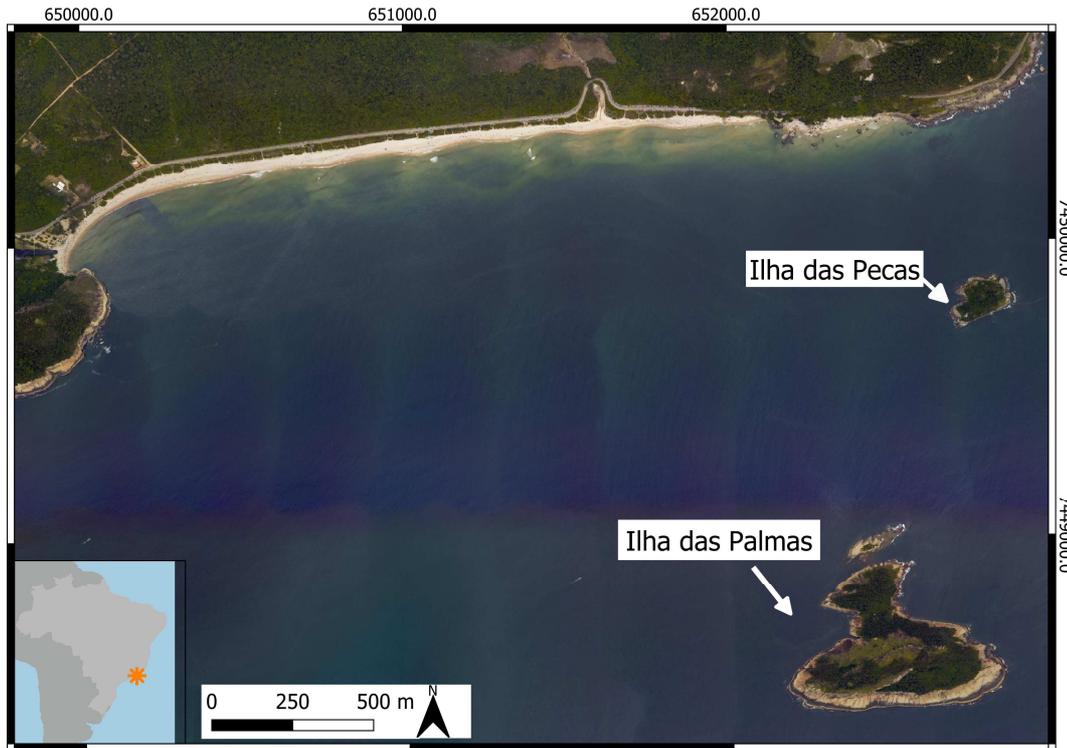


Fonte: mMdificado do Google Earth, 2020.

A praia de Grumari (longitude $-43,52^\circ$ e latitude $-23,05^\circ$) possui aproximadamente 2,7 km de extensão com orientação da linha de costa E-O, observa-se a presença de duas ilhas a frente dessa praia, uma ilha menor a 500 m da costa (Ilha das Pecas) e outra a 1,6 km da costa (Ilha de Palmas) (Figura 5). Ao contrário do que se observa nas outras praias estudadas, a praia de

Grumari possui uma ausência de trabalhos que a caracterizem quanto aos seus aspectos morfodinâmicos.

Figura 5 – Imagem do Google Earth mostrando a praia de Grumari, bem como a localização das ilhas das Palmas e das Pecas.



Fonte: Modificado do Google Earth, 2020.

1.2 Condições meteoceanográficas

O clima do Rio de Janeiro é fortemente influenciado pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), este sistema é responsável pelos ventos de direção nordeste de fraca intensidade que predominam na região, bem como pelas condições de estabilidade termodinâmica, ou seja, céu com pouca nebulosidade. Tal situação de estabilidade é eventualmente interrompida pela chegada de sistemas transientes, como, por exemplo, sistemas frontais e ciclones extratropicais, os quais promovem aumento da nebulosidade, intensificação dos ventos e precipitação (DERECZYNSKI e MENEZES, 2015). De acordo Carvalho et al. (2020), em um trabalho feito com dados de ventos levantados de uma estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) entre 2002 e 2008,

os ventos mais frequentes na região costeira da cidade do Rio de Janeiro, apresentam baixa intensidade (em torno de 4 m/s) e estão associados ao quadrante norte. Por outro lado, ventos menos frequentes de leste e sudoeste possuem as maiores intensidades, atingindo até 18,2 m/s. Em relação às médias mensais da direção dos ventos, estas autoras perceberem uma clara bidirecionalidade, com ventos de leste de altas intensidades ocorrendo durante o verão (dezembro, janeiro e fevereiro), enquanto os ventos forte de sudoeste ocorrem durante o inverno (junho, julho e agosto).

O clima de ondas na Baía de Campos, em condições associadas ao ASAS, é considerado de tempo bom. De acordo com Parente et al. (2015), para a Baía de Campos como um todo, em torno de 51,89% dessas ondulações de tempo bom compreendem ondas de nordeste-leste, das quais a maior parte possui altura significativa de ondas (H_s) entre 1 e 2 m e período de pico (T_p) entre 6 e 8 s. Ainda de acordo com estes autores, 30,85% das ondulações de tempo bom estão associadas a presença de swell vindo de regiões distantes, de modo que 20% do T_p destas está entre 10 e 12 s com direção de pico (D_p) de sul, enquanto 10% desse tipo de ondulação compreende ondas com T_p entre 14 e 16 s também vindas de sul. Focando apenas na cidade do Rio de Janeiro, um estudo recente com dados de reanálise mostrou que entre 1986 e 2008, os valores de H_s oscilaram entre 0,4 m e 5 m (média de aproximadamente 1,7 m), o T_p variou entre 3,1 s e 18 s (em média em torno de 9,8 s) e o D_p entre 50° e 267° (média aproximada de 151°). Neste período, 46,4% das ondulações foram no segundo quadrante, enquanto 39,4% vieram do terceiro quadrante (Carvalho et al., 2020). Quanto ao regime de maré, esta região apresenta um regime semi-diurno, com alturas que variam entre 0,3 m e 1,2 m (HARARI e CAMARGO, 1994; NEMES et al., 2019).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Morfodinâmica costeira

As praias podem ser definidas como um acúmulo de sedimentos inconsolidados variando de areia fina até matacões, os quais são remobilizados por ondas e correntes (DAVIDSON-ARNOTT, 2010). As praias e sedimentos costeiros estão continuamente interagindo com a ação de ondas, correntes litorâneas, correntes induzidas por ventos e marés e pela ação direta do vento. Logo, a estabilidade desses ambientes depende do balanço entre o volume de sedimentos disponíveis e o transporte de sedimentos em direção a costa (*onshore*), para fora da costa (*offshore*) e ao longo da costa (*alongshore*) causado pela ação de ondas, ventos e correntes (SORENSEN, 2006).

As ondas oceânicas sofrem algumas modificações ao se aproximarem da costa, os principais processos responsáveis por essas modificações são a refração, difração e empolamento. Enquanto variações horizontais na profundidade causam refração e empolamento, variações horizontais na amplitude causam o processo de difração. A refração é o processo pelo qual as ondas giram em direção a profundidades mais rasas devido a mudanças induzidas pela profundidade ou correntes na velocidade de fase na direção lateral (ou seja, ao longo da crista de onda). O empolamento, por sua vez, é a variação das ondas na mesma direção de sua propagação devido a mudanças induzidas pela profundidade em sua celeridade de grupo nesta mesma direção, o que normalmente aumentam a amplitude da onda conforme ela se desloca em direções mais rasas. A difração é o processo pelo qual as ondas giram em direção a áreas com menor amplitude devido a variações de amplitude ao longo da crista de onda. A difração é particularmente forte ao longo de obstáculos como ilhas, promontórios e quebra-mar. Além desses processos, ondas entrando em águas costeiras também podem sofrer reflexão (HOLTHUIJSEN, 2007).

A forma em planta de praias pode ser convexa, retilínea ou côncava. Praias convexas são pouco frequentes e geralmente ocorrem em regiões como deltas. A maioria das vezes, praias se desenvolvem em costas intercaladas com alto relevo, onde muitas delas estão localizadas em alguma forma de embaiamento entre promontórios rochosos, ou ancoradas nas proximidades desses promontórios. Nesse caso, as praias assumem um formato côncavo, que

pode apresentar um trecho retilíneo conforme a distância em relação ao promontório aumenta (DAVIDSON-ARNOTT, 2010).

2.2 Modelos para o cálculo da forma em planta de praias encaixadas entre promontórios

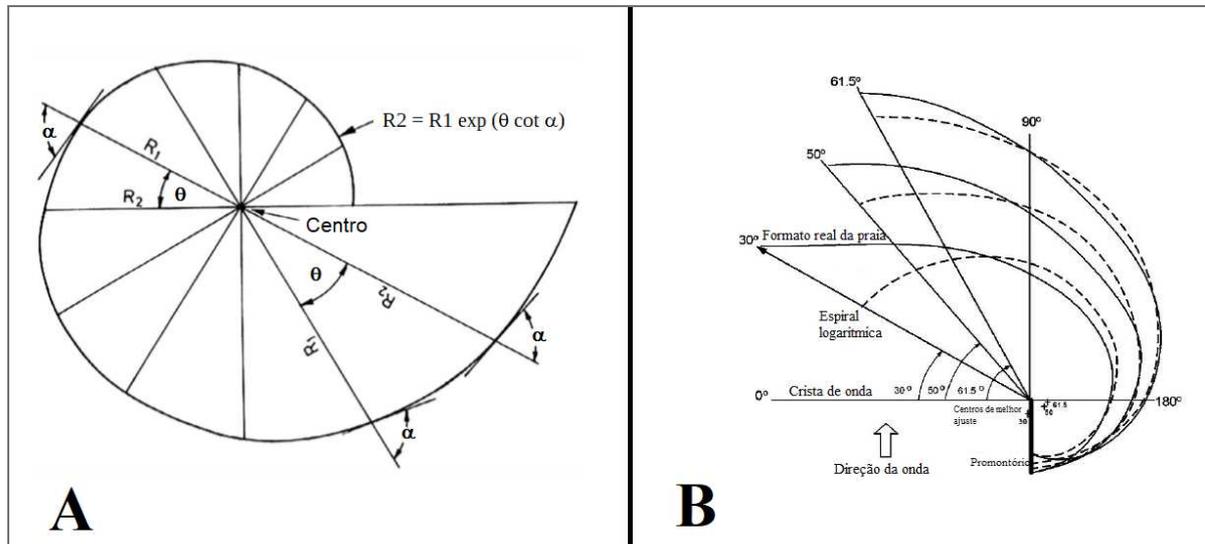
Os principais modelos encontrados na literatura para estudo da forma em planta de praias encaixadas entre promontórios são (Figura 6): o modelo da espiral logarítmica (KRUMBEIN, 1944; YASSO, 1965; apud HSU et al. 2008); modelo da equação parabólica (HSU e EVANS, 1989); modelo da tangente hiperbólica (MORENO e KRAUS, 1999); modelo de Gainza et al (2018).

2.2.1 Modelo da espiral logarítmica

Este modelo foi inicialmente descrito por Krumbein (1944) para ajustar uma curva a linha de costa da Baía Half-Moon, na Califórnia. Este modelo descreve a relação entre dois raios consecutivos, medidos a partir do centro da espiral logarítmica com uma distância com ângulo θ , e que possui uma tangente externa constante α , este modelo é dado pela equação 1 e seu esboço esquemático está representado na Figura 6-A (SILVESTER e HO, 1972; HSU et al., 2008).

$$R2 = R1 \exp (\theta \cot \alpha) \quad (1)$$

Figura 6 – Definição do esboço da forma em planta através da equação da espiral logarítmica. E diferença entre a espiral do modelo logarítmico e o formato real da praia.



Legenda: A – Definição do esboço da forma em planta através da equação da espiral logarítmica. B – Diferença entre a espiral do modelo logarítmico e o formato real da praia.

Fonte: A - adaptado de Hsu et al., 2008. B - adaptado de Hsu et al., 1987.

Hsu et al. (1987) conduziram testes em laboratório com ondas monocromáticas para verificar a formação do equilíbrio estático e se este se adequava ao modelo da espiral logarítmica. Os resultados obtidos por estes autores mostraram que a curva logarítmica não representava bem alguns segmentos da forma em planta de equilíbrio estático, principalmente o segmento tangente da praia, sendo ainda mais pronunciada a diferença quando foram utilizadas obliquidades de ondas com angulações menores (Figura 6-B).

2.2.2 Modelo da equação parabólica

O modelo da equação parabólica foi desenvolvido por Hsu e Evans (1989), através do ajuste de 27 casos de praias localizadas que se acreditava estarem em equilíbrio estático. Este modelo é dado por um polinômio de segunda ordem, através da equação 2.

$$R_n/R_\beta = C_0 + C_1(\beta/\theta) + C_2(\beta/\theta)^2 \quad (2)$$

onde R_β é uma linha de controle, que é a linha que une o ponto de difração da onda ao ponto de controle (P_0); β é ângulo entre a crista de ondas incidente no ponto de difração e a

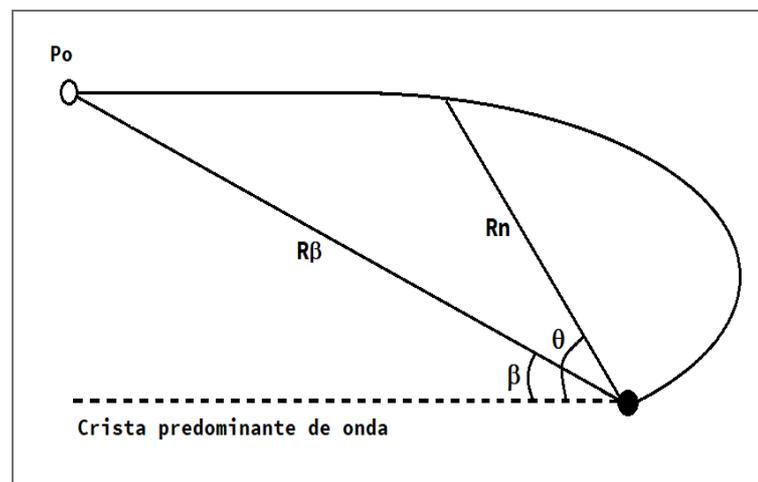
linha de controle; C_0 , C_1 e C_2 são coeficientes que variam uniformemente com β , numericamente estes coeficientes podem ser expressos através de um polinômio de quarta ordem, na forma das equações 3, 4 e 5. A Figura 7 mostra um esquema definindo as variáveis da equação parabólica.

$$C_0 = 0.0707 - 0.0047\beta + 0.000349\beta^2 - 0.00000875\beta^3 + 0.00000004765\beta^4 \quad (3)$$

$$C_1 = 0.9536 + 0.0078\beta + 0.00004879\beta^2 + 0.0000182\beta^3 + 0.00000001281\beta^4 \quad (4)$$

$$C_2 = 0.0214 - 0.0078\beta + 0.0003004\beta^2 - 0.00001183\beta^3 + 0.0000000343\beta^4 \quad (5)$$

Figura 7 – Esboço esquemático definindo as variáveis da equação 2



Legenda: R_β : linha de controle; P_o : ponto de controle; β : é ângulo entre a crista de ondas incidente no ponto de difração e a linha de controle; θ : diferentes ângulos a partir do ponto de difração; R_n : diferentes linhas a partir do ponto de difração dadas pelo ângulo θ .

Fonte: A autora, 2020.

Tan e Chiew (1994) executaram experimentos em laboratório em que investigaram a formação da forma em planta de praias com diferentes características. Foram utilizados dois tamanhos de sedimentos, 0.25 mm e 1.0 mm; obliquidade da onda variando entre 5° e 84° ; praias com dimensões 30 x 5.5 metros, 20 x 6 metros e 5 x 5 metros; ondas com diferentes amplitudes, frequências e comprimento de onda; além de variações no tamanho e posição da estrutura do quebra-mar. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que apenas o efeito de variação da obliquidade foi fundamental quando a forma em planta era expressa em termos de R_n/R_β e β/θ , sugerindo que a forma final de equilíbrio é resultado da redistribuição da energia da onda e da resposta do sedimento a este efeito. Outro resultado obtido por Tan e

Chiew (1994) foi a simplificação dos coeficientes C_0 (equação 6), C_1 (equação 7) e C_2 (equação 8) da equação parabólica de Hsu e Evans (1989) (equação 2).

$$C_0 = 1 - \beta \cot(\beta) + \alpha \quad (6)$$

$$C_1 = \beta \cot(\beta) - 2 \alpha \quad (7)$$

$$C_2 = \alpha \quad (8)$$

$$\alpha = 0.277 - 0.0785 * 10^{(\beta \pi/180)} \quad (9)$$

$$R_n/R\beta = [1 - \beta \cot(\beta) + \alpha] + [\beta \cot(\beta) - 2 \alpha] (\beta/\theta) + \alpha (\beta/\theta)^2 \quad (10)$$

González e Medina (2001), após aplicarem a equação parabólica de Hsu e Evans (1989) em várias praias da costa da Espanha, mostraram que A orientação da frente de onda no ponto de difração que deve ser utilizada para aplicar a equação de Hsu e Evans (1989) deve corresponder à frente do fluxo médio de energia das ondas no ponto de difração. A relação entre a direção do fluxo médio de energia das ondas (θ_{EF}) e a orientação de equilíbrio estático das praias também foi estudada por Elshinnawy et al. (2017), que observaram que a utilização do θ_{EF} nem sempre produz resultados precisos da forma em planta de equilíbrio estático, especialmente em casos de praias com sedimentos mais grossos e com o clima direcional de ondas caracterizado por uma distribuição de formato assimétrico e multimodal. A partir dessa observação, Elshinnawy et al. (2017) executaram um estudo para explorar a relação do tamanho do sedimento da praia e o formato da distribuição direcional do fluxo de energia da onda, como agentes na direção do fluxo médio de energia da onda que, por sua vez, determina a orientação do equilíbrio estático da praia. Estes autores chegaram à conclusão de que praias com sedimentos mais grossos apresentaram maior desvio entre a orientação do fluxo de médio de energia calculado e a orientação de equilíbrio da praia (Elshinnawy et al., 2017).

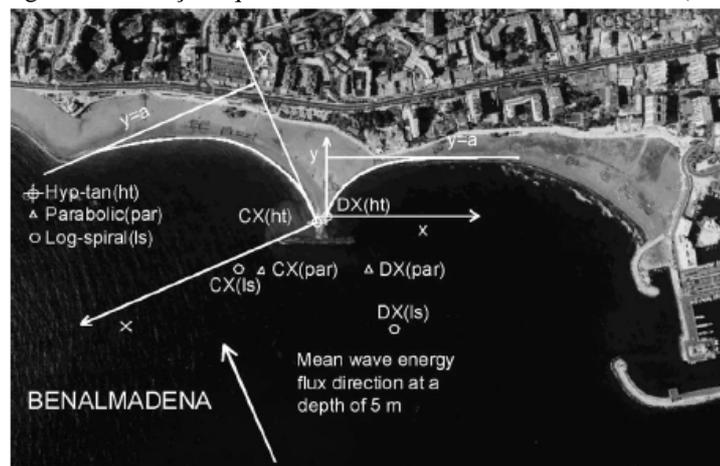
2.2.3 Modelo da tangente hiperbólica

O modelo da tangente hiperbólica foi proposto por Moreno e Kraus (1999) e é dado pela equação 11:

$$y = \pm a \tanh^m (bx) \quad (11)$$

onde “x” é distância ao longo da costa, “y” é o eixo perpendicular à costa, e “a”, “b” e “m” são coeficientes adimensionais determinados empiricamente; a origem do sistema de coordenadas desse modelo deve ser localizada no ponto onde a tangente local da praia é perpendicular a tendência geral da costa (MORENO e KRAUS, 1999) (Figura 8). De acordo com Moreno e Kraus (1999), o modelo da equação hiperbólica possui três propriedades que tornam este modelo aplicável à engenharia, conferindo uma aplicação mais direta se comparada outros modelos: a curva é simétrica com o eixo x; o valor de $y = +a$ define uma assíntota que tem especial interesse no ajuste da forma em planta, pois dá o formato da praia além da influência do promontório; o gradiente dy/dx em $x=0$ é determinado pelo parâmetro m, e o gradiente é infinito se $m < 1$, indicando que este parâmetro deve ser menor que 1.

Figura 8 – Esboço esquemático do modelo de Moreno e Kraus (1999).



Fonte: Moreno; Kraus, 1999.

2.2.4 Prós e contras dos modelos da espiral logarítmica, equação parabólica e da tangente hiperbólica para o cálculo da forma em planta

De maneira geral, o modelo da espiral logarítmica e o modelo da tangente hiperbólica apresentam as seguintes falhas: o ponto de difração das ondas não foi envolvido na definição do sistema de coordenadas, sendo assim, estes modelos não tem associação com os processos físicos envolvendo a formação da forma em planta; estes métodos não permitem avaliar a estabilidade da praia; estes modelos não permitem relacionar as ondas incidentes com a posição da linha de costa; não é possível prever através desses modelos o impacto gerado pela construção ou extensão de promontórios (HSU e EVANS, 1989; HSU et al., 2008; HSU et al., 2010). Alguns autores apontam o modelo hiperbólico como uma interpretação equivocada do modelo da equação parabólica, sendo meramente um ajuste geométrico da forma em planta, já que não envolve a compreensão de fatores físicos, tais como o ponto de difração das ondas (HSU et al. 2008, HSU et al. 2010).

Apesar das diversas aplicações e melhorias da equação para o cálculo da forma em planta proposta por Hsu e Evans (1989), este modelo não é derivado diretamente dos processos físicos atuantes que desenvolveram a forma em planta, em vez disso, este é um modelo originado de equações empíricas. Por conta disso, este modelo é válido levando em consideração algumas simplificações, e por isso ele não é útil na previsão do efeito de ilhas próximo à costa, fundos rochosos, ou a presença de múltiplos pontos de difração (Gonzalez, 1995; Gainza et al., 2018).

2.2.5 Modelo proposto por Gainza et al. (2018)

Este modelo se baseia na hipótese de que praias atingem o equilíbrio estático quando a velocidade média da zona de surf ao longo de um determinado período de tempo é nula em cada ponto ao longo da praia (Gonzalez e Medina, 2001). Assim, a partir desta hipótese estes autores desenvolveram uma nova fórmula para o cálculo da forma em planta (equação 12).

$$\overline{\theta}_{comp} + \overline{\partial}_{comp} + \overline{T}_{comp} = 0 \quad (12)$$

Onde $\overline{\theta_{comp}}$, $\overline{\partial_{comp}}$ e $\overline{T_{comp}}$ são, respectivamente, a fórmula da velocidade longitudinal, o gradiente de altura de onda e o termo de turbulência, os quais são dados pelas equações abaixo:

$$\overline{\theta_{comp}} = \frac{5\pi}{32C_f} g \tan^2(\omega) \gamma \frac{1}{\sqrt{gh_b}} x_b \sin(\theta_b) \quad (13)$$

$$\overline{\partial_{comp}} = \frac{2\pi}{3C_f} (g \tan(\omega))^{1/2} K_1 x_b^{3/2} \frac{\partial H_b}{\partial y} \quad (14)$$

$$\overline{T_{comp}} = \overline{T_1} + \overline{T_2} \quad (15)$$

$$\overline{T_1} = \frac{-20\pi^2 \varepsilon}{16C_f^2 \gamma} \left(K_1 \gamma \left(\frac{\partial H_b}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (16)$$

$$\overline{T_2} = \frac{-20\pi^2 \varepsilon}{16C_f^2 \gamma} \tan(\omega) \frac{x_b}{3} \left(\frac{\partial^2 H_b}{\partial y^2} \right) \quad (17)$$

$$\theta_b = \overline{\theta_{twb}} - \theta_s \quad (18)$$

onde C_f é o coeficiente de arrasto, y é a distância longitudinal a praia do setor analisado, ω é a declividade da praia, x_b é a distância entre a linha de costa e a local de arrebenção das ondas, θ_b é o ângulo formado entre o ângulo de incidência da crista de onda na quebra (θ_{twb}) e a orientação da linha de costa em equilíbrio estático (θ_s), $\gamma = 0,55$ (Riedel and Byrne, 1986), ε é o coeficiente de viscosidade turbulenta e $K_1 = \frac{5\gamma}{2(3\gamma^2+8)}$. O valor de ε pode ser obtido através da fórmula proposta por Battjes (1975): $\varepsilon = M \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/3} H_{rms}$, onde M é uma constante, E é a dissipação da energia das ondas por unidade de tempo e de área, ρ é a densidade da água e H_{rms} é a altura média quadrática de onda. A partir dessas equações calcula-se o θ_s que é a orientação da linha de costa em equilíbrio estático, dado pela equação 39.

2.3 SMC-Brasil

O SMC-Brasil é uma versão do programa Sistema de Modelagem Costeira desenvolvido pelo IH Cantabria. A versão brasileira desse programa foi desenvolvida a partir de uma parceria entre o IH Cantabria, o Laboratório de Oceanografia Costeira da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e o Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (USP), juntamente com o apoio da Agência Internacional de Cooperação da Espanha (AECID), o Ministério do Meio Ambiente do Brasil (MMA) e o Ministério de Planejamento, Orçamento e Gestão/Secretaria do Patrimônio Público (MP-SPU) (González et al. 2014).

O SMC-Brasil inclui quatro módulos com metodologias de avaliação de impactos futuros em praias devido ao clima de ondas, inundação costeira e problemas de erosão, e dois sistemas com modelos numéricos e ferramentas estatísticas que permitem a aplicação das metodologias propostas em tais documentos: SMC 3.0 e SMC-Tools.

O SMC 3.0 é dividido em dois módulos: (i) módulo de análise e praias em curto prazo e (ii) módulo de análise de praias em longo prazo. Em (i) temos incluídos:

- (1.1) modelo de evolução do perfil transversal de praia (PETRA);
- (1.2) modelo de propagação de ondas (OLUCA);
- (1.3) modelo de correntes devido à quebra da onda em praias (COPLA);
- (1.4) modelo de erosão/ sedimentação (EROS).

O OLUCA é um modelo de propagação de ondas fracamente não-linear, que se baseia na equação da declividade suave desenvolvida por Radder (1979), a qual foi posteriormente adaptada por Booij (1981). Este modelo combina refração e difração, incluindo os efeitos de empinamento, dissipação de energia por fricção com o fundo e quebra da onda e a interação onda-corrente, simulando o comportamento de ondas sobre batimetrias irregulares (GONZÁLEZ et al., 2007). O modelo de correntes COPLA é um modelo numérico deduzido das equações de Navier – Stokes que resolve as equações de fluxo (interação onda – corrente) dentro da zona de surfe, devido à arrebentação das ondas, utilizando como parâmetros de entrada os resultados de campos de ondas obtidos do modelo OLUCA. O COPLA resolve de forma integrada na profundidade a equação de conservação da massa e do momento em duas dimensões horizontais (2DH). O modelo EROS é um modelo numérico que resolve as equações do fluxo de sedimentos dentro da zona de surfe, devido à arrebentação das ondas, bem como as alterações na batimetria associadas às variações espaciais do transporte de

sedimentos em curto prazo (até 72 horas). Este modelo também utiliza como dados de entrada parâmetros obtidos do modelo OLUCA, do modelo COPLA e características dos sedimentos da praia (GONZÁLEZ et al., 2007).

Já no módulo (ii) do SMC 3.0, módulo de análise de praias em longo prazo, possui módulos de análise da forma em planta, do perfil de equilíbrio e do transporte de sedimentos. Além disso, é no SMC 3.0 que está incluída uma ferramenta para modelagem do terreno, necessária no processo de incluir novas batimetrias, ou mesmo modificar batimetrias já existentes (González et al., 2007; González et al. 2014; Quetzalcóatl, et al. 2019, site do SMC-Brasil). Para informações detalhadas a respeito de cada um desses modelos, consulte os manuais de referência presentes em: <https://smcbrasil.paginas.ufsc.br/smc-brasil/smc-3-0/>.

O SMC-Tools é uma ferramenta utilizada para executar todos os pré-processos e pós-processos das metodologias e abrange três principais componentes: IH-DATA, o qual inclui a base de dado apropriada para uso nos cálculos como fonte de informações; o IH-AMEVA, que é uma ferramenta estatística destinada a engenharia costeira; e o IH-DYNAMICS, que contém a metodologia de transferência de estados de mar para pontos próximos a costa e na zona de arrebentação, o modelo relacionado à avaliação do transporte longitudinal de sedimentos na costa e a direção dos fluxos de energia, e o modelo de avaliação da cota de inundação na costa.

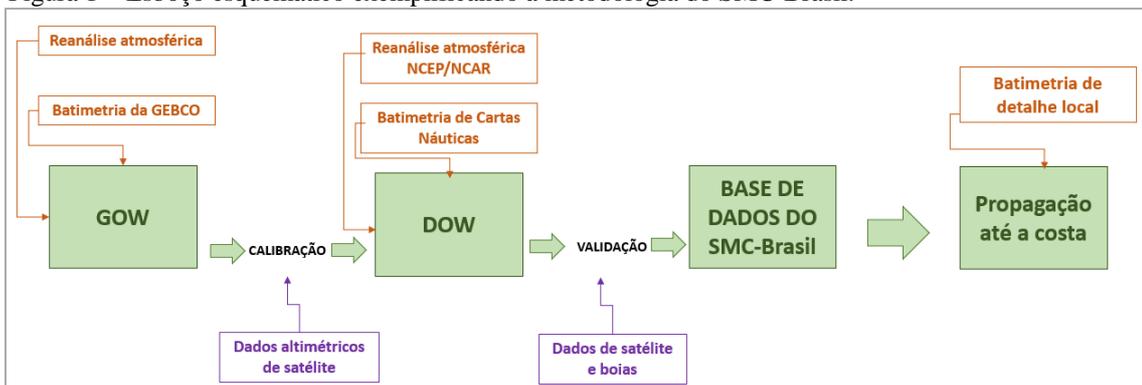
Na base de dados IH-DATA, estão presentes 4 outras bases de dados preparadas especificamente para prover informações necessárias aos estudos costeiros: batimetria; base de dados de ondas; base de dados de nível do mar; cenários de mudanças climáticas (Quetzalcóatl, et al. 2019).

O IH-DATA possui séries de 60 anos (de 1948 a 2008) de ondas, maré astronômica e maré meteorológica, obtidas usando reanálise numérica e séries de nível do mar ao longo da costa brasileira, estas series foram validadas com dados de satélite, marégrafos, e dados de boias (González et al. 2014). A base de dados de ondas presente no SMC-Brasil contém pontos a cada 1 km em profundidades menores que 20 m e pontos a cada 10 km em profundidades maiores que 20 m, estes pontos são chamados de pontos DOW (*Downscaled Ocean Waves*). Estes pontos DOW foram gerados a partir de um downscaling de ondas globais (Global Ocean Waves - GOW) utilizando o modelo numérico Simulating Waves Nearshore (SWAN) e batimetria de cartas náuticas. Em cada um desses pontos é possível obter estatísticas de ondas para o período de 1948 a 2008 com a altura significativa média de onda (H_s), a altura significativa superada em 12 horas (H_{s12}), período de pico, período médio e a direção média de onda. A H_s diz respeito a média de 1/3 das ondas mais altas de toda a

série, enquanto a Hs12 diz respeito ao valor da altura de ondas atingidas em 12 horas, sendo assim, este valor é utilizado para caracterizar ondas de eventos extremos. Dentre os fatores limitantes do DOW temos que o modelo numérico SWAN não resolve bem a difração, além disso as informações de batimetria contidas em cartas náuticas nem sempre são tão precisas para algumas regiões costeiras, logo a estatística de ondas desses pontos não deve ser utilizada quando em águas rasas (Manual do SMC-Brasil).

Para obtenção do clima de ondas em regiões mais próximas a costa, o SMC-Brasil inclui ferramentas de *downscaling* para transferir ondas *offshore* para a linha de costa, conforme citado anteriormente, a qual incluem o modelo OLUCA do SMC 3.0 e o no módulo de pós-processo do SMC-Tools (Figura 9). Parte da metodologia incluída no SMC-Brasil para modelagem de ondas em águas rasas consiste na aplicação de um algoritmo para selecionar os estados de mar que serão propagados até a costa. Este procedimento é importante uma vez que a propagação de uma série horária de 60 anos seria muito custosa computacionalmente. Assim, para a seleção dos casos de ondas que serão propagados, o *software* inclui um algoritmo de máxima dissimilaridade (MaxDiss). Este algoritmo tem como objetivo obter um subconjunto da amostra de dados que represente a diversidade dessa amostra. Assim, ele seleciona dentro da amostra os dados mais dissimilares, formando um subconjunto da amostra inicial com um número determinado de elementos. Desse modo, utiliza-se o MaxDiss para selecionar dentro a série de 60 anos de ondas do ponto DOW os casos mais dissimilares, a fim de representar a diversidade de estados de mar incidentes sobre uma região. Após a seleção e propagação dos casos, a série temporal é reconstruída na zona de arrebentação utilizando uma técnica de interpolação baseada em funções de base radial (*Radial Basis Functions*, RBF), a qual é adequada para dados com alta dimensionalidade e não distribuídos uniformemente (FRANKE, 1982), como dados de ondas.

Figura 1 – Esboço esquemático exemplificando a metodologia do SMC-Brasil.



Legenda: Em laranja tem-se os parâmetros utilizados como entrada.

Fonte: Adaptado de Brasil, 2018.

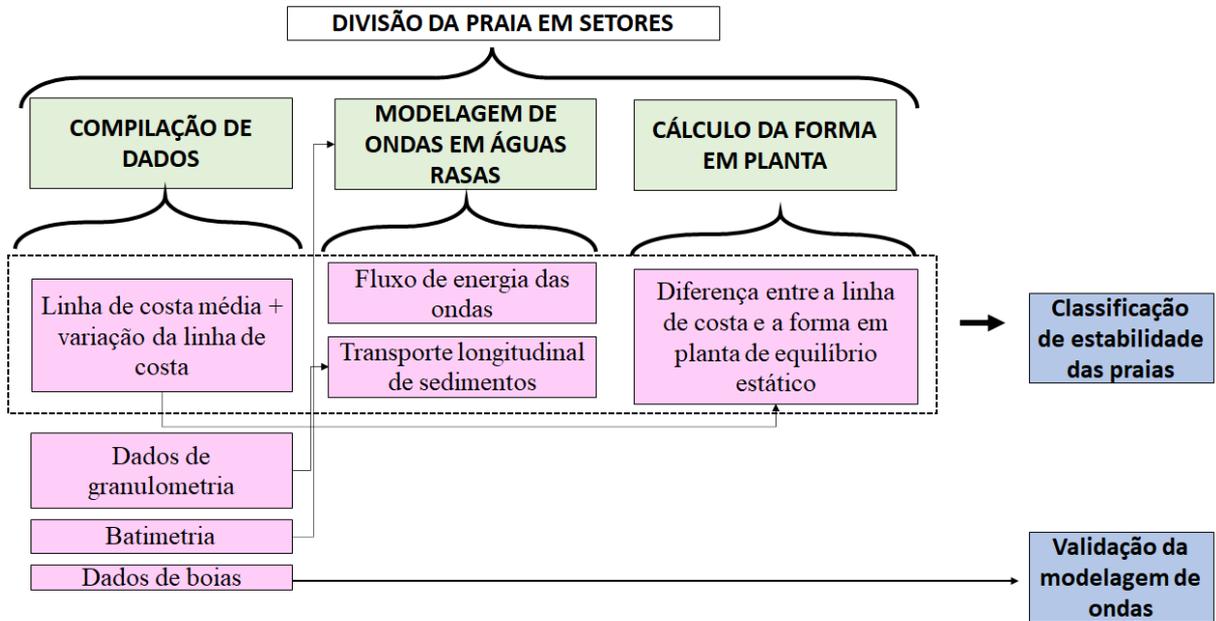
Os modelos numéricos de hidrodinâmica e de evolução foram validados em laboratório com muitos estudos de caso na costa do Brasil (González et al. 2014; Manual do SMC-Brasil). Atualmente é possível encontrar alguns trabalhos com a aplicação do SMC-Brasil ao longo de diferentes setores da costa brasileira. González et al. (2014) aplicaram o SMC-Brasil em um estudo de caso quanto a erosão na praia de Massaguaçu (litoral norte de São Paulo). Este trabalho mostrou que a presença de ilhas tem importante influência em termos da propagação de ondas e o sistema de correntes dessa praia, gerando áreas de concentração e abrigo a energia de ondas, um padrão que explica a problema de erosão em Massaguaçu. Rodriguez e Dominguez (2017) aplicaram o SMC-Brasil na costa do município de Aracaju, onde puderam verificar a ocorrência de zonas de divergência do transporte longitudinal de sedimentos nas praias do Refúgio-Mosqueiro e na Praia da Coroa do Meio. Além disso, estes autores puderam verificar através de atividades de campo a presença de zonas severas de erosão nestas mesmas localidades apontadas como divergência. Pinheiro et al. (2017) utilizou o SMC-Brasil para caracterizar o clima de ondas na plataforma continental da costa do Rio Grande do Norte, utilizando a base de dados em profundidades intermediárias (pontos DOW). Peixoto (2019) aplicou metodologias de análise de cota de inundação, presentes no SMC-Brasil, para avaliar a amplitude das inundações costeiras devido a eventos meteorológicos extremos, apresentando resultados de cotas de inundação extrema e a área urbana que estaria exposta aos eventos de inundação. Este trabalho demonstrou a importância de se estimar a cota de inundação com maior detalhamento ao longo de uma área, já que foi percebido por este autor valores distintos dessa cota ao longo da mesma área de estudo. Além disso, este trabalho concluiu que o SMC-Brasil produz resultados satisfatórios para estimar a cota de inundação, uma vez que permite também calcular os períodos de retorno para tais cotas. Silva et al. (2016) aplicaram o SMC-Brasil em um estudo de compreensão da dinâmica litorânea da Praia do Forte (litoral norte da Bahia), visando avaliar a vulnerabilidade dessa região a eventos oceanográficos extremos. Neste trabalho, dados observados em campo corroboraram os resultados obtidos através da modelagem, por exemplo, na Praia do Castelo as observações de campo indicaram um estado de equilíbrio, sem evidência de erosão, neste mesmo local a modelagem feita com o SMC-Brasil apontou para a presença de uma zona de convergência da deriva litorânea.

3 METODOLOGIA

Resumidamente, a metodologia utilizada nesse trabalho foi feita a partir da execução dos seguintes passos (Figura 10):

- a) Divisão das praias em setores a cada 100 m.
- b) Compilação de dados batimétricos das praias a partir de cartas náuticas da Marinha do Brasil.
- c) Atividade de campo para obtenção da batimetria próximo a linha de costa das praias da Macumba e de Grumari.
- d) Compilação de dados de granulometria.
- e) Compilação de imagens do Google Earth disponíveis para as praias estudadas.
- f) Análise do comportamento da linha de costa em cada uma das praias.
- g) Análise de dados de boias do SiMCosta na praia de Copacabana, para comparação com o clima de ondas presente no ponto DOW do SMC-Brasil.
- h) Aplicação de metodologias para modelagem de ondas em águas rasas através do SMC-Brasil.
- i) Modelagem do transporte longitudinal de sedimentos (LST) na zona de arrebentação.
- j) Cálculo de zonas de convergência e divergência do LST nas praias.
- k) Aplicação do modelo de Gainza et al. (2018) para cálculo da orientação da forma em planta de equilíbrio estático.
- l) Compilação das informações geradas para determinação da estabilidade em cada uma das praias.

Figura 10 – Fluxograma da metodologia executada neste trabalho.



Fonte: A autora, 2020.

3.1 Divisão da praia em setores

As Figuras 11, 12, e 13 mostram a divisão de setores nas praias a cada 100 m aproximadamente. Nestes setores foram aplicados o cálculo do fluxo de energia de ondas, transporte longitudinal de sedimentos e da forma em planta de equilíbrio estático, como será descrito em detalhes nas seções adiante. Com isso, verificou-se que para o fluxo de energia das ondas e transporte de sedimentos, o uso de setores a cada 200 m era suficiente para representar os fenômenos nas praias. Assim, optou-se por utilizar os resultados de setores a cada 200 m para esses parâmetros, por exemplo o resultado obtido em B foi utilizado no cálculo final de estabilidade em B e B2. Já para o cálculo da forma em planta de equilíbrio estático foram mantidos os resultados a cada 100 m, uma vez que setores a cada 200 m não conseguem detalhar de maneira suave a curvatura da linha de costa das praias estudadas.

Figura 11 – Divisão de setores na praia de Copacabana.



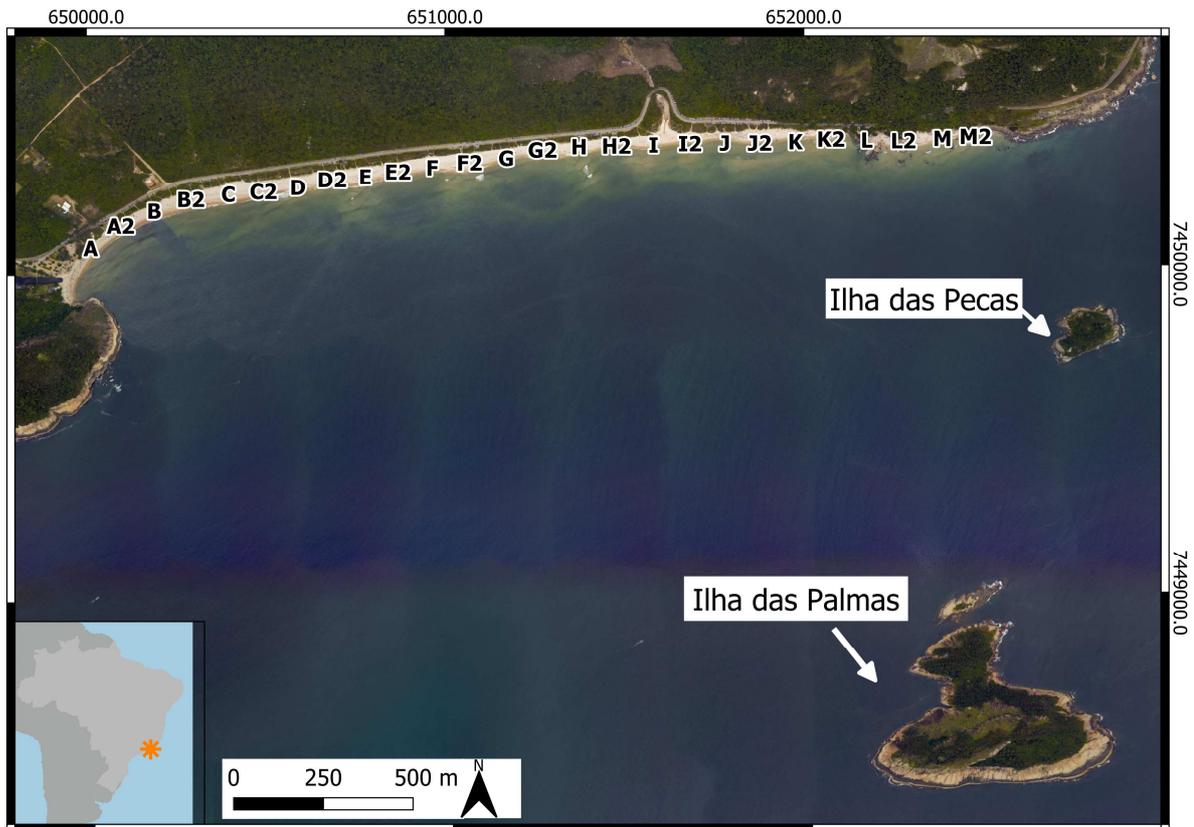
Fonte: A autora, 2020.

Figura 12 – Divisão de setores na praia da Macumba.



Fonte: A autora, 2020.

Figura 13 – Divisão de setores na praia de Grumari.



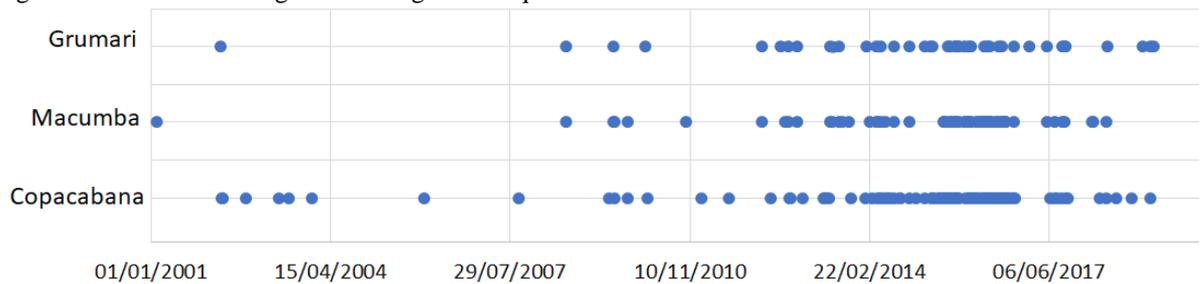
Fonte: A autora, 2020.

3.2 Análise do comportamento da linha de costa

Foram coletadas da plataforma do Google Earth Pro 125 imagens da praia de Copacabana entre abril de 2005 e abril de 2019, 54 imagens da praia da Macumba entre abril de 2002 e junho de 2018, e 35 imagens da praia de Grumari entre abril de 2002 e maio de 2019 (Figura 14). No total, o Google Earth dispõe de mais imagens, no entanto utilizou-se apenas aquelas em que fosse possível identificar a linha de interface entre o continente e o oceano (LCO). Observando a Figura 15, pode-se perceber que a maior frequência de imagens ocorreu a partir de 2012 nas áreas de estudo. Estas imagens foram georreferenciadas no QGIS e a partir delas se desenhou manualmente as LCOs para cada data. A partir das LCOs traçadas se calculou a posição média da LCO (LCO média) como a posição intermediária entre o máximo recuo e avanço da linha de costa. Também foi calculada a variação máxima da LCO (VLCO) em setores a cada 200 m em cada uma das praias. A Figura 16 exemplifica estes procedimentos, nela tem-se a LCO de máximo recuo da linha de costa (linha pontilhada

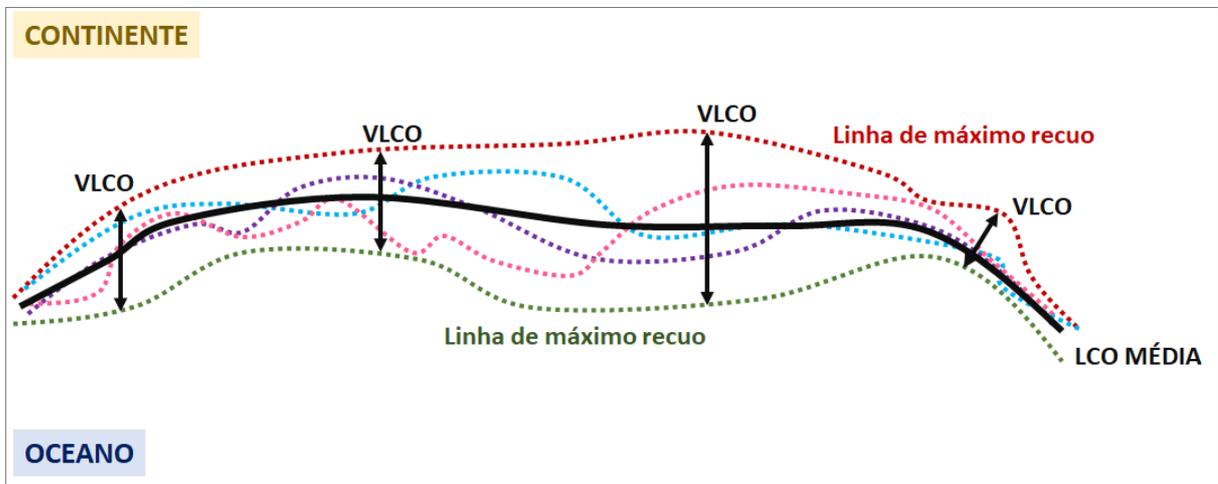
vermelha) e a LCO de máximo avanço (linha pontilhada verde), com a distância entre elas, representada por uma seta preta, sendo a VLCO, e uma linha média entre elas sendo a LCO MÉDIA (linha preta). Sendo assim, a VLCO indica locais onde a variação da posição da linha de costa é maior. A orientação da LCO MÉDIA foi usada para comparação com a orientação da forma em planta de equilíbrio estático em cada um dos setores.

Figura 14 – Datas das imagens do Google Earth que foram utilizadas na análise de linha de costa.



Fonte: A autora, 2020.

Figura 15 – Esboço mostrando o cálculo da VLCO e da LCO MÉDIA, a partir de diferentes LCOs.



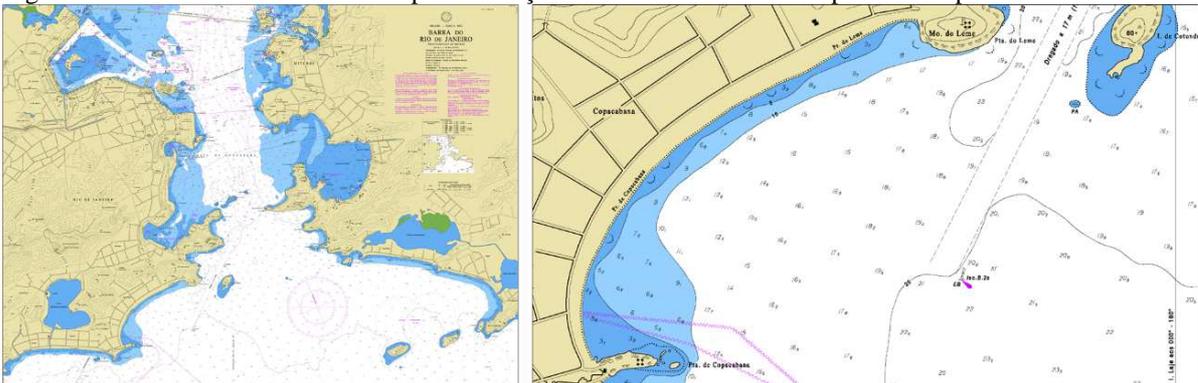
Legenda: VLCO – variação entre o máximo avanço e recuo da linha de costa (setas pretas); LCO MÉDIA: linha média da linha de costa (linha preta); LCOs: linhas de costa (linhas pontilhadas).

Fonte: A autora, 2020.

3.3 Aquisição e compilação de dados batimétricos

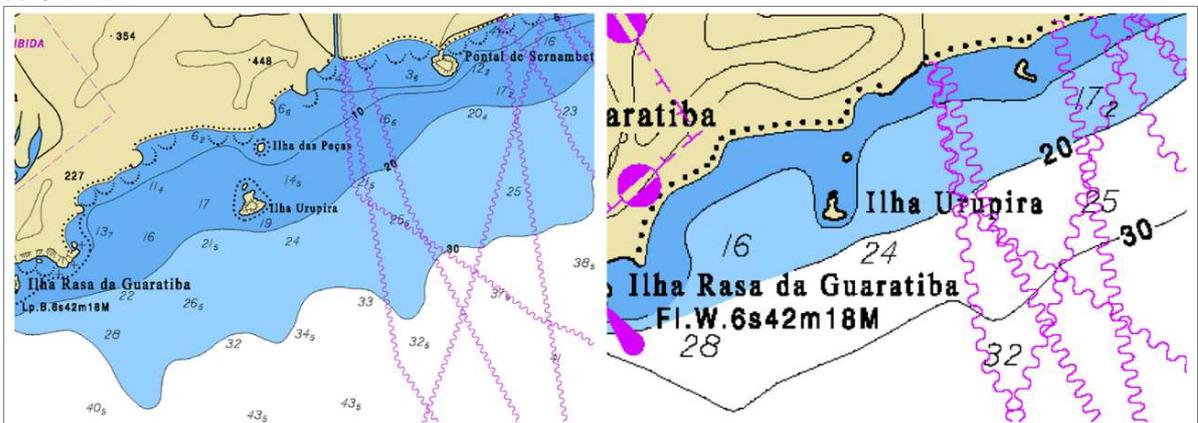
O SMC-Brasil contém uma base de dados batimétricos para a costa brasileira obtida de cartas náuticas e folhas de bordo dentro do módulo IH-DATA. No entanto, para aplicação das metodologias de modelagem em águas rasas é necessário o uso de dados batimétricos mais refinados. Para a praia de Copacabana, os registros presentes na carta náutica de número 1511 da baía de Guabanabara foram suficientes para aplicação dos modelos de propagação de ondas para águas rasas (Figura 16). Já nas praias da Macumba e de Grumari foi necessário realizar um levantamento batimétrico, uma vez que as cartas para esta região (número 1620 e 23100) não apresentam o nível de resolução necessário para aplicação dos modelos de propagação de ondas (Figura 17).

Figura 16 – Carta náutica 1511 usada para obtenção das cotas batimétrica na praia de Copacabana.



Fonte: Marinha do Brasil.

Figura 17 – Cartas náuticas 1620 e 23100 disponíveis para a região oceânica adjacente às praias da Macumba e de Grumari.



Fonte: Marinha do Brasil.

A atividade de campo para mapeamento da batimetria nas praias da Macumba e de Grumari ocorreu nos dias 10 e 11 de junho de 2019 utilizando um ecobatímetro de mão da marca Speedtech Instruments. Foram coletados dados em 191 pontos até uma distância de 2 km da costa (Figura 18), durante maré de quadratura. Em cada um dos pontos foram feitas 5 medidas de profundidade, registro da localização com GPS da marca GARMIN, e registro da hora da medição (Figura 19). Para gerar o mapa batimétrico final, primeiro calculou-se a média aritmética dos valores de profundidade levantados, a fim de diminuir a influência do movimento provocado pelas ondas durante as medições. Depois, as profundidades foram subtraídas pelo valor de altura da maré no momento da sua medição para que a batimetria ficasse no nível de redução da Marinha, a altura de maré foi obtida através do software SisBaHIA com resolução temporal de 1 minuto. Após essa etapa, a batimetria levantada foi unida a registros de cartas náuticas para região entre 2 a 4 km da costa. Por fim, os dados foram interpolados a cada 50 m mantendo os pontos batimétricos medidos, gerando uma malha para ser utilizada na modelagem de ondas em água rasa com declividade suave o suficiente para rodar os modelos (Figura 20).

Figura 18 – Pontos onde foram coletados dados batimétricos nas praias da Macumba e Grumari.



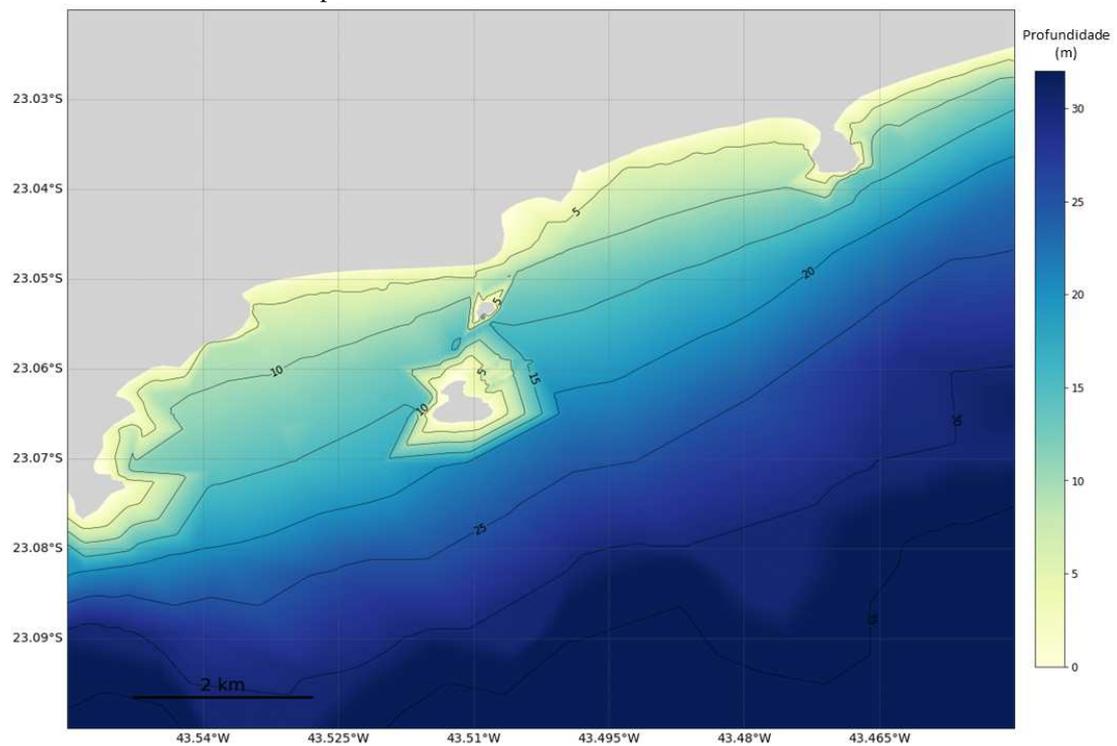
Fonte: adaptado do Google Earth.

Figura 19 – Registro da coleta de dados batimétricos utilizando ecobatímetro de mão



Fonte: A autora, 2020.

Figura 202 – Resultado da batimetria das praias da Macumba e Grumari após a união de cotas batimétricas coletadas e compiladas de cartas náuticas.



Fonte: A autora, 2020.

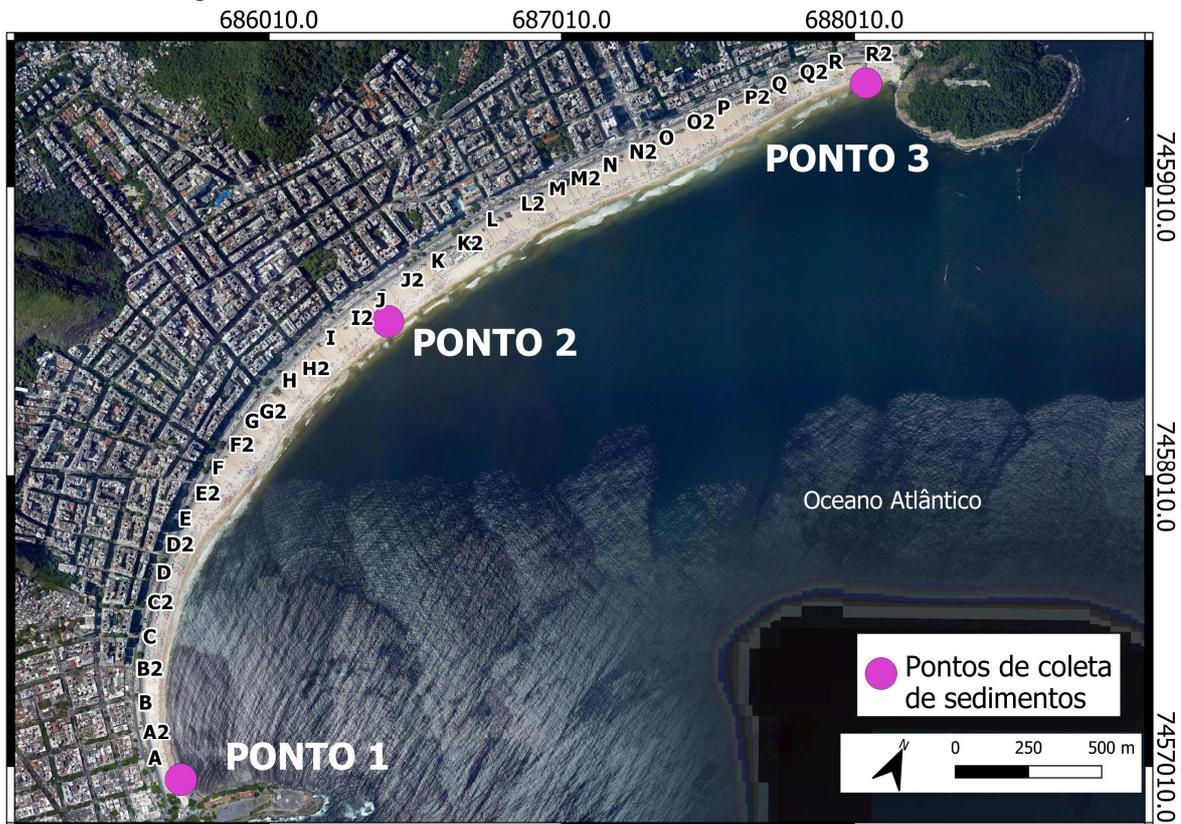
3.4 Compilação de dados sedimentológicos

Os dados de granulometria para a praia de Copacabana foram cedidos pelo Laboratório de Geografia Marinha da UFRJ, com informações de campanhas realizadas em 3 pontos entre os anos de 2017 e 2018. A Tabela 1 mostra os valores de D_{50} nos pontos em Copacabana, enquanto a Figura 21 mostra os pontos de coletas. Os dados do ponto 1 foram utilizados nos setores de A a F, os dados do ponto 2 foram utilizados nos setores entre G e M e os dados do ponto 3 foram utilizados nos setores de N a R2.

Tabela 1 – Valores de D_{50} nos pontos 1, 2, 3 e 4 da praia de Copacabana

Ponto de coleta	D_{50} (mm)
PONTO 1	0.28
PONTO 2	0.37
PONTO 3	0.33

Figura 21 – Localização dos pontos de coleta de sedimentos na praia de Copacabana e da divisão de setores nesta praia.



Fonte: A autora, 2020.

Os dados de sedimentos da praia da Macumba foram obtidos de Carvalho (2019), no qual se encontram dados de granulometria obtidos através de campanhas realizadas em pontos dessa praia entre os anos de 2016 e 2018, foram feitas médias dos valores de D_{50} em cada um dos pontos deste trabalho. A Tabela 2 mostra os valores de D_{50} médio em cada um desses pontos e a Figura 22 mostra os pontos de localização dos dados de Carvalho (2019) Foram utilizados os valores de D_{50} do ponto 1 nos setores A, B e C, do ponto 2 nos setores D, E, F e G; do ponto 3 nos setores H, I e J e do ponto 4 nos setores K e L.

Tabela 2 – Valores de D_{50} nos pontos 1, 2, 3 e 4 da praia da Macumba

Pontos de coleta	D_{50} (mm)
PONTO 1	0.65
PONTO 2	0.62
PONTO 3	0.96
PONTO 4	0.63

Fonte: Carvalho, 2019.

Figura 22 – Localização dos pontos de coleta de sedimentos na praia da Macumba (Carvalho, 2019) e da divisão de setores nesta praia.



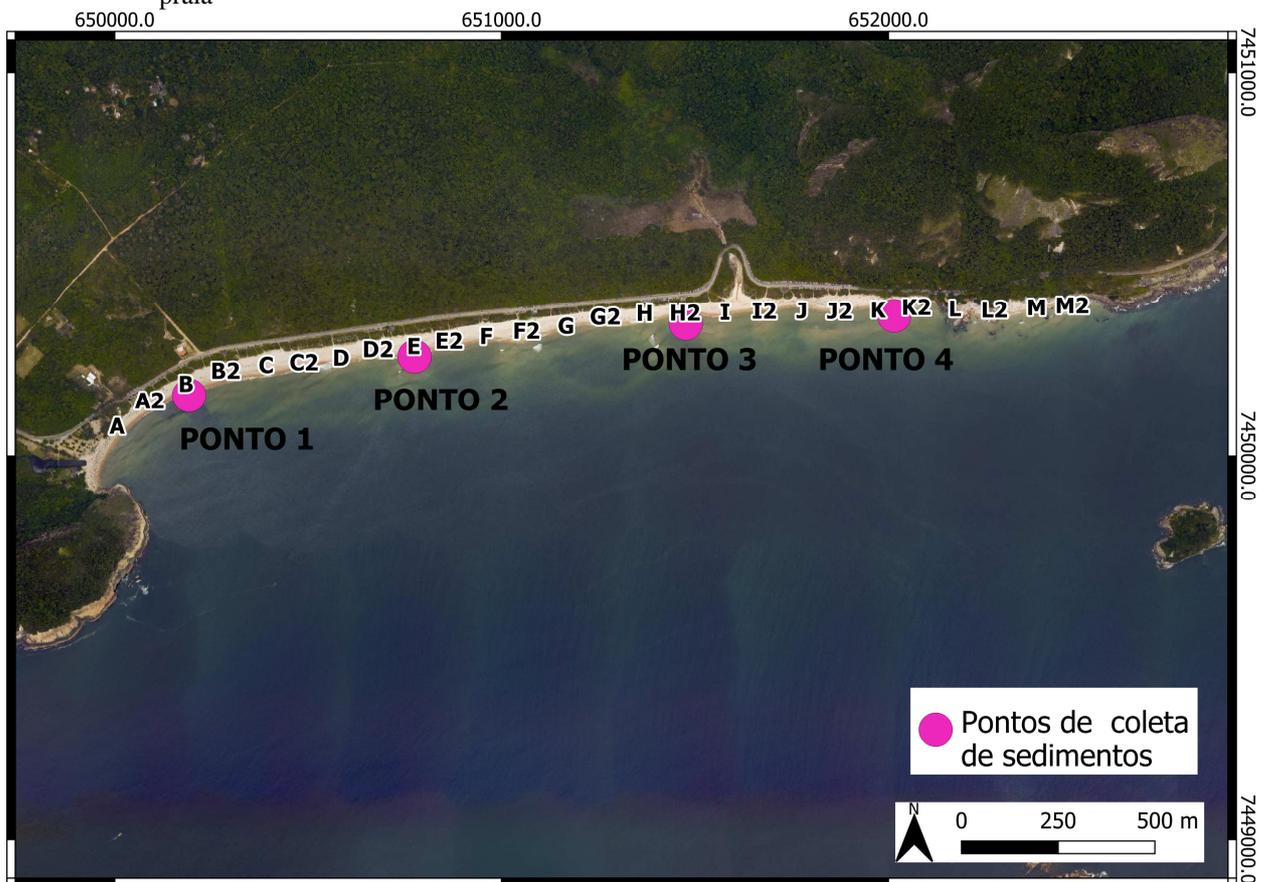
Fonte: A autora, 2020.

Para a praia de Grumari foram usados dados de campanhas realizadas em 4 pontos dessa praia pelo Laboratório de Oceanografia Geológica da UERJ em 2018 (Figura 23). A Tabela 3 apresenta o valor de D50 dos pontos de coleta mostrados na Figura 23. Os dados dos pontos 1, 2, 3, 4 foram utilizados nos setores A-C, D-G, H-J, K-M, respectivamente.

Tabela 1 – Valores de D₅₀ nos pontos 1, 2, 3 e 4 da praia de Grumari

Pontos de coleta	D50 (mm)
PONTO 1	0.45
PONTO 2	0.45
PONTO 3	0.40
PONTO 4	0.35

Figura 23 – Localização dos pontos de coleta de sedimentos na praia de Grumari e da divisão de setores nesta praia

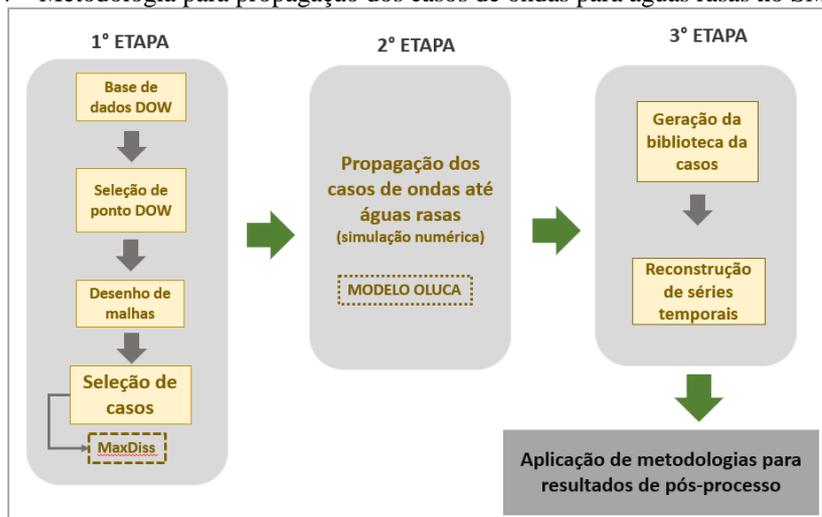


Fonte: A autora, 2020.

3.5 Modelagem de ondas em água rasa

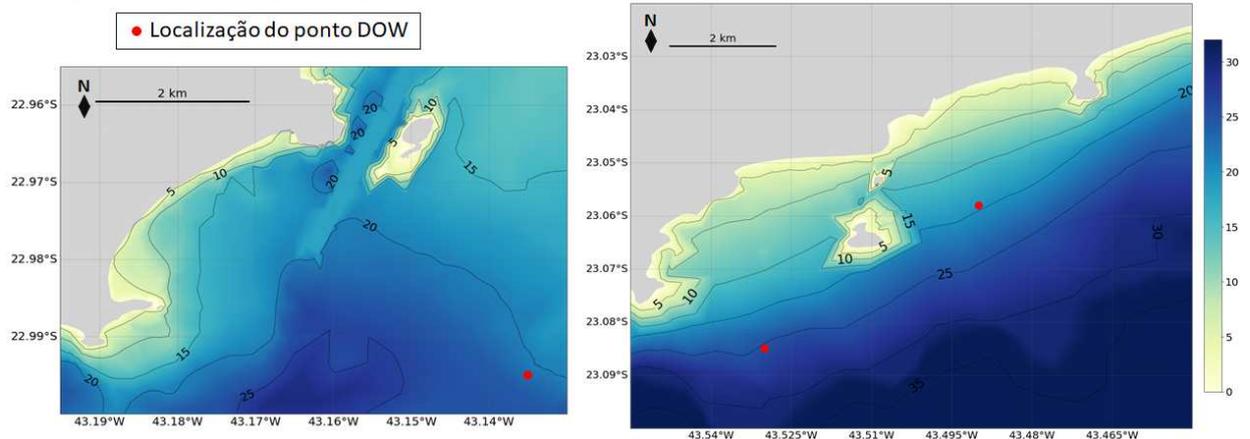
A propagação final de ondas até a costa deve ser feita utilizando um modelo numérico que resolva bem refração e difração, e com dados batimétricos locais de maior resolução. Para propagação para águas rasas foi empregado o modelo espectral de propagação de ondas OLUCA-SP incluído no SMC-Brasil, que faz parte do “Modelo de Morfodinâmica de Praias” (MOPLA) com dados de entrada de estados de mar do ponto DOW selecionado para cada uma das praias. O esquema mostrado na Figura 24 resume o procedimento para propagação dos estados de mar do ponto DOW para águas rasas. Foram escolhidos pontos DOW nas profundidades 23.2 m, 19.1 m e 25.3 m para as praias de Copacabana, Macumba e Grumari, respectivamente (Figura 25).

Figura 24 – Metodologia para propagação dos casos de ondas para águas rasas no SMC-Brasil



Fonte: Adaptado do Manual do SMC-Brasil.

Figura 25 – Localização dos pontos DOW em cada uma das praias.



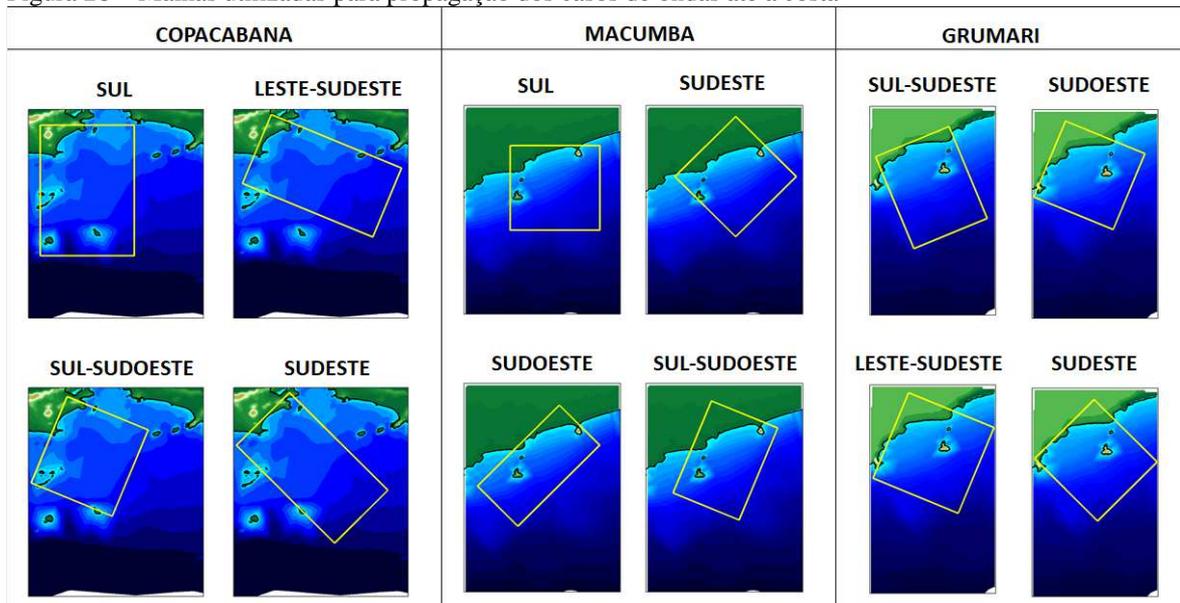
Fonte: A autora, 2020.

Cada ponto DOW possui aproximadamente 500 mil estados de mar, logo a propagação de cada um desses estados até a costa demandaria um esforço computacional muito grande. Por conta disso, se faz necessário empregar uma técnica de modelagem híbrida, a qual consiste no uso de técnicas estatísticas para reduzir o número de estados de mar que serão propagados a partir dos modelos numéricos. A Figura 26 mostra o desenho de algumas malhas utilizadas para propagação dos casos de ondas até a costa, estas malhas foram desenhadas tomando como base a estatística de ondas de um ponto DOW offshore, conforme indicado no manual do SMC-Brasil. Camus et al. (2011), demonstraram que a escolha de 100 casos a partir do MaxDiss é suficiente para a transformação do clima de ondas de águas profundas para águas rasas. Por isso, foram selecionados 100 estados de mar e estes foram propagados até a costa levando em consideração apenas o nível médio da maré. Por fim, os estados de mar já propagados até a costa foram interpolados para reconstruir a série temporal horária de ondas na zona de arrebentação de 1948 a 2008 nos setores a cada 100 m em cada uma das praias. A partir dos valores horários de altura significativa de onda na quebra (H_b), foi calculado o fluxo de energia de ondas (F) para cada estado de mar de cada praia como o produto entre a energia da onda (E) e a celeridade de grupo (C_g), utilizando a equação 19:

$$F = E * C_g = (1/16) * \rho * g * H_b^2 * C_g \quad (19)$$

onde ρ é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade, H_b é a altura significativa de onda na arrebentação e C_g é a celeridade de grupo das ondas. A partir dos valores de F obtidos para toda a série calculou-se o valor do fluxo médio de energia (EF), como a média dos valores de F no tempo. A direção do fluxo médio de energia das ondas (θ_{EF}) foi calculado como $\theta_{EF} = \arctan\left(\frac{\overline{F_y}}{\overline{F_x}}\right)$, onde o eixo x representa a direção leste-oeste e o eixo y a direção norte-sul, assim, $\overline{F_y}$ é componente meridional de EF e $\overline{F_x}$ é a componente zonal de EF .

Figura 26 – Malhas utilizadas para propagação dos casos de ondas até a costa

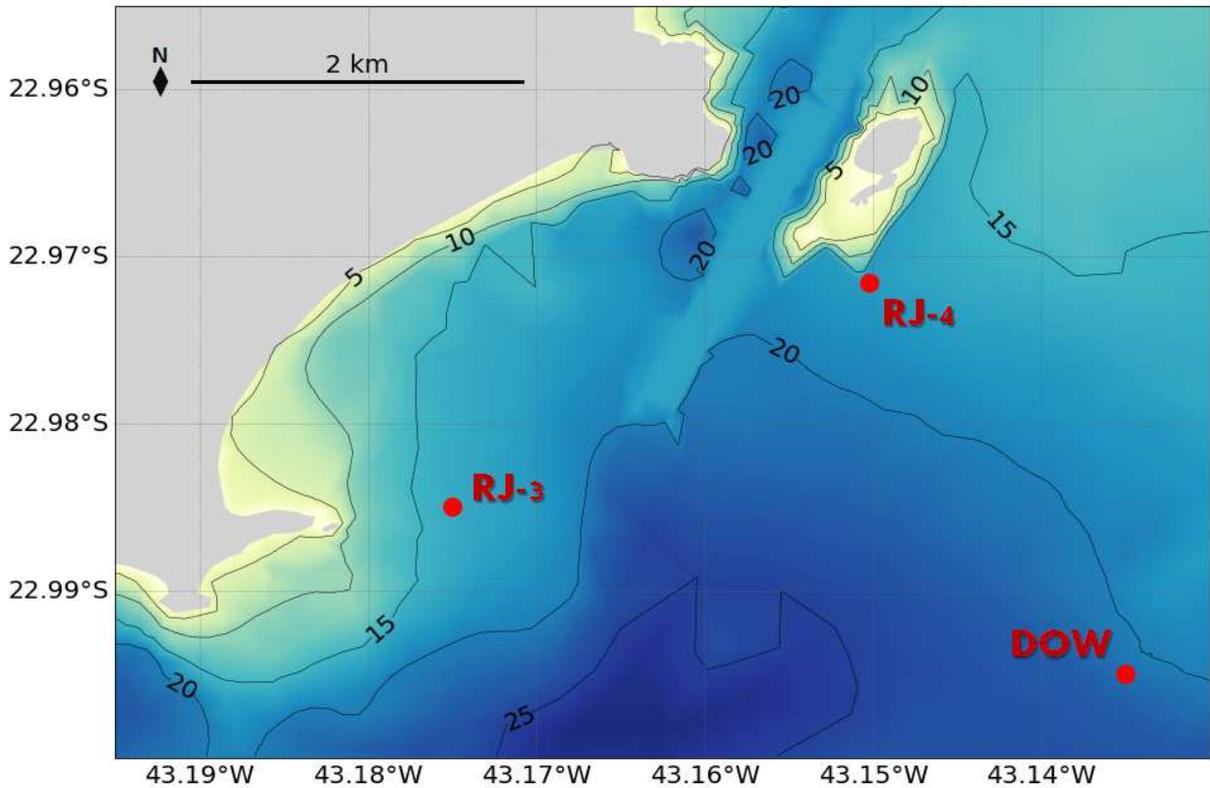


Fonte: Adaptado da saída do SMC-Brasil.

3.6 Análise de dados de boias do SiMCosta

Foram utilizados dados das boias do Programa SiMCosta RJ-3 e RJ-4, localizadas sobre a cota batimétrica de 17 m e 18 m, respectivamente, para comparação com a estatística do ponto DOW na praia da Copacabana (Figura 27). A boia RJ-3 esteve operando entre os dias 15 de julho de 2016 e 12 de setembro de 2019, foram utilizados os dados desse período. Já a boia RJ-4, até o presente momento continua em operação, portanto foram utilizados dados do início do seu funcionamento (28 de agosto de 2017) até o dia 8 de setembro de 2020.

Figura 27 – Mapa batimétrico mostrando a localização das boias RJ-3 e RJ-4 do SiMCosta e do ponto DOW selecionado em Copacabana.



Fonte: A autora, 2020.

3.7 Transporte longitudinal de sedimentos (LST)

O cálculo do transporte longitudinal de sedimentos (LST) foi realizado utilizando a equação do CERC (USACE, 1984), exibida na equação 20.

$$LST = \frac{\rho K \sqrt{(g/Y_b)}}{16(\rho_s - \rho)(1 - \alpha)} H_b^{2.5} \text{sen}(2\theta_b) \quad (20)$$

Onde Y_b é o índice de quebra da onda (0,8), α é o índice de porosidade (0,4), ρ_s é a densidade do sedimento (foi usado o valor $2,65 \text{ g/cm}^3$, que corresponde a densidade do quartzo), e θ_b é o ângulo da onda na arrebentação, H_b é a altura de ondas na arrebentação e K é um coeficiente empírico dado por $1,4^{2.5} D_{50}$ (Del Valle et al., 1983). Foi calculado o transporte de sedimentos médio ($LST_{\text{MÉDIO}}$), transporte de sedimentos residual ($LSTR$) e o transporte de sedimentos total (LST_{TOTAL}) em setores a cada 200 m nas praias estudadas. O

$LST_{MÉDIO}$ foi calculado como a média no tempo de todos os valores de LST de determinado setor, com este parâmetro foram calculadas as zonas de convergência e divergência do transporte longitudinal de sedimentos. Este cálculo foi feito levando em consideração o valor e a direção do $LST_{MÉDIO}$ entre os setores. Já o LSTR representa o somatório de todos os valores de LST para a direita e o somatório de todos os valores de LST para a esquerda da praia. Enquanto o LST_{TOTAL} foi calculado como o somatório do módulo dos LSTR, ou seja este parâmetro indica valores onde há maior mobilidade dos sedimentos.

3.8 Análise da forma em planta de equilíbrio estático

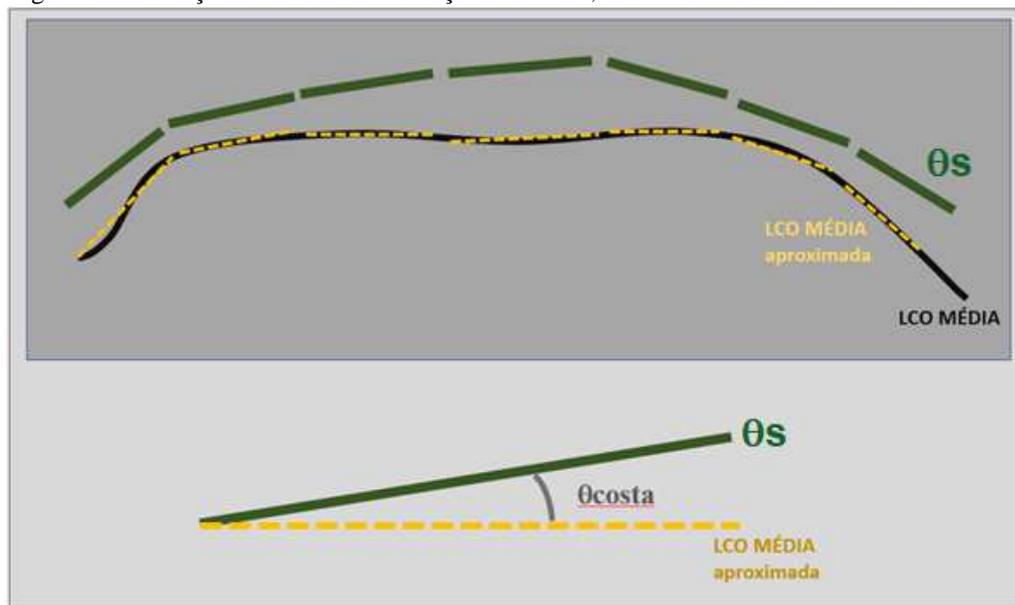
O cálculo da orientação da forma em planta de equilíbrio estático (θ_s) foi feito aplicando o modelo de Gainza et al. (2018) em setores a cada 100 m nas praias estudadas (equação 33). A Tabela 4 mostra os parâmetros necessários para aplicação deste modelo e a fonte desses parâmetros utilizados neste trabalho. A declividade do perfil submerso foi obtida dos mapas batimétricos de cada uma das praias, enquanto os outros parâmetros com informações a respeito das ondas na arrebentação foram obtidos a partir da modelagem de água rasa, descrita anteriormente, ou da literatura. O valor de C_f utilizado foi 0,01 (USACE, 1984). Devido à aplicação da segunda derivada na equação 38 $\left(\frac{\partial^2 H_B}{\partial y^2}\right)$, os parâmetros obtidos em alguns setores mais próximos aos promontórios foram utilizados nos cálculos e assim esses não aparecem nos resultados de θ_s . Em Copacabana foi possível obter variáveis de um setor extra entre o promontório do Forte de Copacabana e o setor A, sendo assim, a aplicação da segunda derivada utilizou os resultados desse setor extra e do setor A, fazendo com que os resultados de θ_s sejam mostrados a partir do setor A2. Em Grumari também foi possível adicionar um setor extra nos cálculos a oeste do setor A, logo os resultados de θ_s também começam a partir de do setora A2. Já na Macumba, utilizou-se os setores A e A2 para gerar essa segunda derivada inicial e, portanto, nesta praia foi obtido o valor de θ_s nos setores de B a L2.

Após a obtenção dos valores de θ_s em cada um dos setores, calculou-se o valor do ângulo formado entre a LCO MÉDIA e a orientação da forma em planta de equilíbrio estático (θ_s) em cada setor, este ângulo foi chamado de θ_{costa} (Figura 28).

Tabela 2 – Fonte dos parâmetros utilizados como entrada para aplicação do modelo de Gainza et al. (2018)

Parâmetros	Fonte
coeficiente de arrasto (f)	USACE, 1984
distância longitudinal a costa (y)	SMC-Brasil
declividade da praia	Mapas batimétricos
distância entre a linha de costa e a arrebentação das ondas (b)	SMC-Brasil
ângulo de incidência da crista de onda na quebra (twb)	SMC-Brasil
coeficiente de viscosidade turbulenta	Battjes (1975)

Fonte: A autor, 2020.

Figura 28 – Esboço demonstrando a relação entre a θ_s , a LCO MÉDIA e o θ_{costa} 

Legenda: θ_s - orientação da praia em equilíbrio estático; LCO MÉDIA – linha de costa média; θ_{costa} – ângulo formado entre a θ_s e a orientação da LCO MÉDIA.

Fonte: A autora, 2020.

3.9 Classificação de estabilidade das praias

Para gerar a classificação de estabilidade, fez-se uma avaliação de sensibilidade aos parâmetros levantados nas praias cada um dos setores. Dentro desse contexto, considerou-se sensibilidade como “o grau segundo o qual um sistema é afetado, tanto adversamente quanto benéficamente, a variabilidades ou mudanças climáticas” IPCC (2007a, p.881.). Sendo assim, para avaliar essa sensibilidade, primeiro os valores de EF, VLCO, $LST_{MÉDIO}$ e do θ_{costa} em cada um dos setores foram normalizados entre 0 e 1. Os valores de EF e $LST_{MÉDIO}$ foram aplicados em dois setores consecutivos, por exemplo, o valor obtido de EF no setor B foi aplicado na conta final de estabilidade em B e B2.

Após a normalização dos parâmetros, o resultado obtido para cada variável em cada setor foi somado e dividido pelo número de parâmetros, ou seja 4 (equação 21). Os setores com o resultado menor que o percentil 20 foram considerados muito estáveis; locais com valores entre o percentil 20 e o percentil 50 foram considerados estáveis; entre o percentil 50 e 80 os setores foram considerados instáveis; e locais com o percentil maior que 80 foram considerados muito instáveis.

$$IE = \frac{EF_N + VLCO_N + LST_N + \theta_{costa_N}}{4} \quad (21)$$

Onde IE é o índice de estabilidade para cada setor, EF_N , $VLCO_N$, LST_N e θ_{costa_N} são respectivamente os valores de EF, VLCO, $LST_{MÉDIO}$ e θ_{costa} normalizados entre 0 e 1.

Parâmetros que apresentam valores mais próximos dos valores máximos, contribuem mais no resultado final de estabilidade. Desse modo, para compreender a contribuição de cada um dos parâmetros avaliados (EF, VLCO, $LST_{MÉDIO}$ e θ_{costa}) para a instabilidade da praia como um todo, foi calculado o percentual de contribuição desses parâmetros para a instabilidade da praia (equação 22).

$$\%P = \frac{\sum P_N}{\sum P_T} = \frac{\sum P_N}{\sum EF_N + \sum VLCO_N + \sum LST_N + \sum \theta_{costa_N}} \quad (22)$$

Onde, %P é o percentual de contribuição para a instabilidade da praia como um todo de cada parâmetro P, ou seja de EF, VLCO, $LST_{MÉDIO}$ e θ_{costa} ; $\sum P_N$ é a soma de todos os valores de cada parâmetro normalizado (P_N) e $\sum P_T$ é o valor do somatório total de todos os parâmetros normalizados (P_T), ou seja o somatório de todos os EF_N , $VLCO_N$, LST_N e θ_{costa_N} .

A partir da classificação final de estabilidade e os valores de %P em cada um dos setores, foram propostas zonas nas praias agrupando os setores que apresentassem condições semelhantes.

4 RESULTADOS

4.1 Praia de Copacabana

4.1.1 Clima de ondas (1968 – 2008)

No ponto DOW selecionado para a praia de Copacabana, 93,66% do espectro de ondas vem das direções sul-sudeste (47,16%), sul (24,94%) e sudeste (21,56%) com Hs50% de 1,22 m, 1,34 m e 1,68 m, respectivamente (Tabela 5). Com relação aos regimes mais extremos, estas direções sul-sudeste, sul e sudeste apresentaram os seguintes valores de Hs12: 3,00 m, 3,32 m e 2,63 m, respectivamente. Apesar de compreender apenas 5,22% do espectro, a direção sul-sudoeste foi a que apresentou maiores valores de Hs médio (1,68 m) nesta praia, bem como de Hs12 (3,50 m), ou seja, esta direção compreende as ondas de casos mais extremos. A Figura 29 mostra a rosa de ondas do ponto DOW selecionado em Copacabana, e as rosas para cada uma das estações do ano. Durante o verão, a maioria das ondas tem altura até 1,71 m, também observa-se que 30% das ondas incidentes nesta estação vem da direção sudeste e aproximadamente 50% delas da direção sul-sudeste, com apenas 15% das ondas incidentes sendo da direção sul. Nos meses de outono, a maior parte das ondas teve altura entre 0,71 e 2,14 m. Além disso, percebe-se uma redução da incidência de ondas de sudeste e maior ocorrência de ondas de sul em relação ao que foi observado no verão, de modo que em torno de 45% e 30% das direções observadas são de sul-sudeste e sul, respectivamente, durante os meses de março, abril e maio. Na rosa de ondas de inverno, observa-se que quase 45% das ondas vem de sudeste e mais de 30% das ondas incidentes são da direção sul, com a maior parte das ondas atingindo até 2,14 m. Nesta rosa, nota-se a presença de aproximadamente 10% de ondas de sul-sudoeste, das quais em torno de 1/3 apresentam alturas entre 2,14 e 2,86 m. Nos meses de primavera, quase todo o espectro apresenta alturas entre 1,14 m e 2,29 m, além destas percebe-se a presença de ondas entre 2,29 e 2,86 m. Em termos de direção, vemos que pouco mais que 45% das ondas vem de direção sul-sudeste, em torno de 22% da direção sul e mais que 22% da direção sudeste.

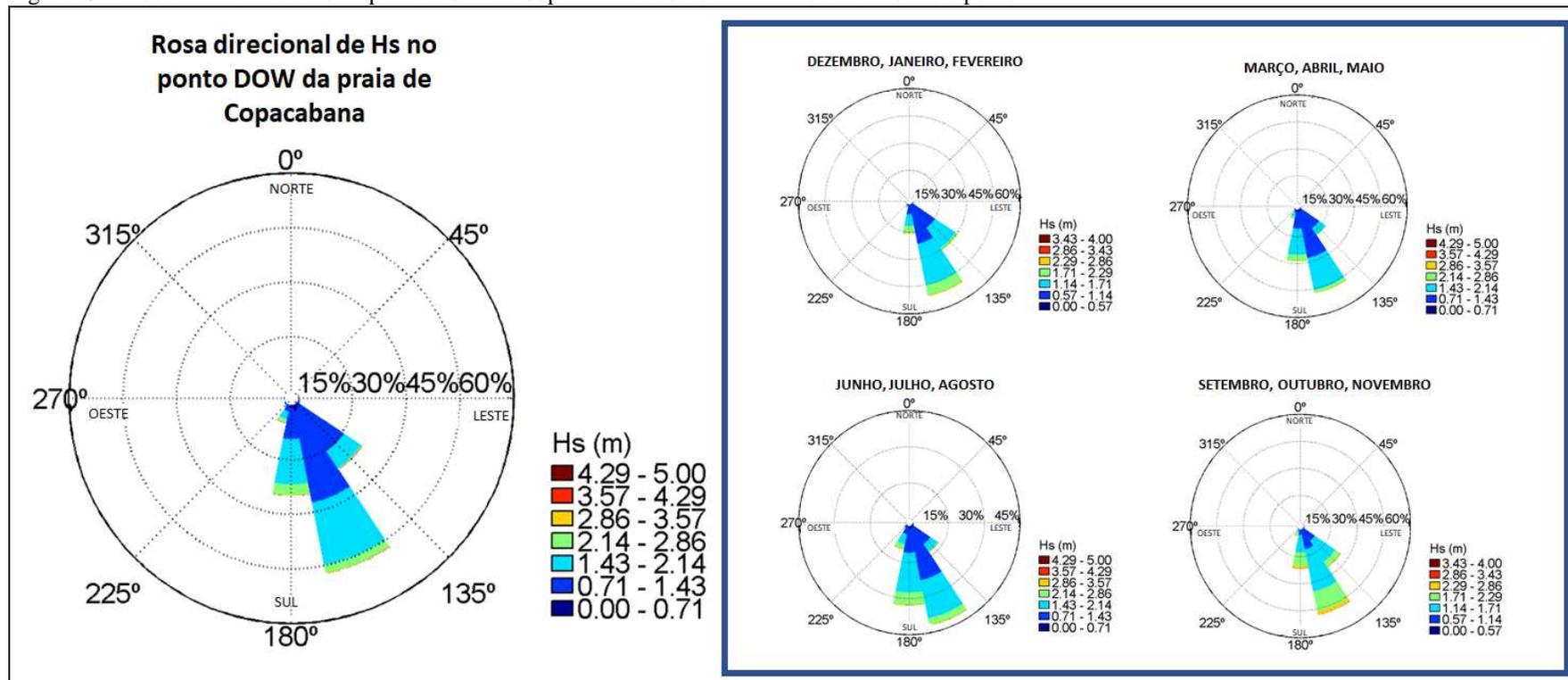
Tabela 5 – Relatório de altura significativa de ondas (Hs) obtido do SMC-Brasil para o ponto DOW selecionado na praia de Copacabana.

Setor	%	Hs_{50%} (m)	Hs_{75%} (m)	Hs_{95%} (m)	Hs_{99%} (m)	Hs12 (m)
N	0,00	-	-	-	-	-
NNE	0,00	-	-	-	-	-
NE	0,00	-	-	-	-	-
ENE	0,00	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
E	0,01	0,83	0,94	0,97	1,01	1,01
ESE	0,52	1,03	1,19	1,43	1,74	1,94
SE	21,56	1,22	1,46	1,87	2,23	2,63
SSE	47,16	1,34	1,65	2,14	2,52	3,00
S	24,94	1,59	1,92	2,40	2,82	3,32
SSW	5,22	1,68	2,10	2,61	2,97	3,50
SW	0,55	1,27	1,55	2,01	2,56	2,90
WSW	0,03	1,18	1,40	1,61	1,76	1,79
W	0,00	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
WNW	0,00	-	-	-	-	-
NW	0,00	-	-	-	-	-
NNW	00,00	-	-	-	-	-

Legenda: (%) - percentual de ocorrência de cada uma das direções; Hs_{50%} - percentil 50 do Hs; Hs_{75%} - percentil 75 do Hs; Hs_{95%} - percentil 95 do Hs; Hs_{99%} - percentil 99 do Hs; Hs12 – altura significativa extrapolada em 12 horas.

Fonte: A autora, 2020.

Figura 29 – Rosa direcional de Hs no ponto DOW de Copacabana e rosas direcionais sazonais neste ponto.



Fonte: Adaptado da saída do programa SMC-Brasil.

4.1.2 Comparação entre os dados de boias e o ponto DOW em Copacabana

As Tabelas 6 e 7 mostram o valor percentual de ocorrência de cada uma das direções e o percentil 50, 75, 95 e 99 de Hs das boias RJ-3 e RJ-4. No período analisado a RJ-4 apresentou poucos intervalos de tempo sem dados, enquanto que na RJ-3 entre setembro de 2017 e fevereiro de 2018 observa-se uma grande lacuna nos registros, outra lacuna é observada entre setembro de 2018 e novembro de 2018 (Figura 30).

Tabela 6 – Percentual de direções de ondas na boia RJ-3, com os percentis 50, 75 95 e 99 de Hs de cada uma dessas direções.

Direção	%	Hs50% (m)	Hs75% (m)	Hs95% (m)	Hs99% (m)
N	0,00	-	-	-	-
NNE	0,00	-	-	-	-
NE	0,00	-	-	-	-
ENE	0,00	-	-	-	-
E	10,06	0,83	0,97	1,23	1,49
ESE	43,52	0,95	1,24	1,82	2,38
SE	33,76	1,14	1,47	2,10	2,53
SSE	11,59	1,41	1,77	2,25	2,65
S	0,84	1,70	2,01	2,39	2,60
SSW	0,00	-	-	-	-
SW	0,006	-	-	-	-
WSW	0,00	-	-	-	-
W	0,00	-	-	-	-
WNW	0,00	-	-	-	-
NW	0,00	-	-	-	-
NNW	0,00	-	-	-	-

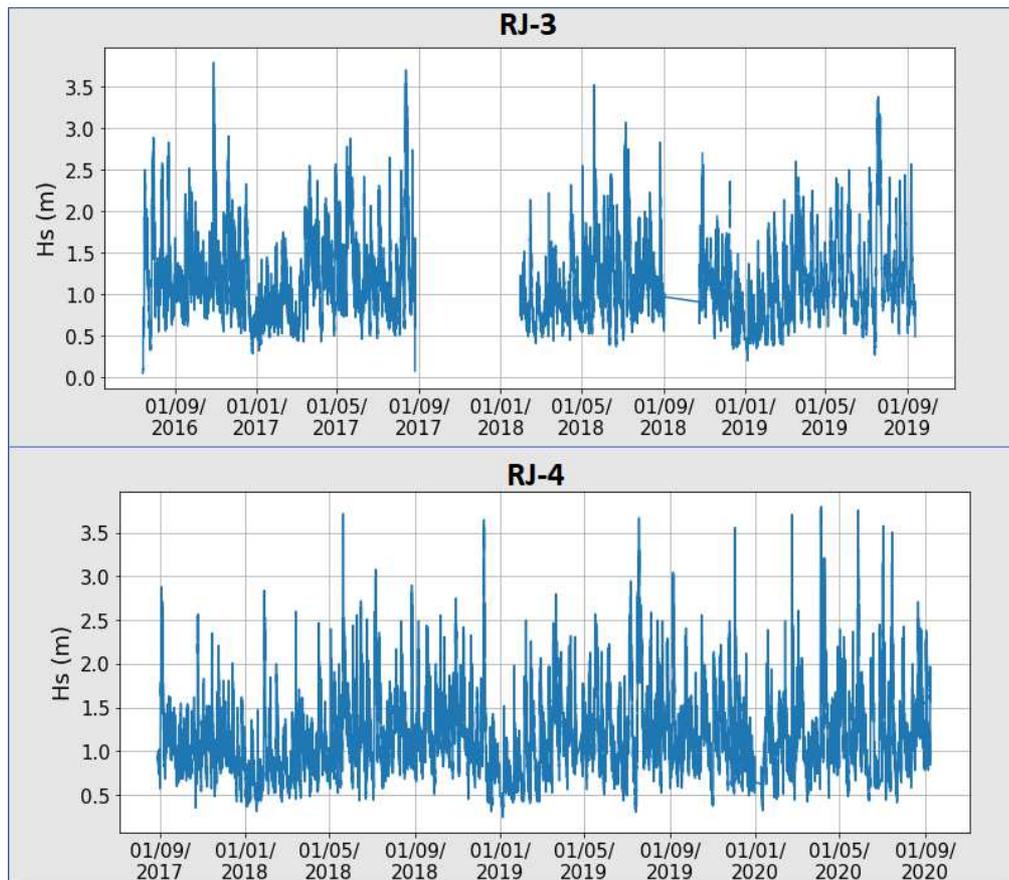
Fonte: A autora, 2020.

Tabela 7 – Percentual de direções de ondas na boia RJ-4, com os percentis 50, 75 95 e 99 de Hs de cada uma dessas direções.

Direção	%	Hs50% (m)	Hs75% (m)	Hs95% (m)	Hs99% (m)
N	0,00	-	-	-	-
NNE	0,00	-	-	-	-
NE	0,00	-	-	-	-
ENE	0,00	-	-	-	-
E	1,73	0,83	0,97	1,23	1,49
ESE	29,16	0,95	1,24	1,82	2,38
SE	40,49	1,14	1,47	2,10	2,53
SSE	26,49	1,41	1,77	2,25	2,65
S	2,07	1,70	2,01	2,39	2,60
SSW	0,00	-	-	-	-
SW	0,00	-	-	-	-
WSW	0,00	-	-	-	-
W	0,00	-	-	-	-
WNW	0,00	-	-	-	-
NW	0,00	-	-	-	-
NNW	0,00	-	-	-	-

Fonte: A autora, 2020.

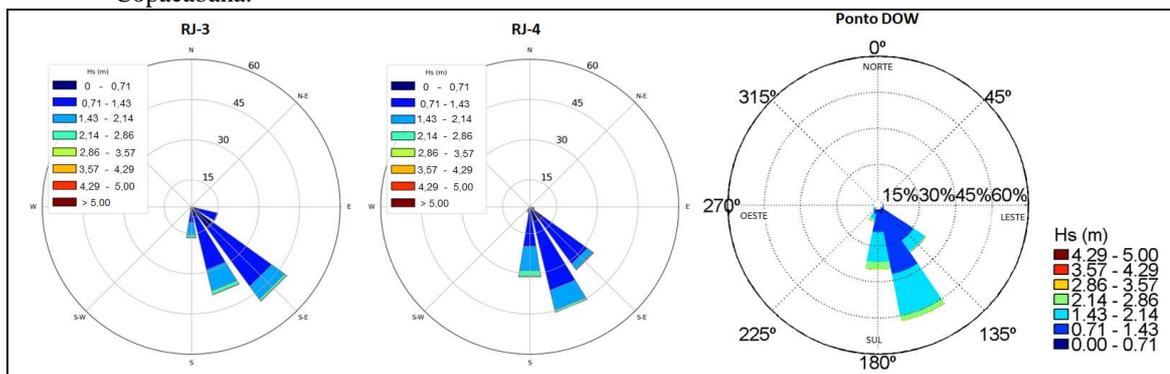
Figura 30 – Série temporal de Hs (m) das boias do SiMCosta RJ-3 e RJ-4.



Fonte: A autora, 2020.

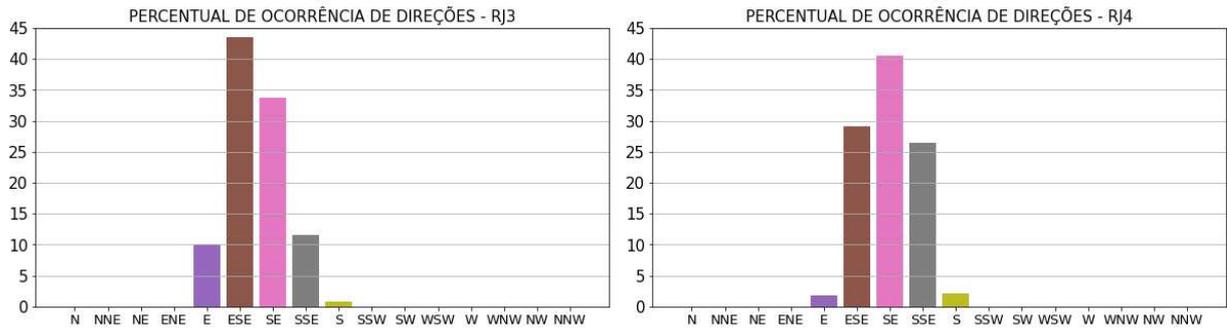
A Figura 31 mostra rosas de ondas das boias para o período analisado, juntamente com a rosa de ondas do ponto DOW escolhido para propagação das ondas até a costa. Na RJ-4 o maior valor de Hs registrado foi 3,8 m, o valor do percentil 50 dessa boia foi de 1,07 m. Nesta boia, 40,49% das ondas registradas foram da direção SE, seguido por 29,16% de ESE, 26,49% da direção SSE, 2,07% da direção sul e 1,73% de E (Figura 32). Estas últimas compreendem as menores ondas, ao passo que as ondas de S são apresentadas as maiores alturas. Na boia RJ-3 vemos uma maior ocorrência de ondas de E quando comparado a RJ4, atingindo um valor de 10,06%. O maior percentual dessa boia foi da direção ESE, com um valor de 43,52%, a direção SE apresentou um valor de 33,76%, ondas de SSE representaram 11,59% e ondas de S apenas 0,84% (Figura 32). Também nesta boia os menores valores de Hs foram da direção E, quando olhados para os maiores valores vemos que até o percentil 95 estes são da direção S, sendo o percentil 99 da direção SE maior que desta. Observando a Figura 31, vemos que de uma maneira geral, o ponto DOW selecionado para esta praia apresentou bastante semelhança com os dados de boias levantado, sendo a boia RJ-4 a que tem maior similaridade. Observando a posição dessas boias (Figura 27), vemos que a RJ-3 fica em uma posição relativamente mais abrigada em relação a RJ-4.

Figura 31 – Comparação entre as rosas de ondas das boias do SiMCosta RJ-3 e RJ-4 e o ponto DOW da Praia de Copacabana.



Fonte: rosas de ondas das boias (A autora, 2020); rosa de ondas do ponto DOW (adaptado da saída do programa SMC-Brasil).

Figura 32 – Percentual de ocorrência de direções de ondas nas boias RJ-3 e RJ-4.

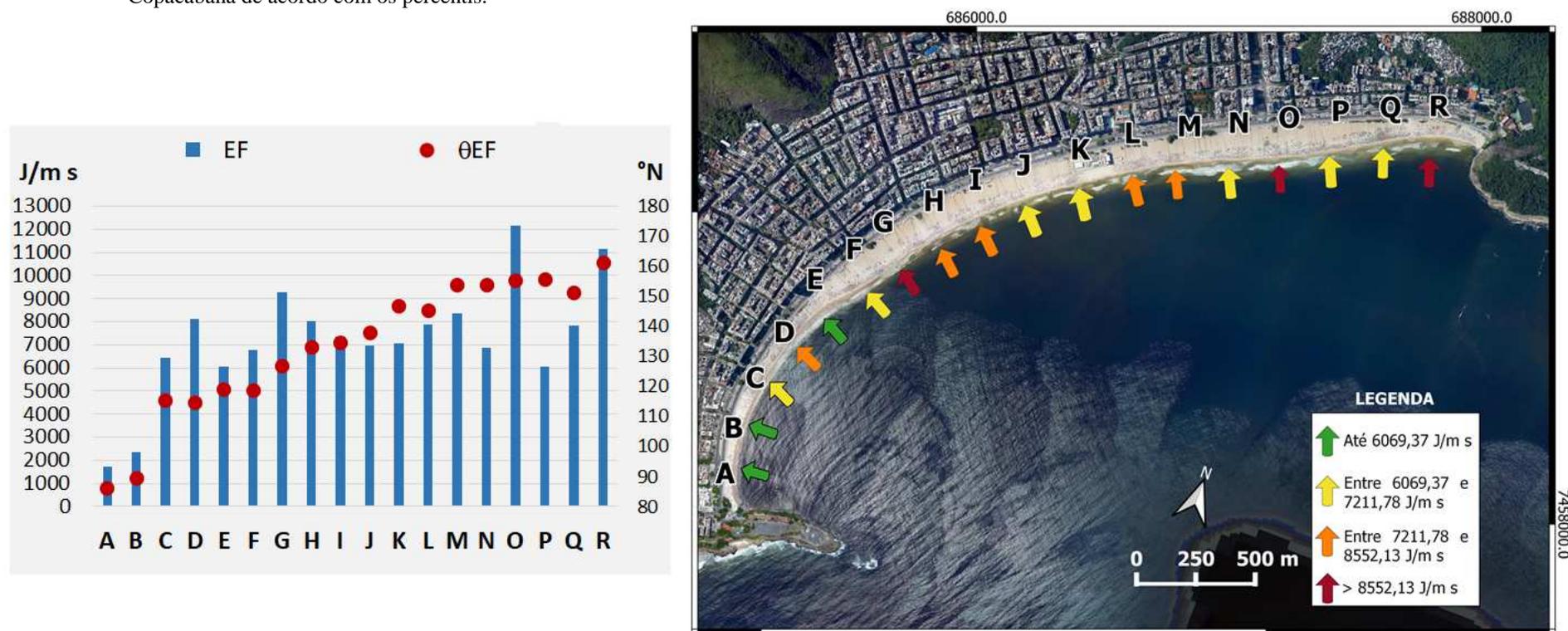


Fonte: A autora, 2020.

4.1.3 Fluxo de energia de ondas (EF e θ_{EF}) de 1948 a 2008

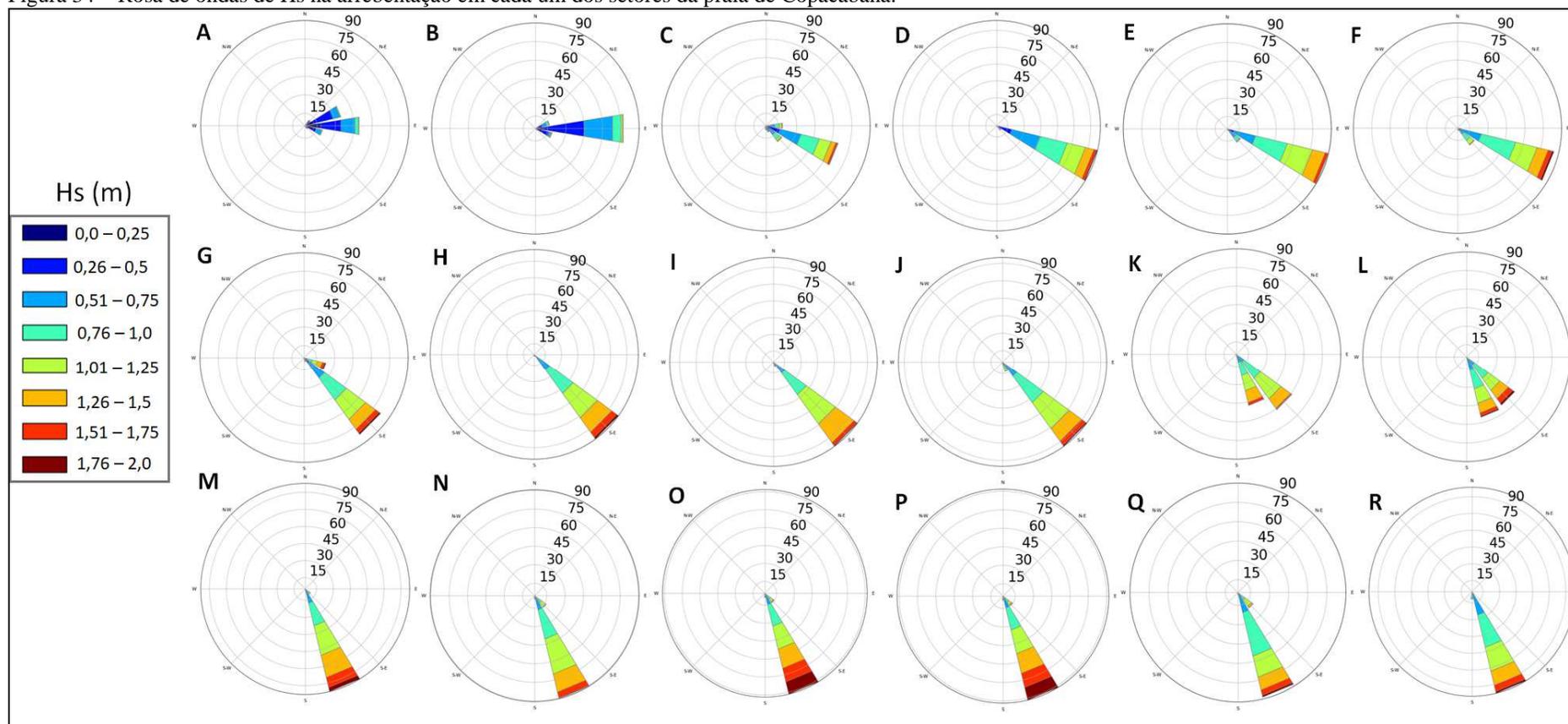
Em Copacabana, o θ_{EF} variou ao longo de toda a praia de $86,21^\circ N$ no seu extremo sudoeste (Forte de Copacabana) a $161,11^\circ N$ no extremo nordeste (Leme) (Figura 33). Nesta praia, pode-se perceber que sua orientação NE-SO contribuiu para que ao longo de toda a linha de costa fosse sentida variação no θ_{EF} . Além disso, há formação de uma zona de sombra do EF causada pelo promontório localizado onde encontra-se o Forte de Copacabana, ficando no abrigo desta zona de sombra principalmente os setores A e B, o que pode ser percebido pelo seu baixo valor e EF, bem como a mudança brusca no valor de θ_{EF} observada no setor C, indicando que a partir deste a praia passa a ser influenciada por ondas de direções que não são sentidas nos setores A e B (Figura 34). Não foi observada a formação de uma zona de sombra na extremidade da praia adjacente ao Morro do Leme. Além disso, conforme mostrado na Figura 34, ondas de sul-sudoeste ficam sombreadas em boa parte desta praia, porém conseguem atingir os setores adjacentes ao Leme.

Figura 33 – Esquerda: Gráfico com os resultados de EF e θ_{EF} nos setores da praia de Copacabana. Direita: mapa mostrando a distribuição dos valores de EF na praia de Copacabana de acordo com os percentis.



Legenda: Valores de EF até o percentil 20 estão em verde, entre o percentil 20 e 50 em amarelo, entre o percentil 50 e 80 em laranja e maior que o percentil 80 em vermelho.
 Fonte: A autora, 2020.

Figura 34 – Rosa de ondas de Hs na arrebentação em cada um dos setores da praia de Copacabana.

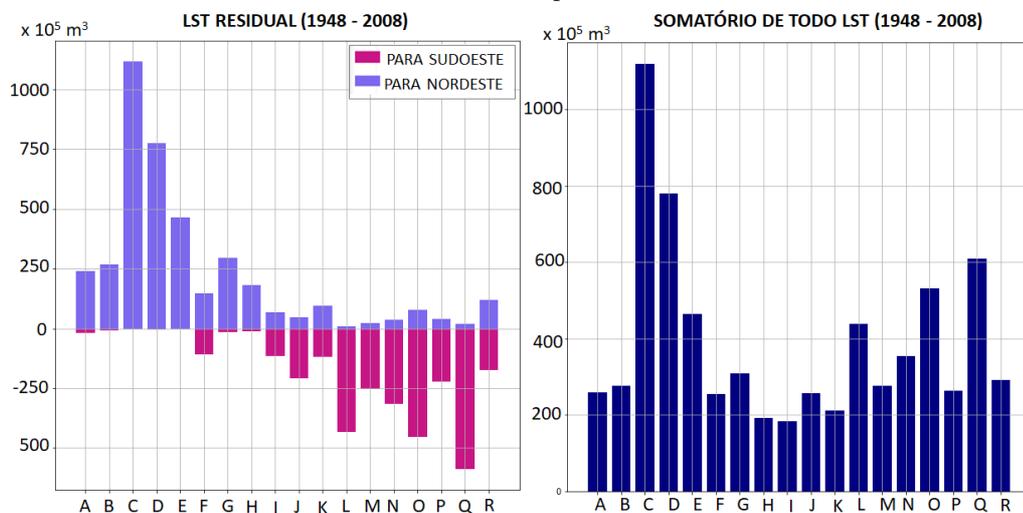


Fonte: A autora, 2020.

4.1.4 Transporte longitudinal de sedimentos e suas tendências (1948 – 2008)

Fazendo um somatório de todos os valores de $LST_{MÉDIO}$ em cada um dos setores, temos que em Copacabana o transporte total é de 184,00 m³/h para nordeste (Figura 35, Tabela 8). Os setores F, I, K e R, todos com o $LST_{MÉDIO}$ abaixo do percentil 20 (Figura 36), apresentaram transporte variando direções ao longo do ano, o que é indicado no LSTR. Entre os setores A e C observa-se a ocorrência de uma zona de divergência do LST. Entre o setor C e o setor F, observa-se a presença de uma zona de convergência do LST, local que coincide com a transição de uma faixa mais estreita da praia de O10 para uma faixa mais larga da praia de O100. Entre F e G é observada uma divergência do LST apontada pela maior saída de sedimentos em G em direção à nordeste do que quantidade que sai de F para esta mesma direção no $LST_{MÉDIO}$. Além disso, o gráfico de LSTR mostra em F o transporte muda de direção ao longo do ano, o que não é observado em G, desse modo, com o transporte em F indo para sudoeste e em G para nordeste esta zona de divergência também é mantida. Entre os setores K e L desta praia a tendência aponta para uma zona de convergência do LST. Na extremidade da praia próxima ao Leme, mais uma vez observa-se a presença de feições que podem ser justificadas pelas zonas de tendência do LST calculadas entre os setores O e R, uma vez que está região é marcada pela presença de uma protuberância.

Figura 35 – Gráficos mostrando o LSTR e o somatório do módulo de todos os LSTs entre 1948 e 2008 em cada um dos setores de Copacabana.



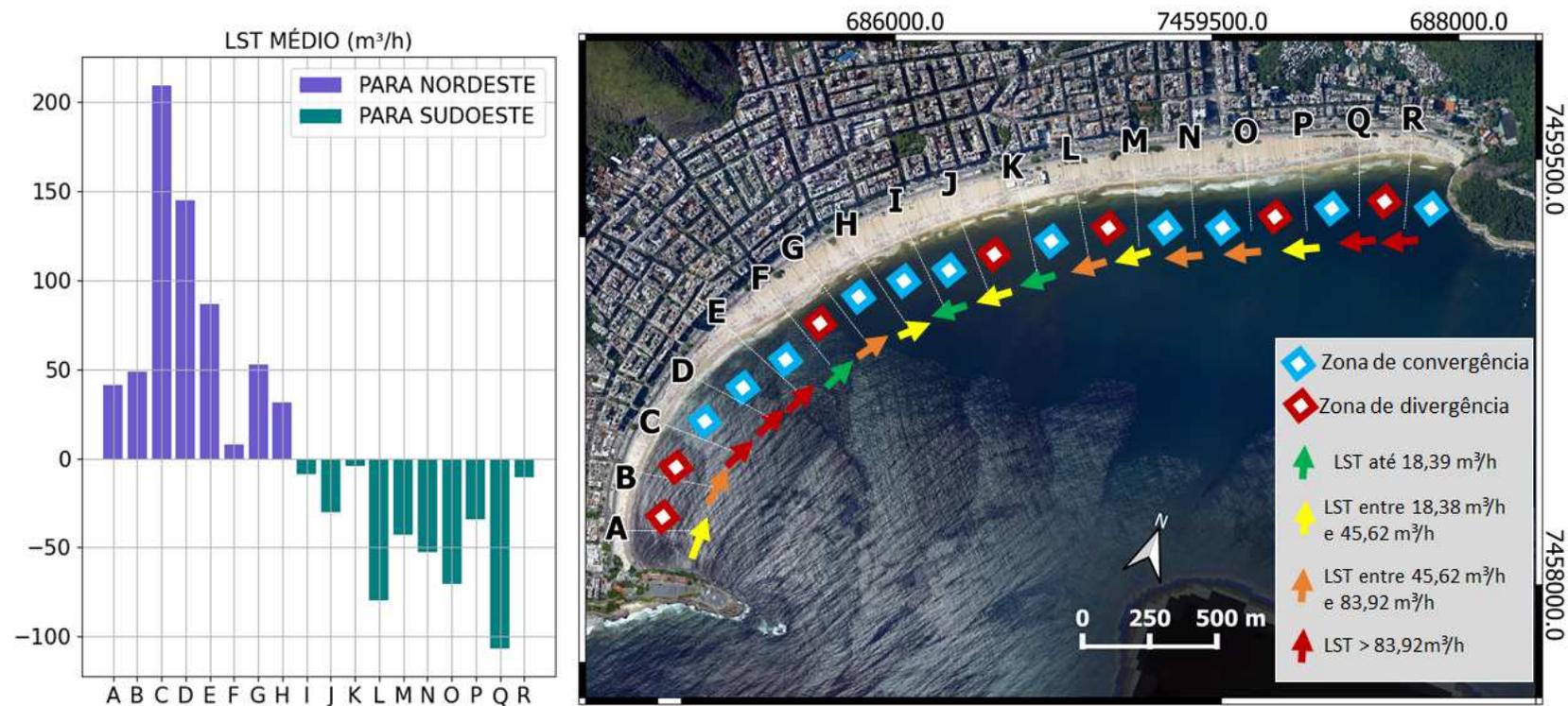
Fonte: A autora, 2020.

Tabela 8 – Resultado do LST_{MÉDIO}, LSTR e o somatório dos valores de LST para o período de 1948 a 2008 na praia de Copacabana.

Setor	LST_{MÉDIO} (m³)	LSTR PARA NOROESTE (x 10⁵ m³)	LSTR PARA SUDESTE (x 10⁵ m³)	SOMATÓRIO DO LST (x 10⁵ m³)
A	41,44	-19,24	240,12	259,36
B	48,57	-9,02	267,95	276,97
C	209,39	-1,74	1117,87	1119,62
D	145,04	-3,94	777,05	780,98
E	86,92	-1,05	464,35	465,40
F	7,91	-106,68	148,87	255,55
G	52,81	-14,08	295,57	309,65
H	31,66	-11,59	180,34	191,93
I	-8,91	-115,07	67,56	182,62
J	-30,47	-209,16	46,77	255,93
K	-4,37	-117,43	94,14	211,57
L	-79,44	-431,34	7,89	439,23
M	-42,67	-252,06	24,60	276,66
N	-52,41	-316,70	37,34	354,05
O	-70,49	-453,70	77,93	531,63
P	-33,98	-222,00	40,89	262,89
Q	-106,65	-588,46	19,99	608,45
R	-10,34	-173,77	118,63	292,40

Fonte: A autora, 2020.

Figura 36 – Esquerda: gráfico com o resultado do $LST_{MÉDIO}$ na praia de Copacabana. Direita: zonas de convergência e divergência do LST na praia de Copacabana e distribuição dos valores de LST de acordo com os percentis 20, 50 e 80.

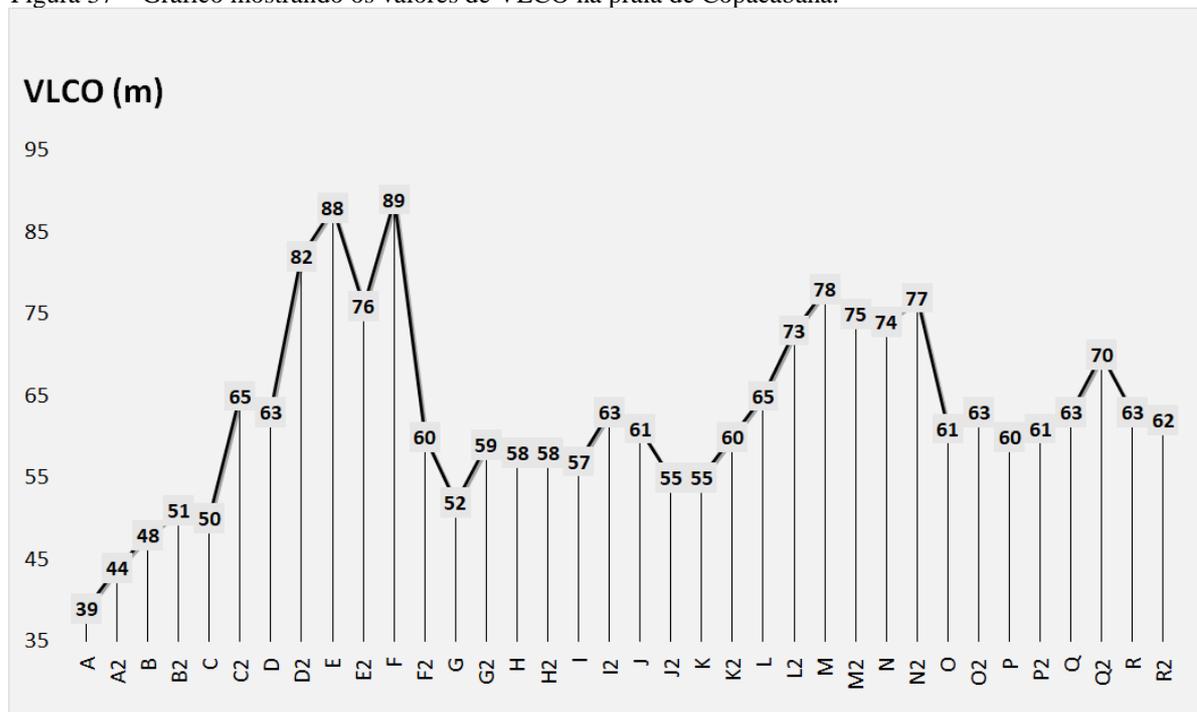


Legenda: Valores de LST até o percentil 20 estão em verde, entre o percentil 20 e 50 em amarelo, entre o percentil 50 e 80 em laranja e maior que o percentil 80 em vermelho.
Fonte: A autora, 2020.

4.1.5 Variação da linha de costa (VLCO)

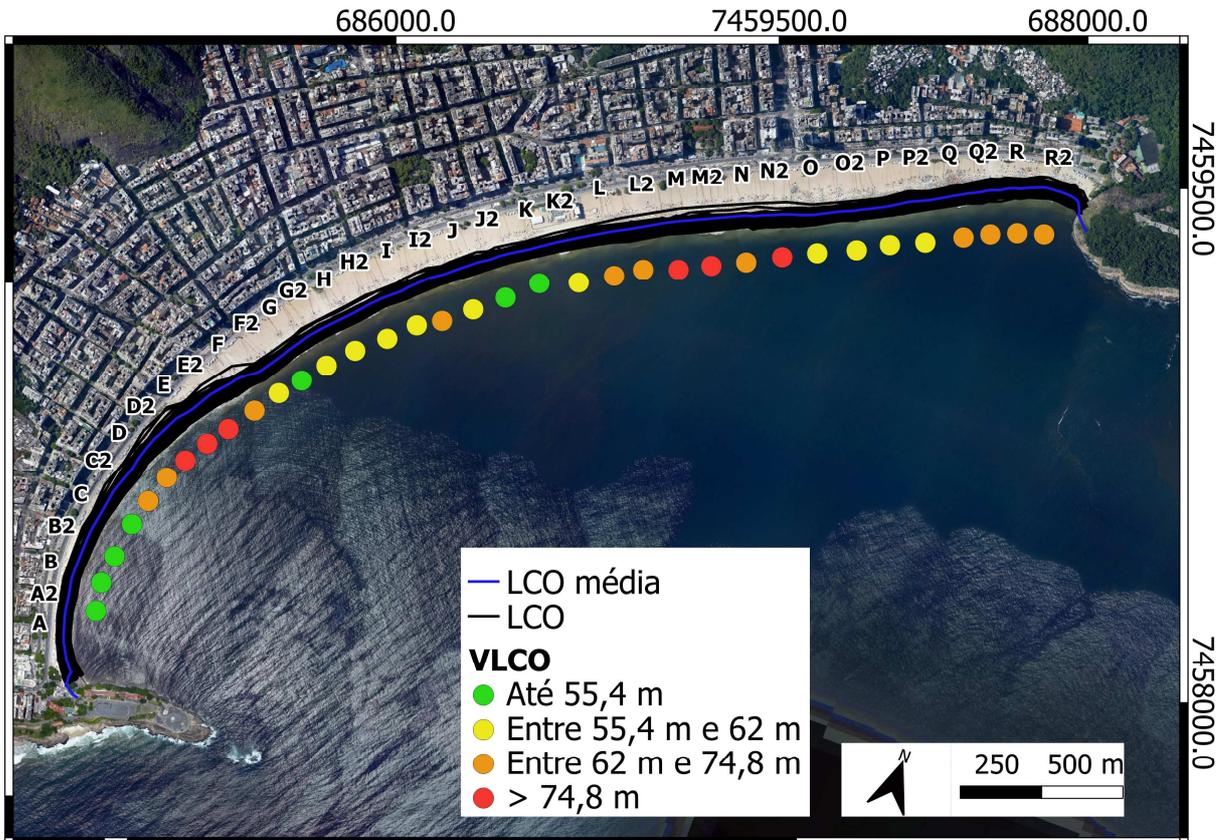
Em Copacabana, o valor médio de VLCO da praia como um todo foi de aproximadamente 64 m. O máximo de variação da linha de costa ocorreu no setor F (89 m), e o mínimo no setor A (39 m) (Figura 37). Nesta praia os maiores valores de VLCO se localizaram entre os setores D2 e F (Figura 38), em uma região caracterizada por uma mudança da largura da faixa de areia da praia que deixa de ser mais estreita (O10 m) e passa a maiores larguras (O100 m); entre L e N2, local em que novamente se observa uma mudança geral da praia, dessa vez para a formação de uma protuberância; e entre os setores Q e R2, nos quais é observado o fim dessa protuberância para uma faixa de areia mais estreita (Figura 11).

Figura 37 – Gráfico mostrando os valores de VLCO na praia de Copacabana.



Fonte: A autora, 2020.

Figura 38 – Mapa mostrando as LCOs, $LCO_{MÉDIA}$ e a distribuição dos valores de VLCO na praia de Copacabana de acordo com os percentis.



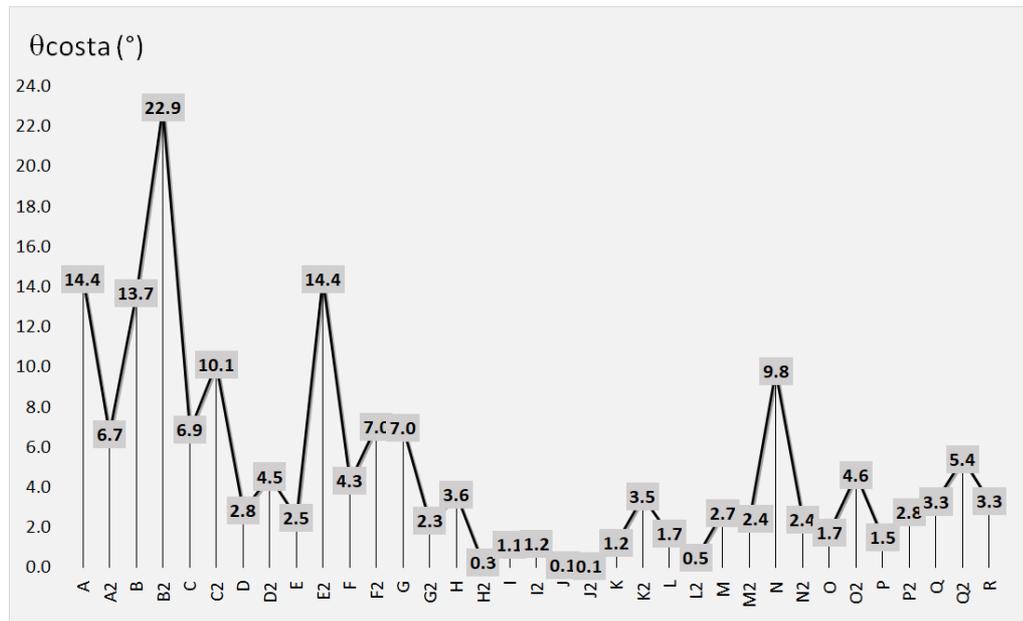
Legenda: Valores de VLCO até o percentil 20 estão em verde, entre o percentil 20 e 50 em amarelo, entre o percentil 50 e 80 em laranja e maior que o percentil 80 em vermelho.

Fonte: A autora, 2020.

4.1.6 Forma em planta de equilíbrio estático (θ_{costa})

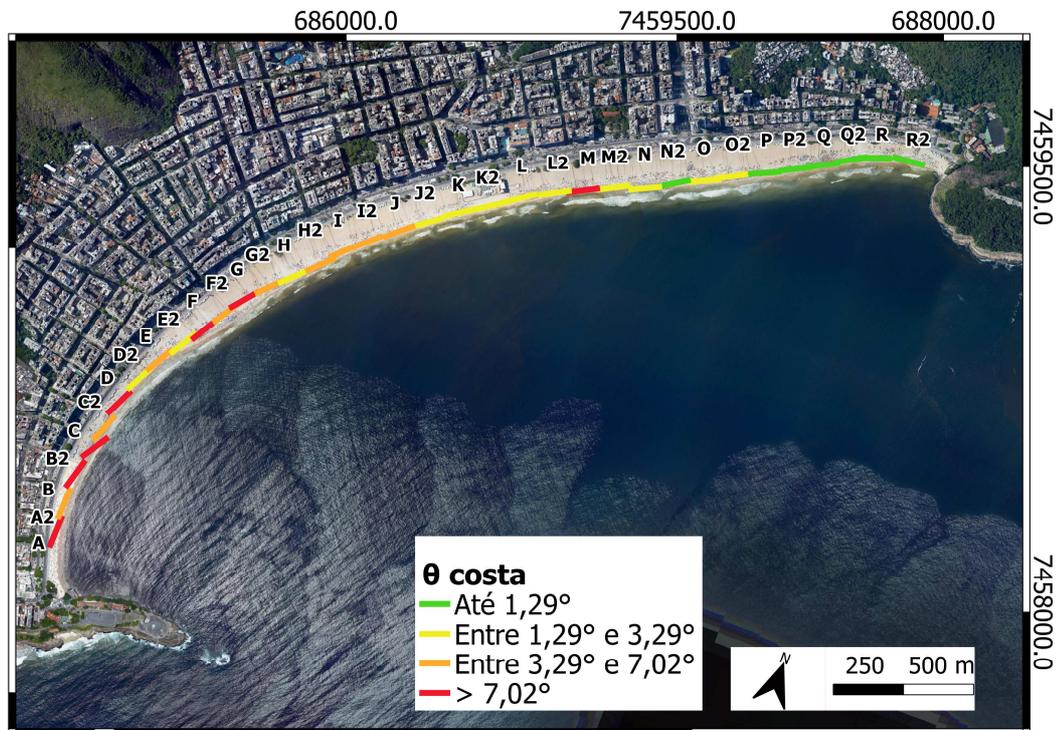
Em relação ao θ_{costa} , a praia de Copacabana apresentou uma média da praia como um todo de $4,93^\circ$. A região central desta praia (setores entre I e N) apresentou os menores valores de θ_{costa} , entre $0,25^\circ$ e $3,25^\circ$. Enquanto os maiores valores de θ_{costa} foram encontrados nos setores mais próximos ao Forte de Copacabana, C, A2, F e B2, respectivamente, $22,94^\circ$, $14,39^\circ$, $14,38^\circ$ e $13,69^\circ$, e no setor N2, com valor de $9,78^\circ$ (Figuras 39 e 40).

Figura 39 – Gráfico mostrando os valores de θ_{costa} na praia de Copacabana.



Fonte: A autora, 2020.

Figura 40 – Mapa mostrando a distribuição dos valores de θ_{costa} na praia de Copacabana de acordo com os percentis.



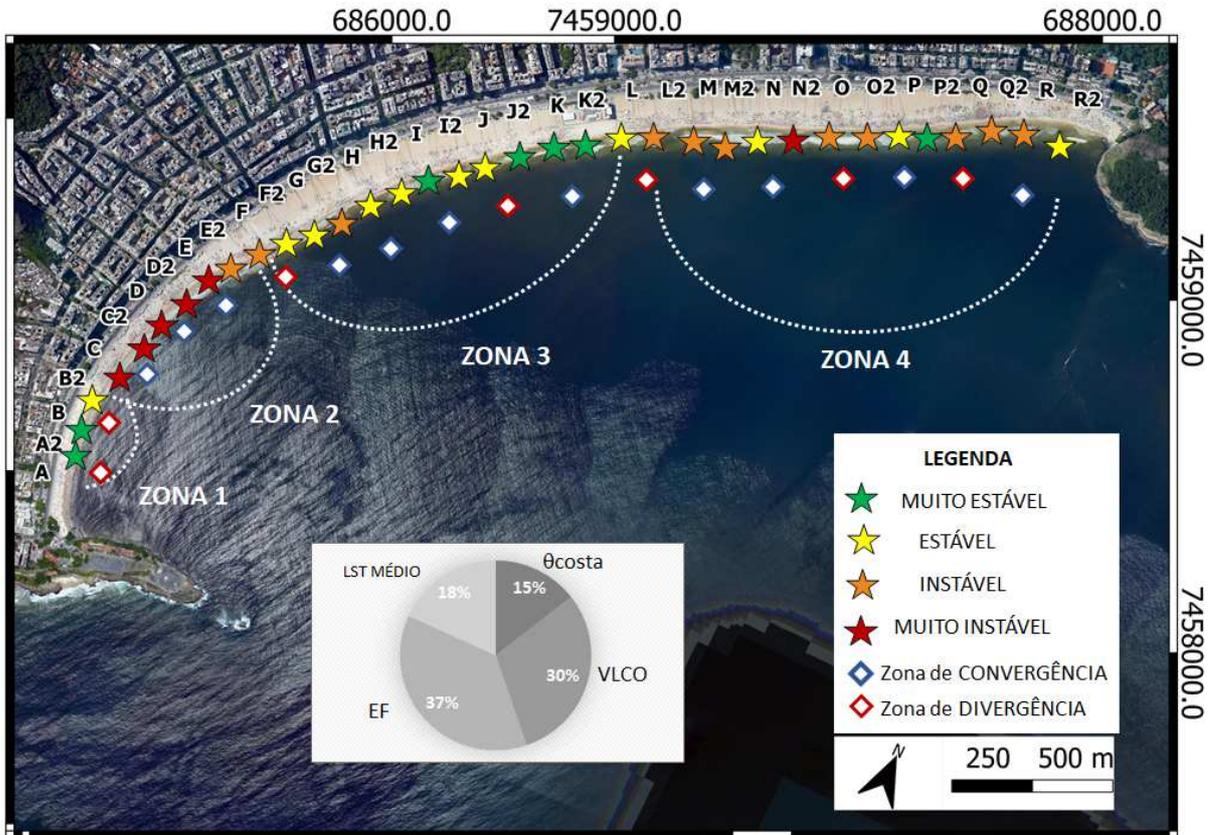
Legenda: Valores de VLCO até o percentil 20 estão em verde, entre o percentil 20 e 50 em amarelo, entre o percentil 50 e 80 em laranja e maior que o percentil 80 em vermelho.

Fonte: A autora, 2020.

4.1.7 Classificação de estabilidade

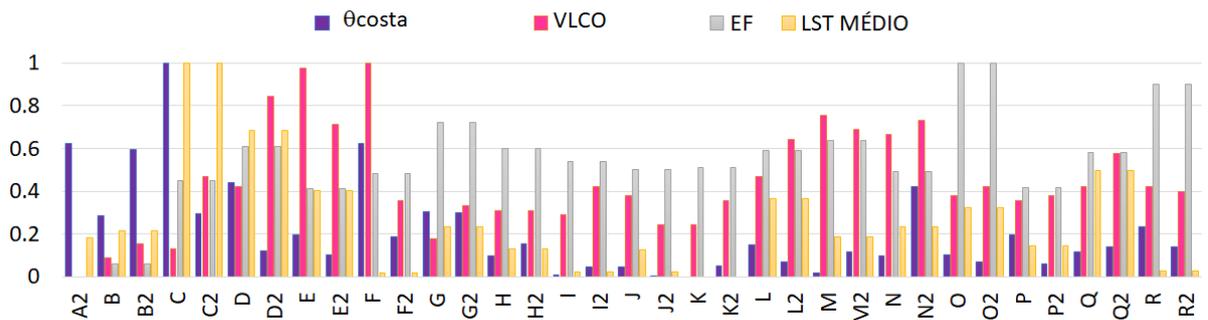
A partir da compilação das informações apresentadas anteriormente foram identificadas de 4 zonas de estabilidade na praia de Copacabana (Figura 41). A normalização dos valores de EF, $LST_{MÉDIO}$, LST_{TOTAL} , θ_{costa} e VLCO permitiu a identificação de quais fatores apresentam mais influência em cada setor (Figura 42). A Zona 1, compreende uma região estável da praia, a qual é relativamente abrigada da energia de ondas e onde o VLCO apresenta baixos valores. Apesar de estar em uma região de alta estabilidade, nesta zona os valores θ_{costa} foram bastante altos, além disso, também observa-se nesta uma célula de divergência do LST. A Zona 2 compreende uma região mais instável da praia onde observa-se o aumento dos valores de VLCO e de EF nos setores de sudoeste para nordeste (de C para F) e diminuição dos valores de $LST_{MÉDIO}$ seguindo essa mesma direção. Nesta zona, é observada uma célula de convergência do LST, e dentro desse sentido é importante ressaltar que esta é uma região onde se observa o aumento da largura da faixa de areia da praia em aproximadamente 2 vezes a largura da Zona 1. Além disso, nesta zona nos apenas nos setores C e F observa-se altos valores de θ_{costa} . A Zona 3 da praia de Copacabana compreende uma região mais estável da praia, onde apenas o setor G2 foi considerado instável. Nesta zona, apesar da presença de algumas divergências em F2 e K2, temos de uma maneira geral uma célula de convergência do $LST_{MÉDIO}$, isto pode ser observado no gráfico da Figura 36, onde vemos que estes setores estão em uma região onde o $LST_{MÉDIO}$ é baixo havendo uma grande convergência dos transportes que vem das extremidades nordeste e sudoeste da praia. Sendo assim, também é importante ressaltar que esta zona compreende uma região da praia em que a sua largura não apresenta tantas variações. Por fim, a Zona 4 da praia de Copacabana compreende uma região instável com altos valores de EF, onde células de convergência e divergência do LST foram observadas. Nesta zona percebe-se uma diminuição da importância do VLCO em direção a nordeste (de L2 para R2) e aumento da importância do $LST_{MÉDIO}$, que preferencialmente é em direção a sudoeste.

Figura 41 – Mapa final de estabilidade costeira da praia de Copacabana.



Fonte: A autora, 2020.

Figura 42 – Valores de EF, VLCO, θ_{costa} e LST_{MÉDIO} da praia de Copacabana normalizados entre 0 e 1 em cada um dos setores.



Fonte: A autora, 2020.

4.2 Praia da Macumba

4.2.1 Clima de ondas (1968 – 2008)

O ponto DOW selecionado para a praia da Macumba apresentou 97,78% do espectro vindo das direções sul-sudeste (46,27%), sudeste (34,75%) e sul (16,76%) (Tabela 9). Neste ponto DOW, a direção sul-sudeste apresentou valores de Hs50% de 1,51 m e Hs12 de 3,47 m; para a direção sudeste o Hs50% teve valor de 1,31 m e o Hs12 valor de 2,84 m. Os maiores valores de onda neste ponto DOW, vieram da direção sul, em que o Hs50% foi de 1,86 m, com o Hs12 atingindo 3,99 m. Durante o verão, observa-se a ocorrência de ondas até 2,14 m com aproximadamente metade da direção sudeste e outra metade da direção sul-sudeste (Figura 43). Nos meses do outono (março, abril e maio), as ondas incidentes nesta região variaram entre sul e sudeste, com a maior parte das ondas com altura até 2,14 m. Ondas de sudeste correspondem a aproximadamente 30% do total, enquanto a direção sul-sudeste representa em torno de 50%, e a direção sul em torno de 20% do total, nesta estação ainda nota-se a presença de ondas de sul e de sul-sudeste com altura entre 2,14 e 2,86 m. Durante o inverno observa-se a ocorrência de 45% de ondas de sul-sudeste, pouco menos de 30% de ondas de sul, e em torno de 25% de ondas de sudeste. Nos meses de primavera observa-se uma queda da frequência de ondas de sul em relação ao inverno para 15% do total. Nesta estação, a direção sul-sudeste representa pouco mais de 45% das ondas e a direção sudeste pouco menos de 30%.

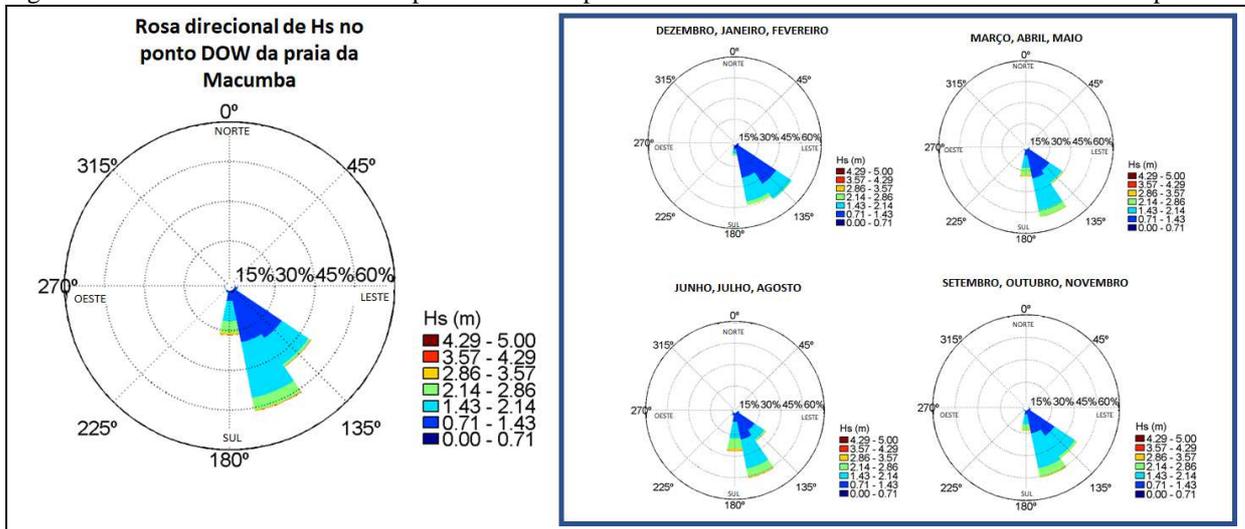
Tabela 9 – Relatório de altura significativa de ondas (Hs) obtido do SMC-Brasil para o ponto DOW selecionado na praia da Macumba.

Direção	%	Hs _{50%} (m)	Hs _{75%} (m)	Hs _{95%} (m)	Hs _{99%} (m)	Hs ₁₂ (m)
N	0,00	-	-	-	-	-
NNE	0,00	-	-	-	-	-
NE	0,00	-	-	-	-	-
ENE	0,00	-	-	-	-	-
E	0,01	0,92	1,04	1,49	1,53	1,53
ESE	1,19	1,10	1,27	1,57	1,95	2,16
SE	34,75	1,31	1,57	2,02	2,43	2,84
SSE	46,27	1,52	1,85	2,38	2,79	3,47
S	16,76	1,86	2,25	2,87	3,40	3,99
SSW	0,91	1,24	1,55	2,07	2,45	2,93
SW	0,09	1,02	1,18	1,46	1,74	1,92
WSW	0,00	0,91	1,16	1,31	1,36	1,36
W	0,00	0,70	0,72	0,72	0,72	0,72
WNW	0,00	-	-	-	-	-
NW	0,00	-	-	-	-	-
NNW	0,00	-	-	-	-	-

Legenda: (%) - percentual de ocorrência de cada uma das direções; Hs_{50%} - percentil 50 do Hs; Hs_{75%} - percentil 75 do Hs; Hs_{95%} - percentil 95 do Hs; Hs_{99%} - percentil 99 do Hs; Hs₁₂ – altura significativa extrapolada em 12 horas.

Fonte: A autora, 2020.

Figura 43 – Rosa direcional de Hs no ponto DOW da praia da Macumba e rosas direcionais sazonais neste ponto.

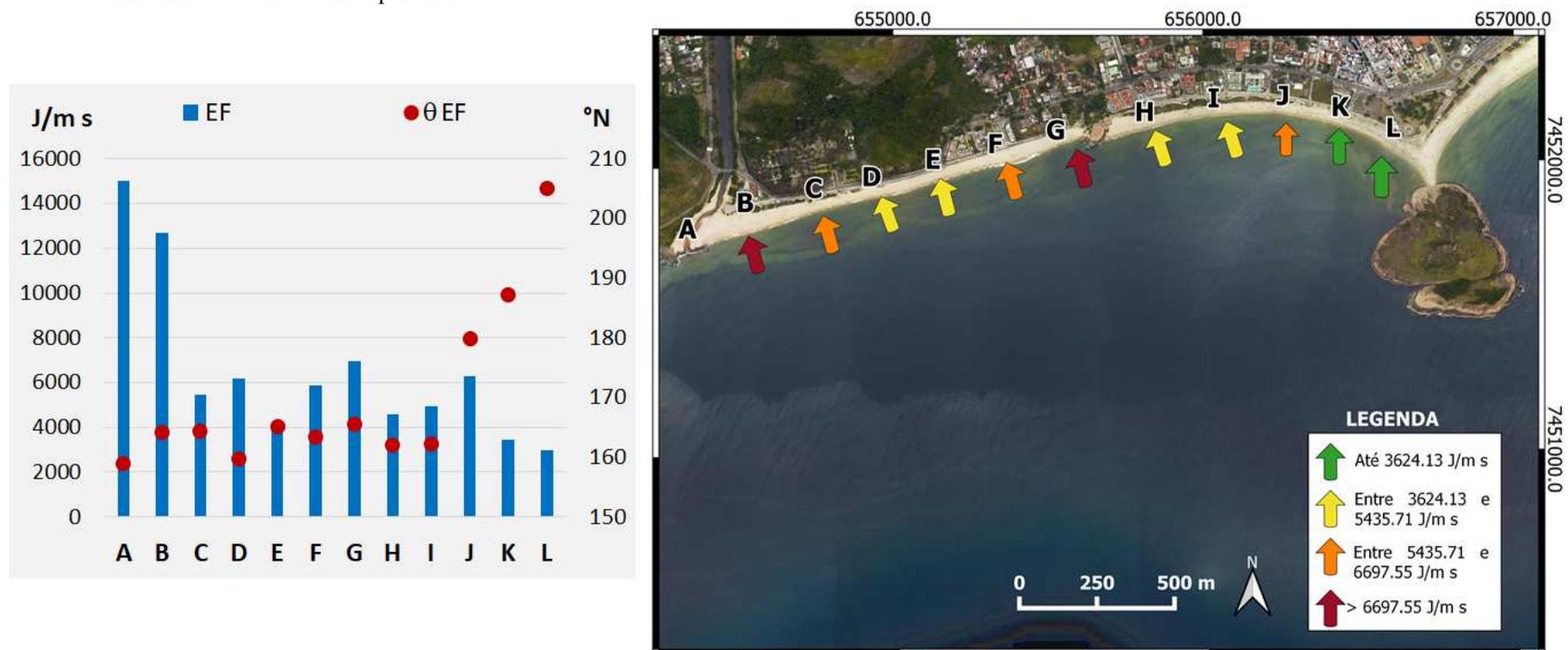


Fonte: Adaptado da saída do programa SMC-Brasil.

4.2.2. Fluxo de energia de ondas (EF e θ_{EF}) de 1948 a 2008

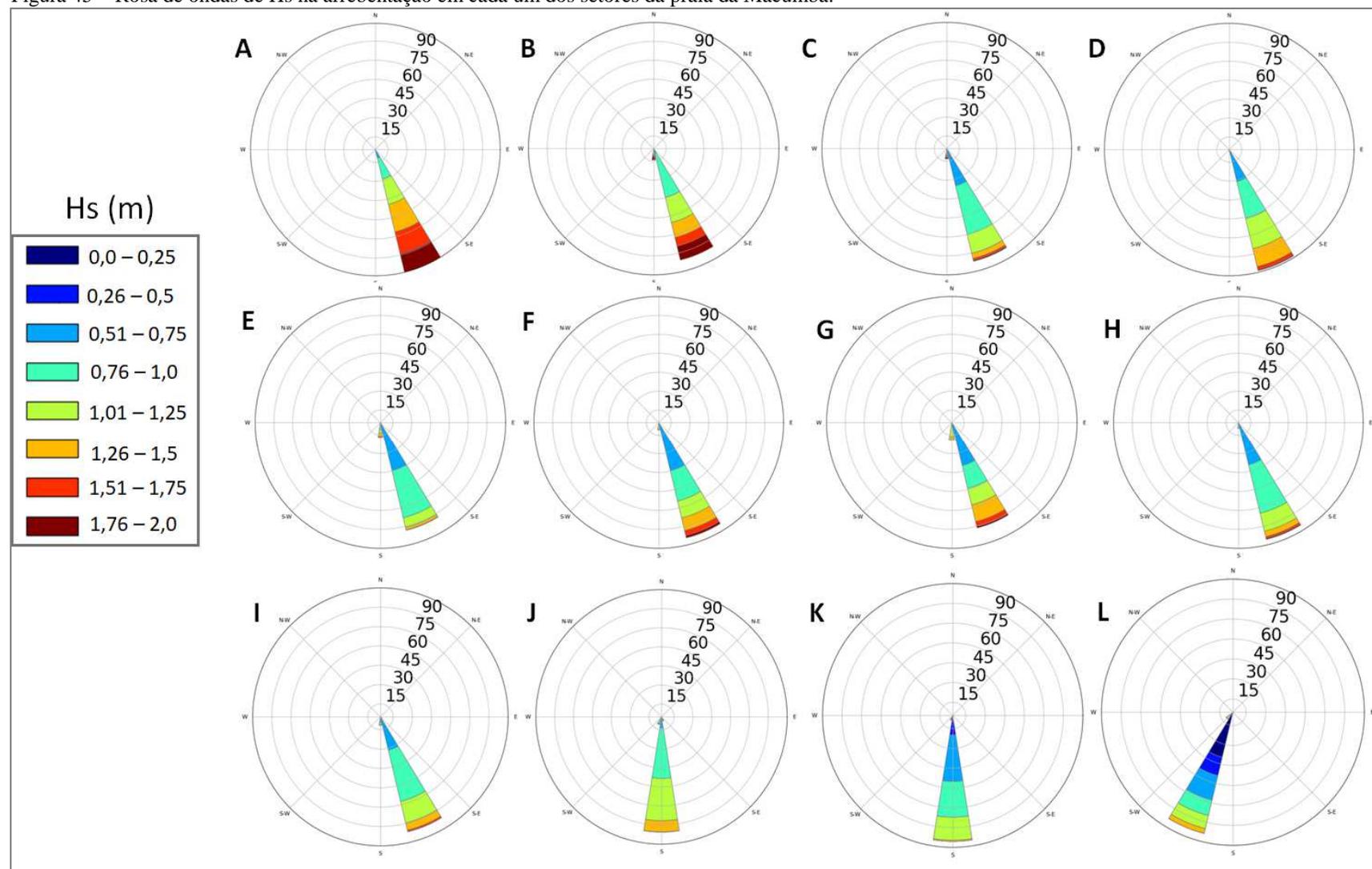
Na praia da Macumba os maiores valores de EF foram observados nos setores mais a oeste (A e B) (Figura 44). Nesta praia, o θ_{EF} variou $42,68^\circ$ entre o setor L e o setor I, compreendendo uma variação da direção sul-sudoeste para sul-sudeste (Figuras 44 e 45). A partir do setor I, o θ_{EF} fica aproximadamente constante ao longo de toda a praia, indicando que neste setor se localiza o ponto a partir do qual não é mais observada tanta influência da zona de sombra causada pelo Morro do Pontal. Assim, nos setores de I a A, percebe-se uma tendência do θ_{EF} influenciado principalmente pelo processo de refração, fazendo com o θ_{EF} seja aproximadamente paralelo a costa.

Figura 44 – Esquerda: Gráfico com os resultados de EF e θ_{EF} nos setores da praia da Macumba. Direita: mapa mostrando a distribuição dos valores de EF na praia da Macumba de acordo com os percentis.



Legenda: Valores de EF até o percentil 20 estão em verde, entre o percentil 20 e 50 em amarelo, entre o percentil 50 e 80 em laranja e maior que o percentil 80 em vermelho.
Fonte: A autora, 2020.

Figura 45 – Rosa de ondas de Hs na arrebentação em cada um dos setores da praia da Macumba.

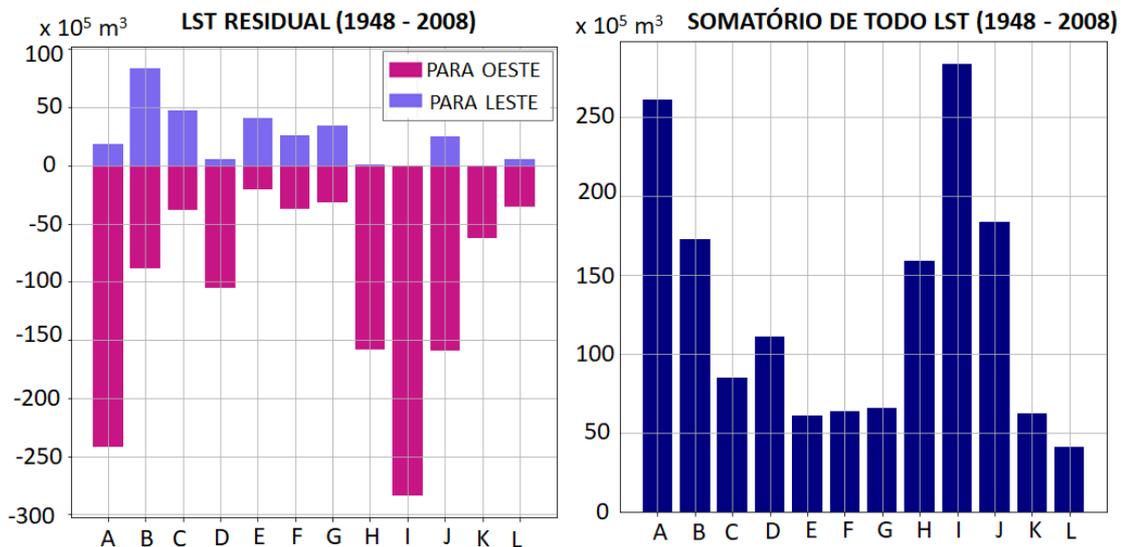


Fonte: A autora, 2020.

4.2.3 Transporte longitudinal de sedimentos e suas tendências (1948 – 2008)

Na praia da Macumba o somatório de todos os valores de $LST_{MÉDIO}$ em cada um dos setores foi de $190,97 \text{ m}^3/\text{hora}$ para oeste (Figura 46, Tabela 10). Os setores B, C, F e G apresentaram as principais variações da direção do LST ao longo do ano (Figura 46). Nesta praia, os maiores valores de $LST_{MÉDIO}$ foram encontrados nos setores A, H e I, enquanto os menores valores em B e G. Observa-se a presença de uma zona de divergência do LST nos setores de I a L (Figura 47). O setor L, local marcado pela presença de um tómbolo, apresenta um transporte médio de $5,81 \text{ m}^3/\text{h}$ para oeste, sem muita variação do LSTR. Neste setor, se observa em algumas imagens do Google Earth um deslocamento do tómbolo em direção a oeste, o que será mostrado nas LCOs levantadas (seção 4.2.4). Entre G e I os cálculos de $LST_{MÉDIO}$ apontaram para presença de uma convergência do LST, no entanto, devido a presença da Pedra da Macumba o transporte de sedimentos de H para G fica algumas vezes preso em H, o que já foi observado em imagens do Google Earth, e será discutido mais adiante.

Figura 46 – Gráficos mostrando o LSTR e o somatório do módulo de todos os LSTs entre 1948 e 2008 em cada um dos setores da Macumba.



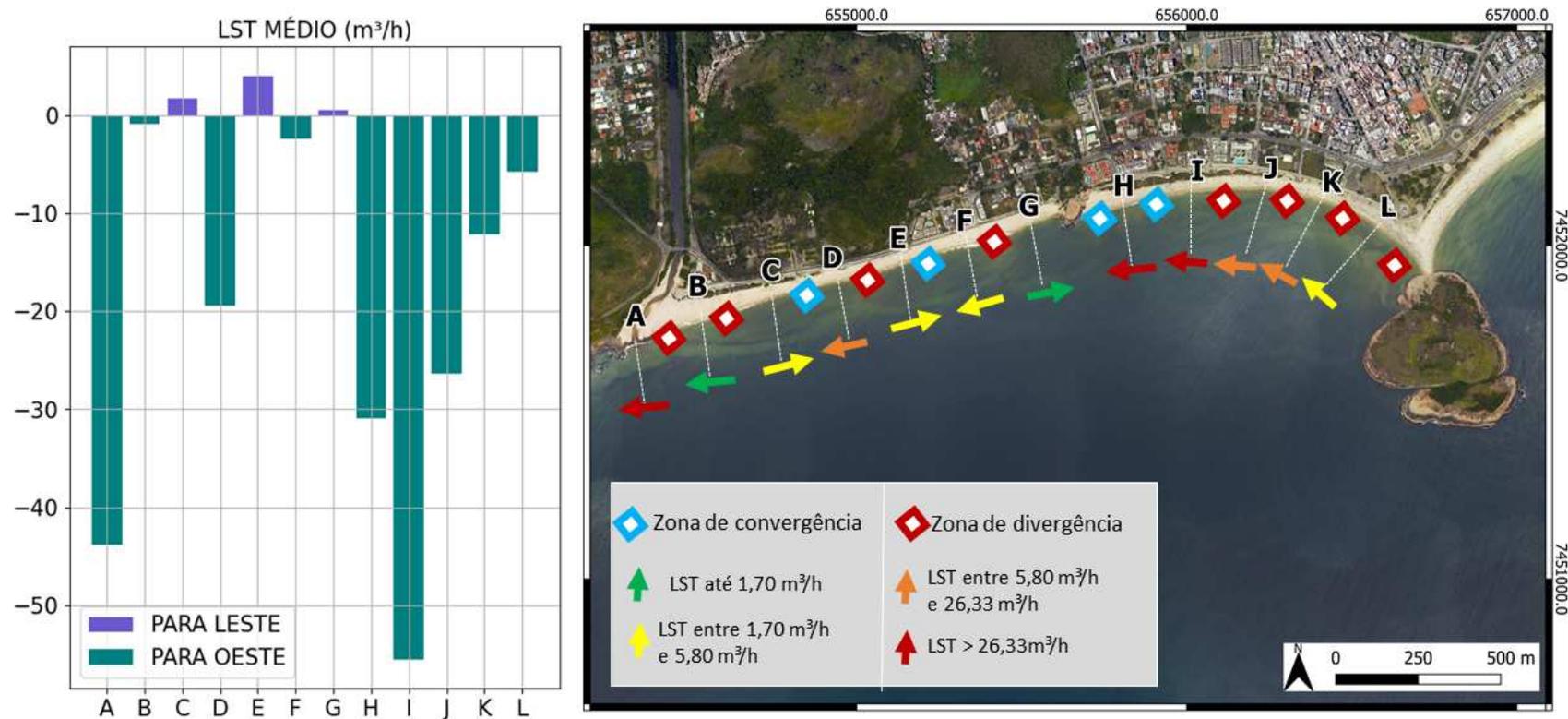
Fonte: A autora, 2020.

Tabela 10 – Resultado do $LST_{MÉDIO}$, LSTR e o somatório dos valores de LST para o período de 1948 a 2008 na praia da Macumba.

Setor	$LST_{MÉDIO}$ (m^3)	LSTR PARA OESTE ($\times 10^5 m^3$)	LSTR PARA LESTE ($\times 10^5 m^3$)	SOMATÓRIO DO LST (LST_{TOTAL} ($\times 10^5 m^3$))
A	-43,81	-242,37	18,43	260,80
B	-0,89	-88,39	83,86	172,24
C	1,70	-38,16	46,87	85,03
D	-19,38	-104,87	5,80	110,67
E	4,01	-20,35	40,85	61,20
F	-2,37	-37,77	25,66	63,43
G	0,47	-31,80	34,17	65,97
H	-30,91	-158,49	0,50	158,99
I	-55,52	-283,82	0,05	283,88
J	-26,34	-159,14	24,51	183,66
K	-12,13	-62,01	0,00	62,01
L	-5,81	-35,37	5,68	41,05

Fonte: A autora, 2020.

Figura 47 – Esquerda: gráfico com o resultado do $LST_{MÉDIO}$ na praia da Macumba. Direita: zonas de convergência e divergência do LST na praia da Macumba e distribuição dos valores de LST de acordo com os percentis 20, 50 e 80.



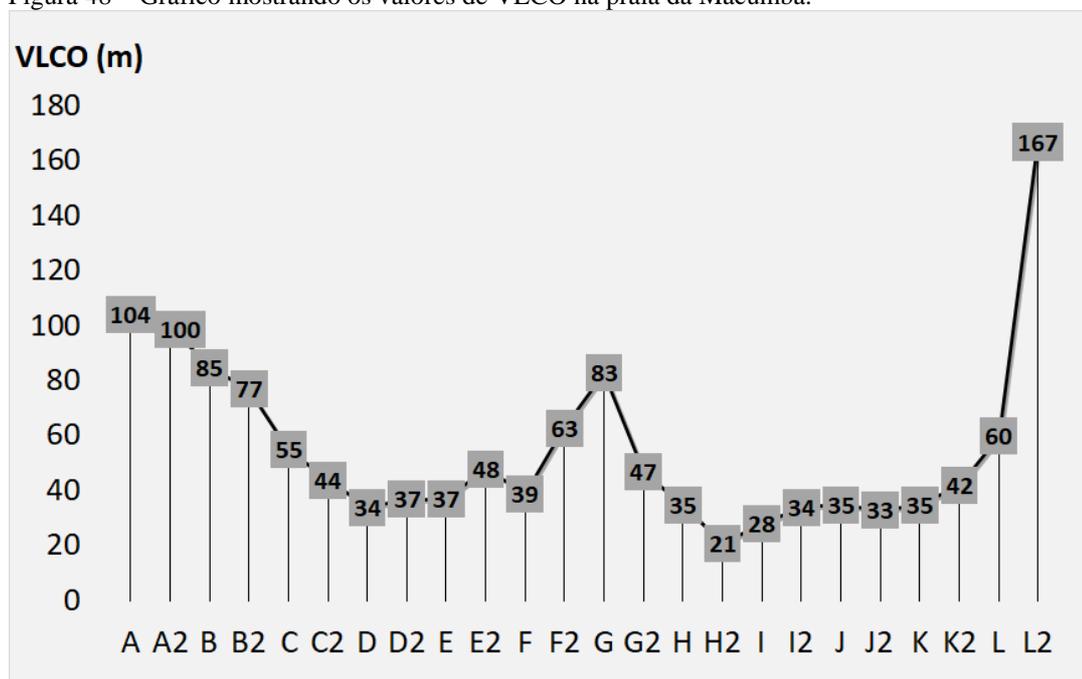
Legenda: Valores de VLCO até o percentil 20 estão em verde, entre o percentil 20 e 50 em amarelo, entre o percentil 50 e 80 em laranja e maior que o percentil 80 em vermelho.

Fonte: A autora, 2020.

4.2.4 Variação da linha de costa e forma em planta de equilíbrio estático (VLCO e θ_{costa})

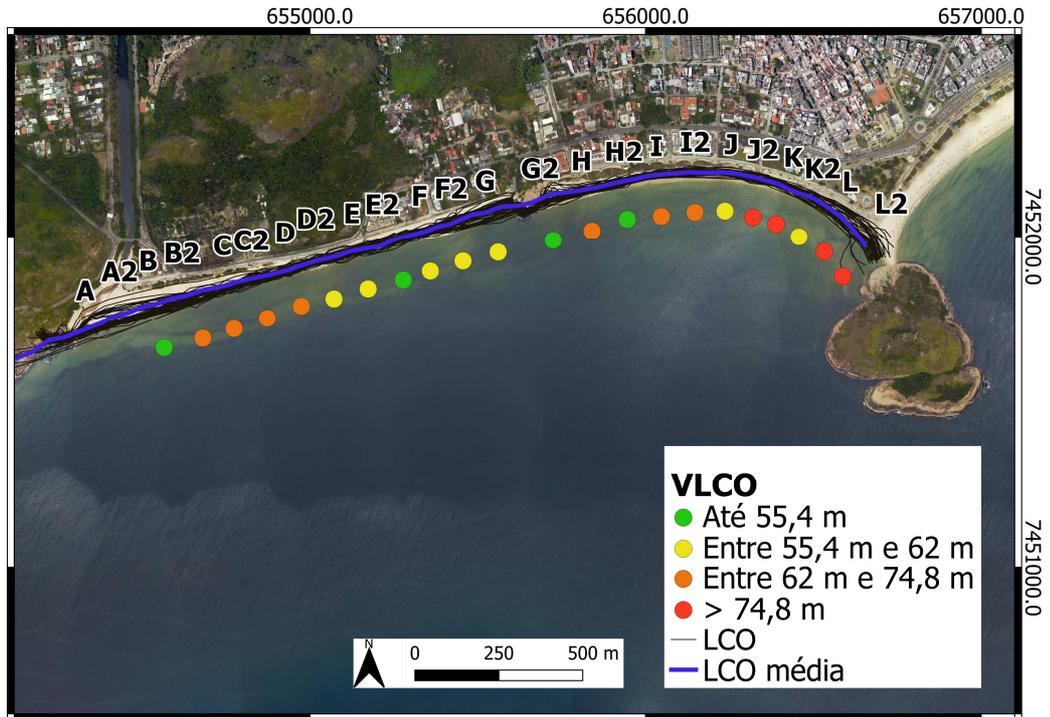
O valor médio de VLCO da praia da Macumba 41 m. O menor valor de VLCO ocorreu no setor H2, com 21 m, e o maior valor no setor L2 com 167 m, este setor está localizado em uma região onde forma-se um tómbolo, sendo por isso, bastante variável (Figuras 48 e 49). Na porção oeste da praia da Macumba nos setores de A, A2, B e B2 observa-se VLCOs de 104, 100, 85 e 77 m, respectivamente, tais setores se encontram próximo a saída do canal de Sernambetiba, sendo bastante influenciados pelo aporte de sedimentos desse canal. Já na porção central da Macumba, destaca-se os setores G e F2 com variação de 83 m e 63 m, respectivamente. Observações de imagens do Google Earth mostraram que o setor G experimentou perda total da faixa de areia em agosto de 2015 e setembro de 2017, mesmo em período em que observa-se um aumento na faixa de areia no setor G2 (Figura 50).

Figura 48 – Gráfico mostrando os valores de VLCO na praia da Macumba.



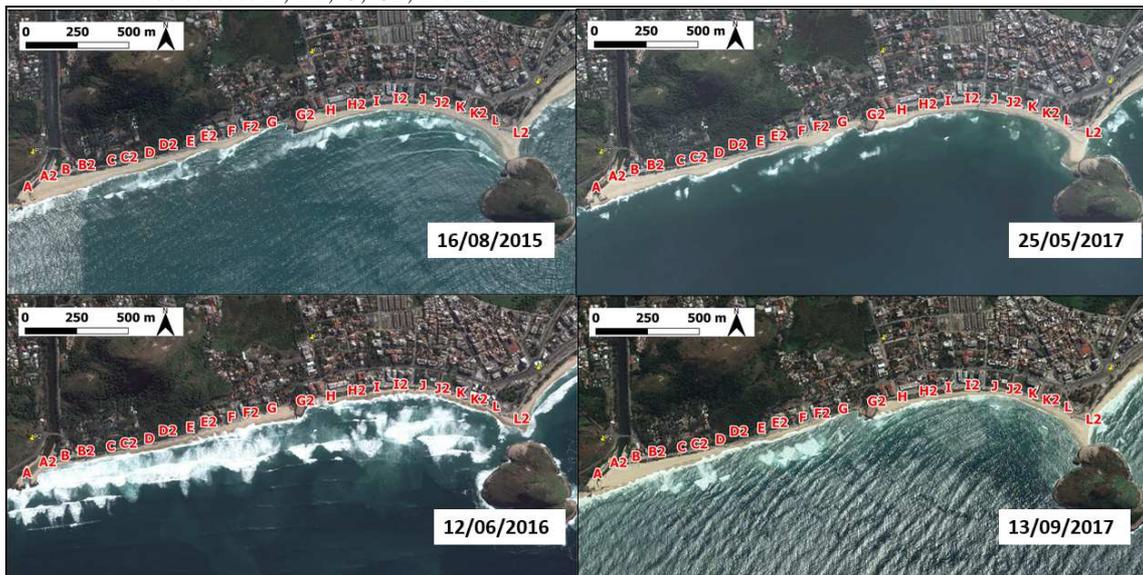
Fonte: A autora, 2020.

Figura 49 – Mapa mostrando as LCOs, LCO_{MÉDIA} e a distribuição dos valores de VLCO na praia da Macumba de acordo com os percentis.



Legenda: Valores de VLCO até o percentil 20 estão em verde, entre o percentil 20 e 50 em amarelo, entre o percentil 50 e 80 em laranja e maior que o percentil 80 em vermelho.
 Fonte: A autora, 2020.

Figura 50 – Imagens do Google Earth onde é possível ver diferentes momentos de LCO principalmente nos setores B, B2, G, G2, L e L2.

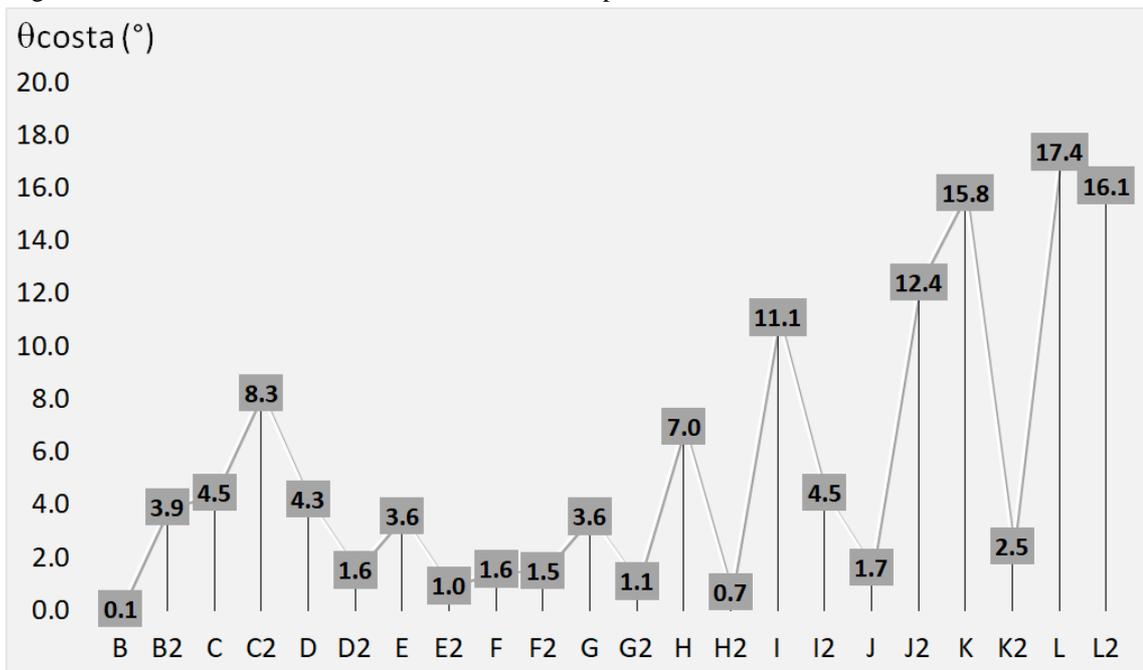


Fonte: Adaptado do Google Earth.

4.2.5 Forma em planta de equilíbrio estático (θ_{costa})

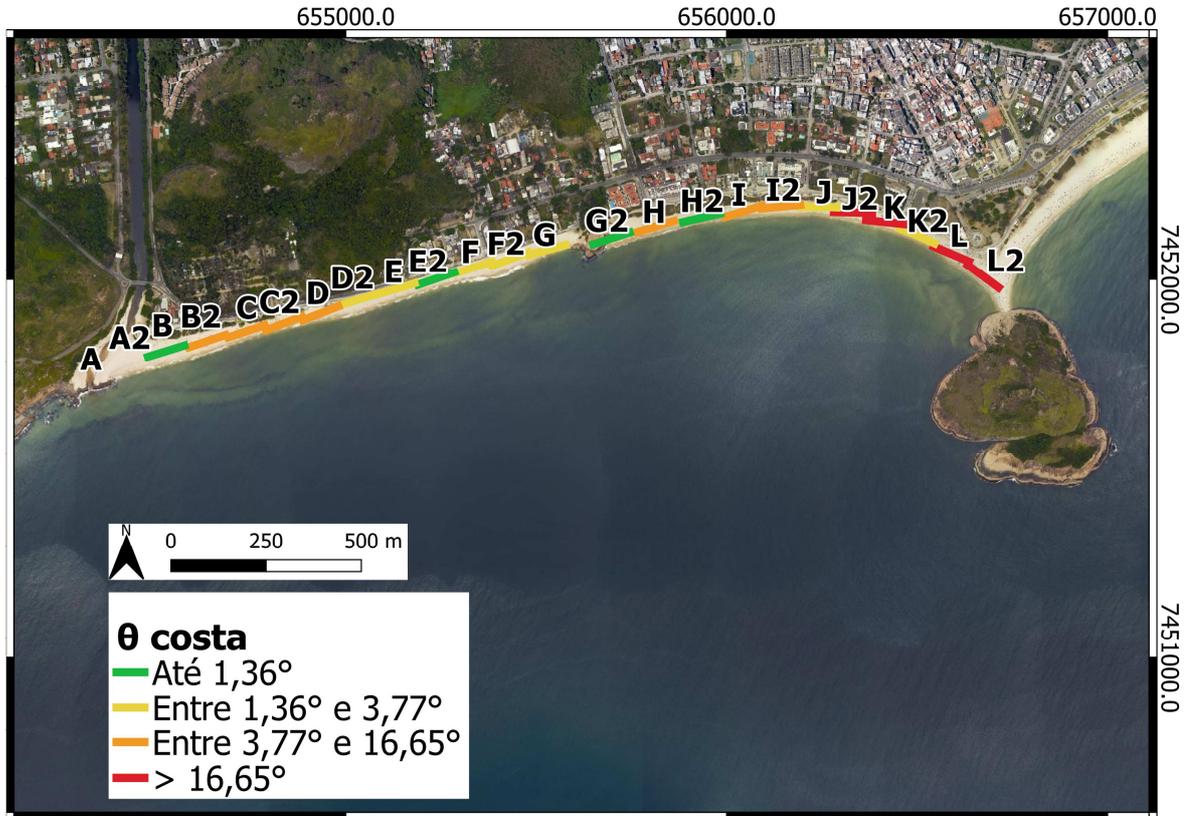
O θ_{costa} da praia da Macumba como um todo foi de $5,54^\circ$. Os maiores valores desse parâmetro foram encontrados nos setores a leste da Pedra da Macumba, em L, L2 e K com $17,39^\circ$, $16,11^\circ$ e $15,83^\circ$, respectivamente. A região central dessa praia, entre D2 e G2 apresenta valores baixos de θ_{costa} , dos quais o único setor em que este parâmetro ultrapassa 2° é em G, onde atinge $3,58^\circ$ (Figuras 51 e 52).

Figura 51 – Gráfico mostrando os valores de θ_{costa} na praia da Macumba.



Fonte: A autora, 2020.

Figura 52 – Mapa mostrando a distribuição dos valores de θ_{costa} na praia da Macumba de acordo com os percentis.



Legenda: Valores de θ_{costa} até o percentil 20 estão em verde, entre o percentil 20 e 50 em amarelo, entre o percentil 50 e 80 em laranja e maior que o percentil 80 em vermelho.

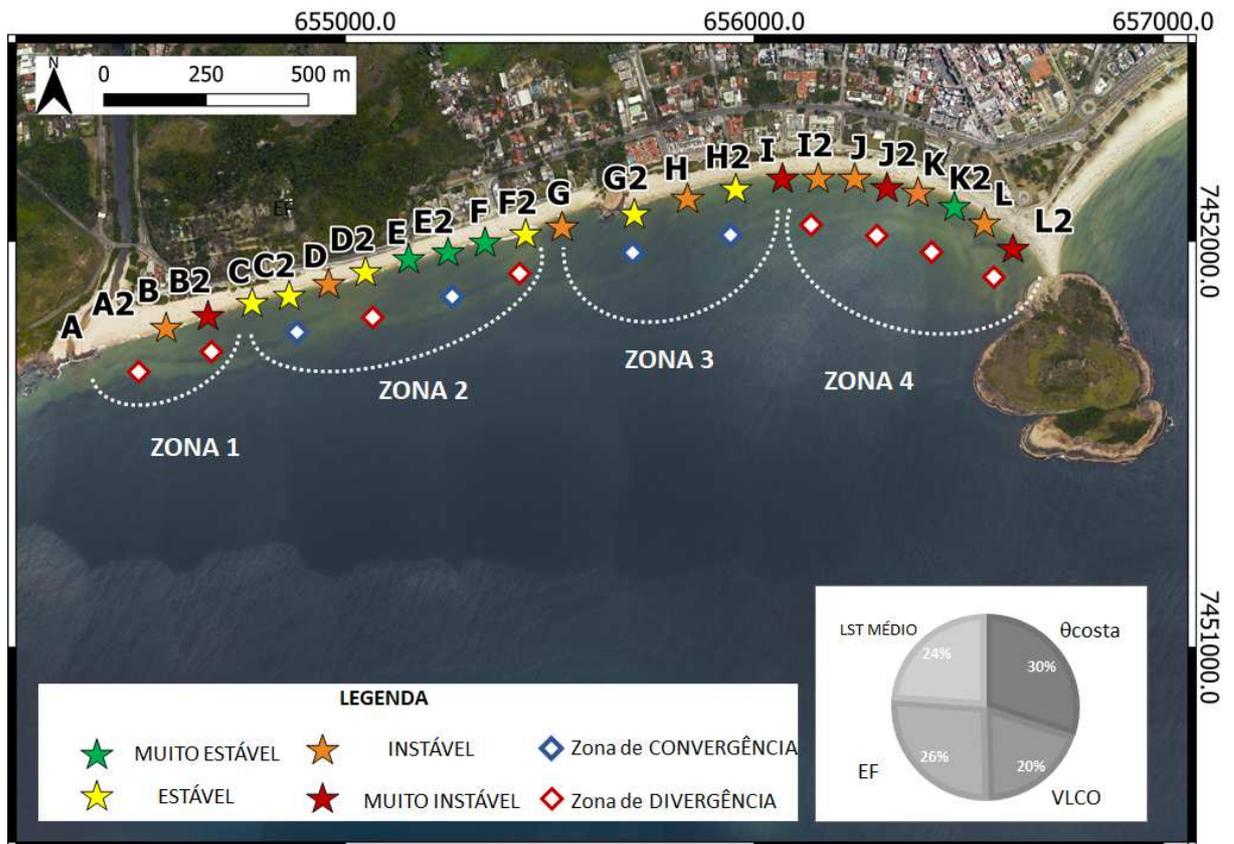
Fonte: A autora, 2020.

4.2.6 Classificação de estabilidade

Na praia da Macumba, 4 zonas foram identificadas a partir da classificação de estabilidade dos setores (Figura 53) e importância de cada um dos parâmetros analisado em cada um desses setores (Figura 54). Na Zona 1, região onde se observa uma célula de divergência do LST, sua instabilidade é principalmente associada aos altos valores de EF, os maiores de toda a praia, juntamente a altos valores de VLCO. Por sua vez, a Zona 2 compreende uma região mais estável da praia, onde células de convergência e divergência do LST são observadas. Com exceção do setor D, nesta zona observa-se grande variação do LSTR. Na Zona 3 da praia da Macumba temos uma célula de convergência do LST em uma região onde observa-se uma instabilidade. Nesta zona percebe-se o aumento da importância do VLCO e do EF nos setores de leste para oeste (de H2 para G), enquanto o $LST_{\text{MÉDIO}}$ diminui nesta mesma direção. Esta é uma região da praia um pouco mais peculiar devido da

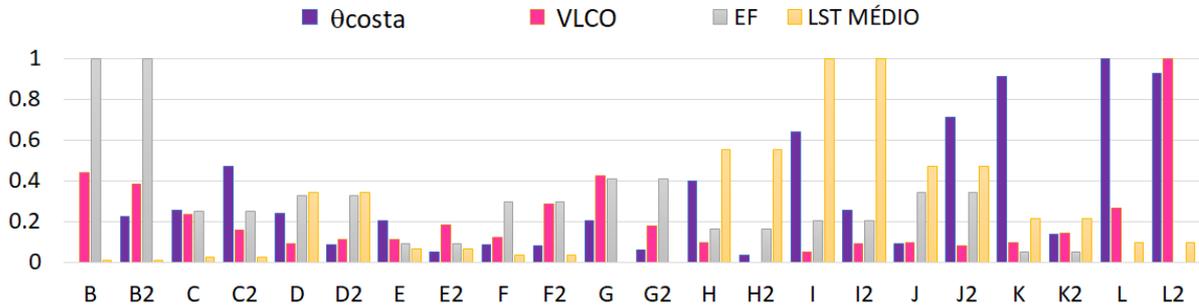
Pedra da Macumba entre G e G2, pois apesar de ser uma zona onde é observada a presença de uma célula de convergência do LST, este afloramento em alguns momentos atua aprisionando sedimentos em G2, quando é G é observada grande erosão. Por fim, a zona 4 da praia da Macumba, é uma região de alta instabilidade, na qual observa-se aumento da importância do θ_{costa} e VLCO em direção a leste, enquanto temos aumento do $\text{LST}_{\text{MÉDIO}}$ no sentido contrário.

Figura 53 – Mapa final de estabilidade costeira da praia da Macumba.



Fonte: A autora, 2020.

Figura 54 – Valores de EF, VLCO, θ_{costa} e $LST_{\text{MÉDIO}}$ da praia da Macumba normalizados entre 0 e 1 em cada um dos setores.



Fonte: A autora, 2020.

4.3 Praia de Grumari

4.3.1 Clima de ondas (1968 – 2008)

No ponto DOW selecionado para propagação de ondas na praia de Grumari (Figura 55) 38,19% ondas são de sul-sudeste com $Hs_{50\%}$ de 1,59 m, 37,50% compreendeu ondas de sudeste com $Hs_{50\%}$ no valor de 1,41; e 19,07% do espectro de ondas teve direção sul com $Hs_{50\%}$ de 1,93 m (Tabela 11). Com relação ao regime extremo deste ponto DOW, as direções sul-sudeste, sudeste e sul tiveram valores de Hs_{12} de 3,48 m, 2,94 m e 4,03 m. Durante o verão esta praia experimenta em torno de 55% de ondas de sudeste e 38% de ondas de sul-sudeste, com a maior parte dessas ondas não ultrapassando 2,14 m (Figura 55). Nos meses de outono, observa-se a presença de ondas com maiores alturas em relação ao verão. Nesta estação a direção sul-sudeste representa aproximadamente 40% das ondas, a direção sul representa em torno de 22%, e a direção sudeste aproximadamente 33%. Durante o inverno, em torno de 40% das ondas vem da direção sul-sudeste, pouco menos de 30% da direção sul, e em torno de 28% da direção sudeste. Nesta estação, percebe-se a ocorrência de ondas com altura entre 2,57 e 3,43 m. Nos meses de primavera, ondas de sudeste e sul-sudeste representam em torno de 38% e 42% respectivamente, enquanto ondas de sul compreendem 15% do total. Nesta estação as alturas mais frequentes estão entre 1,43 e 2,14 m, mas também são observadas ondas entre 2,14 m e 2,86 m.

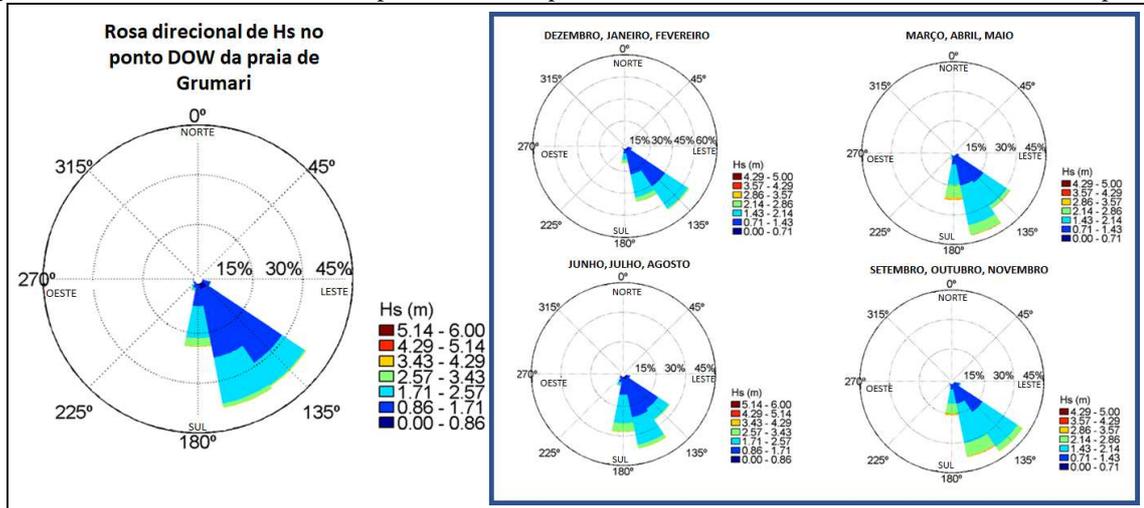
Tabela 11 – Relatório de altura significativa de ondas (Hs) obtido do SMC-Brasil para o ponto DOW selecionado na praia de Grumari

Direção	%	Hs _{50%} (m)	Hs _{75%} (m)	Hs _{95%} (m)	Hs _{99%} (m)	Hs12 (m)
N	0,00	-	-	-	-	-
NNE	0,00	-	-	-	-	-
NE	0,00	-	-	-	-	-
ENE	0,00	-	-	-	-	-
E	0,02	1,06	1,29	1,69	1,84	1,86
ESE	2,46	1,19	1,37	1,68	2,01	2,29
SE	37,50	1,41	1,69	2,14	2,57	2,94
SSE	38,19	1,59	1,94	2,47	2,88	3,48
S	19,07	1,93	2,33	2,93	3,41	4,03
SSW	2,26	1,56	1,99	2,90	3,40	3,90
SW	0,41	1,28	1,53	2,00	2,38	2,78
WSW	0,09	1,19	1,40	1,64	1,86	2,06
W	0,00	0,88	0,91	0,91	0,91	0,91
WNW	0,00	-	-	-	-	-
NW	0,00	-	-	-	-	-
NNW	0,00	-	-	-	-	-

Legenda: (%) - percentual de ocorrência de cada uma das direções; Hs_{50%} - percentil 50 do Hs; Hs_{75%} - percentil 75 do Hs; Hs_{95%} - percentil 95 do Hs; Hs_{99%} - percentil 99 do Hs; Hs12 – altura significativa extrapolada em 12 horas.

Fonte: A autora, 2020.

Figura 55 – Rosa direcional de Hs no ponto DOW da praia de Grumari e rosas direcionais sazonais neste ponto

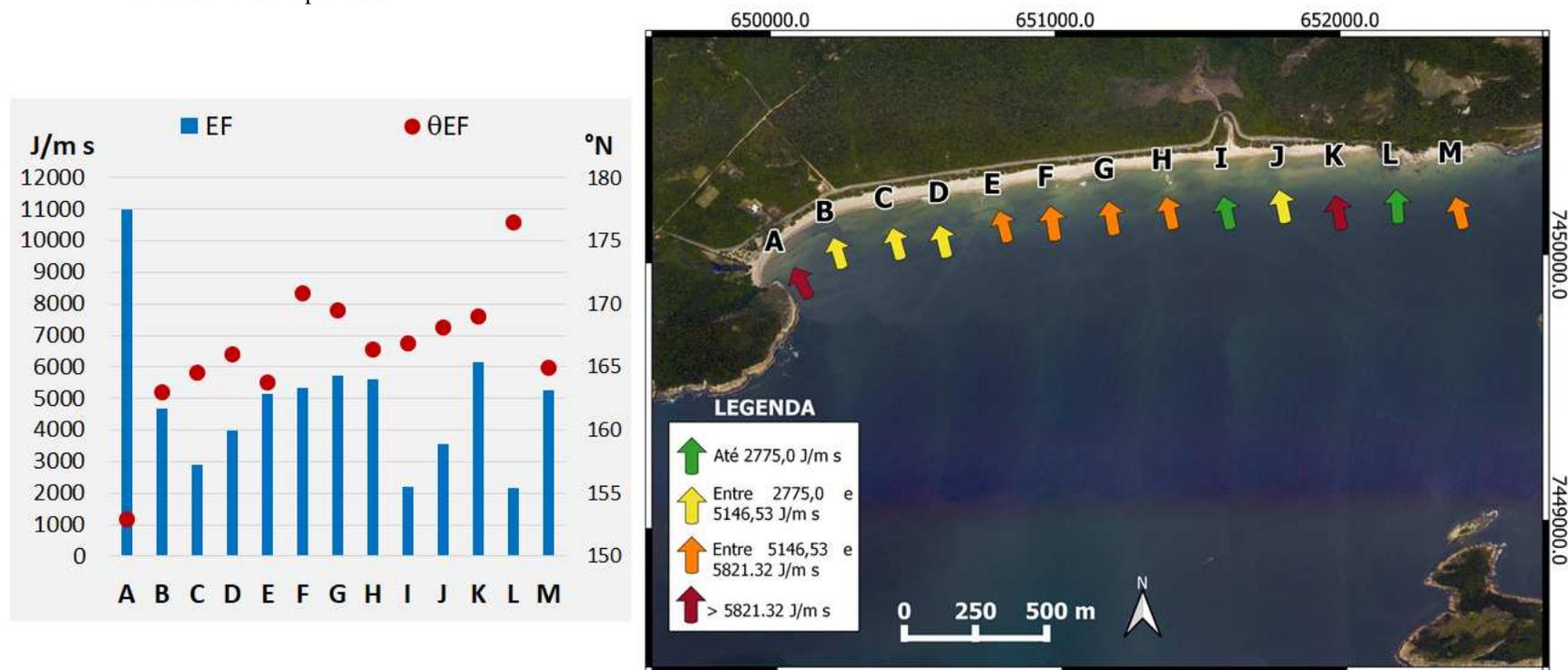


Fonte: Adaptado da saída do programa SMC-Brasil.

4.3.2 Fluxo de energia de ondas (EF e θ_{EF}) de 1948 a 2008

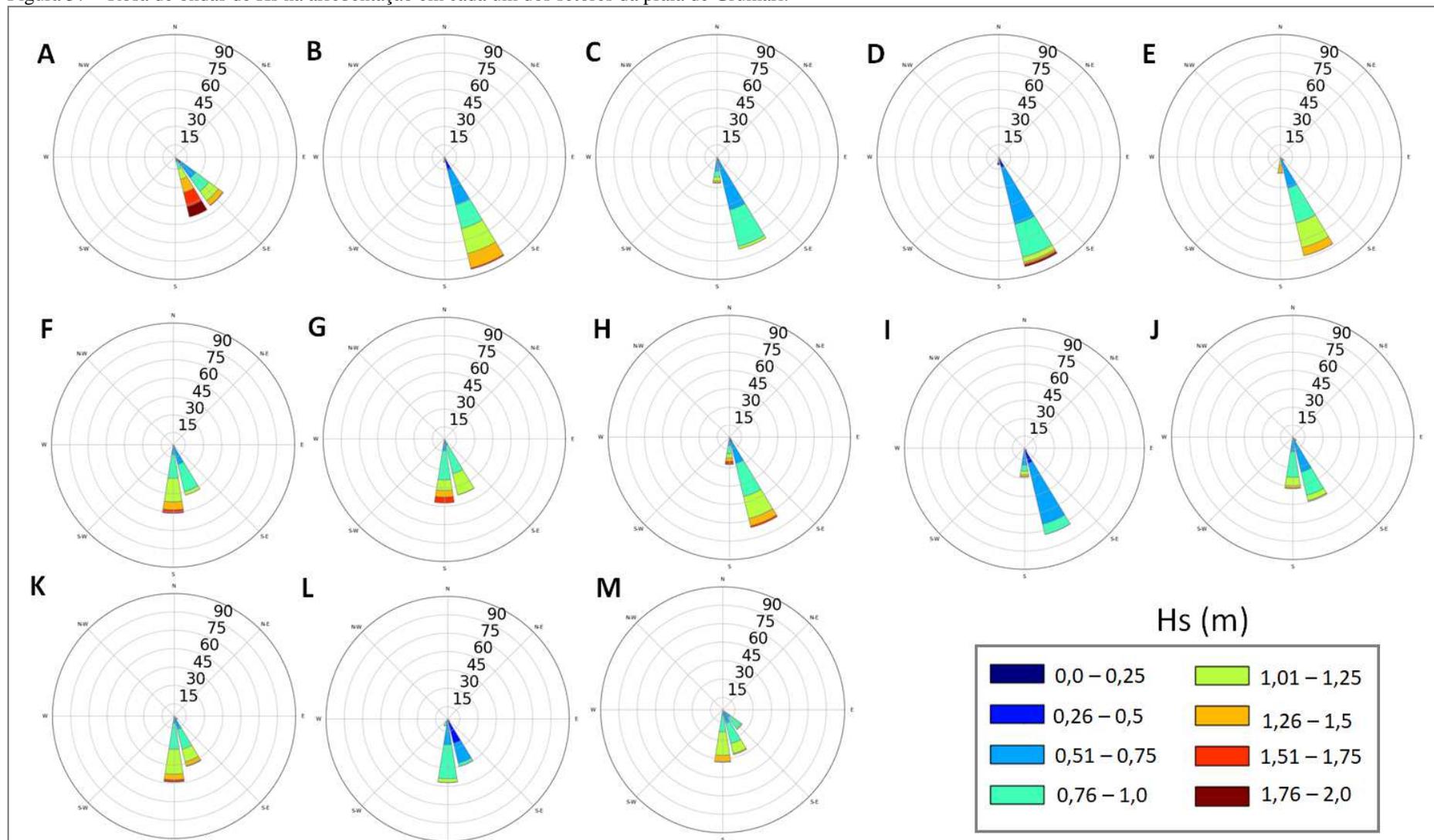
Em Grumari, observa-se um maior espalhamento do espectro direcional de ondas nos setores quando comparada às outras duas praias. Nos setores B, D e E, a direção preferencial das ondas é de sul-sudeste (Figuras 56 e 57). Entre os setores C, H e I em torno de 60% das ondas são de sul-sudeste e 15% de sul, em J ondas de sul-sudeste também compreendem a maior parte do espectro direcional, porém a um percentual de 45% enquanto a direção sul representa 30%. Em A observa-se praticamente uma rosa na qual metade das ondas são de sudeste e outra metade de sul-sudeste (Figura 57). Nos setores F, G, K, L e M a maior parte das ondas vêm da direção sul, seguida pela direção sul-sudeste em termos de importância, deste o setor com mais espalhamento foi o M, o qual apresenta ainda ondas de sudeste. Observando o gráfico na Figura 56, vemos que nesta praia o EF mostra a importância das ilhas no abrigo de regiões sombreadas por ela (setores I, J e L). Quanto ao θ_{EF} , nesta praia pode-se observar apenas uma pequena diferença de 10° entre a direção incidente no ponto A e no ponto B, uma mudança de mesma magnitude também é percebida entre o setor L e os setores adjacente (K e M).

Figura 56 – Esquerda: Gráfico com os resultados de EF e θ_{EF} nos setores da praia de Grumari. Direita: mapa mostrando a distribuição dos valores de EF na praia de Grumari de acordo com os percentis.



Legenda: Valores de EF até o percentil 20 estão em verde, entre o percentil 20 e 50 em amarelo, entre o percentil 50 e 80 em laranja e maior que o percentil 80 em vermelho.
Fonte: A autora, 2020.

Figura 57 – Rosa de ondas de Hs na arrebentação em cada um dos setores da praia de Grumari.

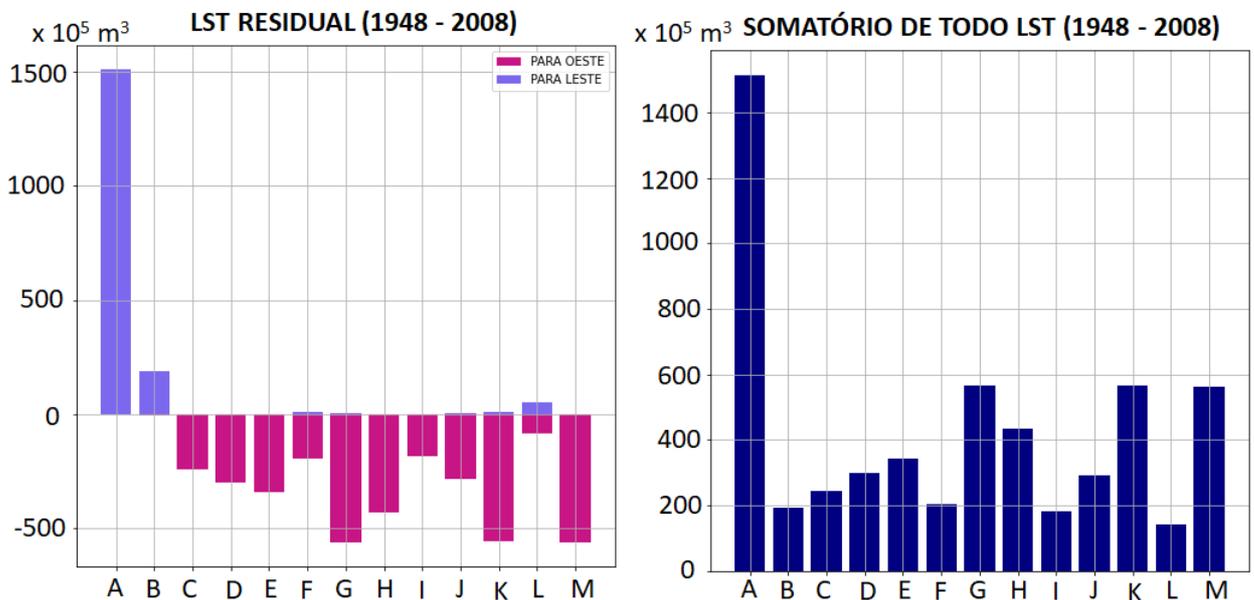


Fonte: A autora, 2020.

4.3.3 Transporte longitudinal de sedimentos e suas tendências (1948 – 2008)

Em Grumari o somatório de todos os valores de $LST_{MÉDIO}$ em cada um dos setores foi de $376,79 \text{ m}^3/\text{h}$ para oeste (Figura 58, Tabela 12). Na praia de Grumari, os maiores valores de $LST_{MÉDIO}$ ocorrem em A, G e H, enquanto os setores B, I e L possuem os valores mais baixos (Figuras 58 e 59), o único setor que apresentou grande variação do LSTR foi L. Nesta praia, tem-se uma zona de convergência entre os setores A e E, na qual se observa $LST_{MÉDIO}$ para leste em A e B e para oeste de C a E. Entre G e I foi calculada uma zona de convergência do LST, seguido por uma divergência entre I e K. Na região entre L e M é mostrada a presença de uma zona de convergência do LST, no entanto esta região, que está entre duas divergências, é dependente do transporte de sedimentos que vem de leste (Figura 59). Por conta disso, apesar do cálculo indicar convergência, em alguns momentos se observa a perda de toda da faixa de areia nesses setores (seção 4.3.4).

Figura 58 – Gráficos mostrando o LSTR e o somatório do módulo de todos os LSTs (LST_{TOTAL}) entre 1948 e 2008 nos setores da praia de Grumari.



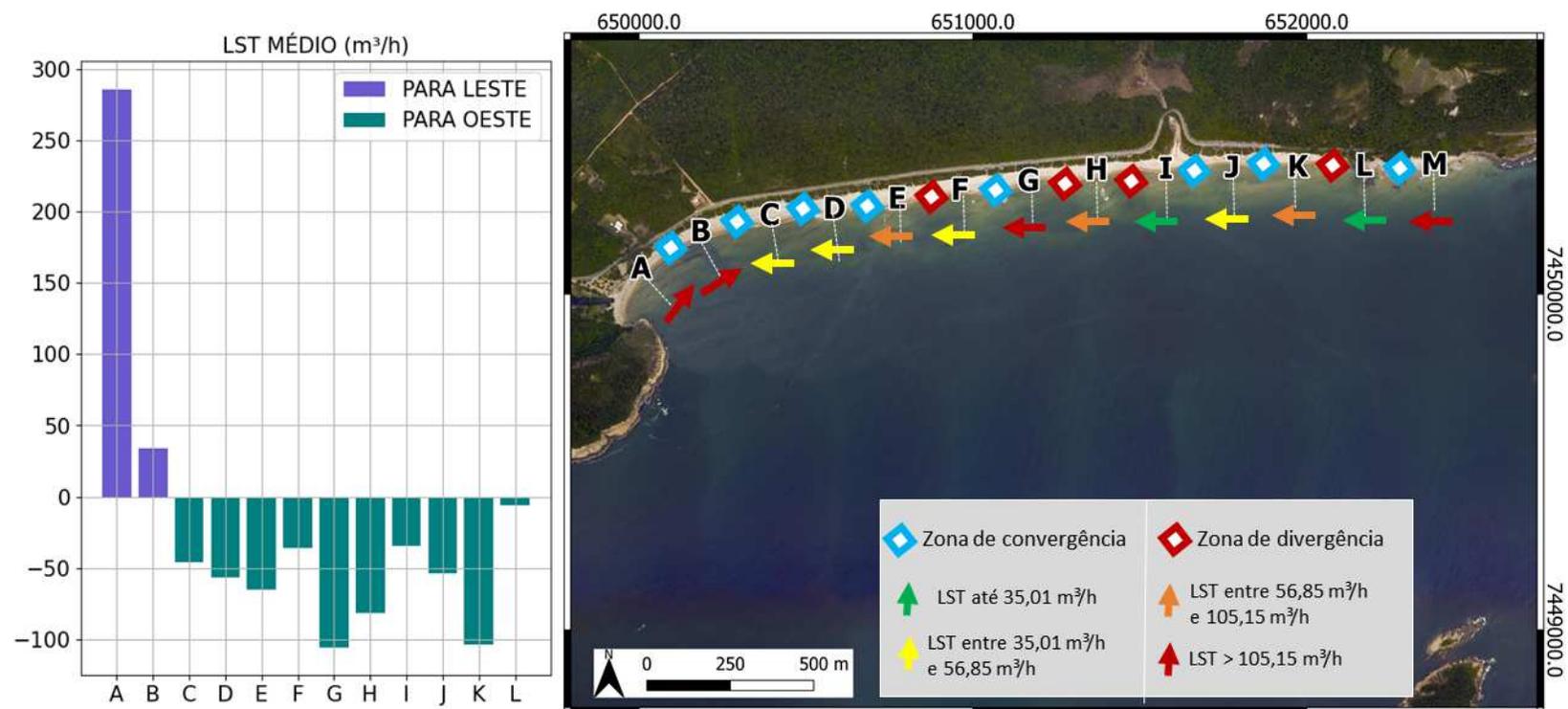
Fonte: A autora, 2020.

Tabela 12 – Resultado do $LST_{MÉDIO}$, $LSTR$ e o somatório dos valores de LST (LST_{TOTAL}) para o período de 1948 a 2008 na praia de Grumari.

Setor	$LST_{MÉDIO}$ (m^3)	$LSTR$ OESTE ($\times 10^5 m^3$)	PARA $LSTR$ PARA LESTE ($\times 10^5 m^3$)	LST_{TOTAL} ($\times 10^5 m^3$)
A	286,07	-2,06	1512,83	1514,89
B	33,79	-7,81	186,27	194,09
C	-46,05	-243,45	0,23	243,69
D	-56,85	-300,26	0,00	300,27
E	-65,22	-344,65	0,21	344,86
F	-36,03	-197,70	7,39	205,09
G	-10,82	-563,20	4,33	567,53
H	-81,97	-433,05	0,12913	433,18
I	-34,34	-182,61	1,27566	183,89
J	-53,58	-286,57	3,584	290,15
K	-104,16	-558,78	8,70248	567,48
L	-6,36	-87,20	53,5951	140,80
M	-106,26	-562,58	1,41785	563,99

Fonte: A autora, 2020.

Figura 59 – Esquerda: gráfico com o resultado do $LST_{MÉDIO}$ na praia de Grumari. Direita: zonas de convergência e divergência do LST na praia de Grumati e distribuição dos valores de LST de acordo com os percentis 20, 50 e 80.



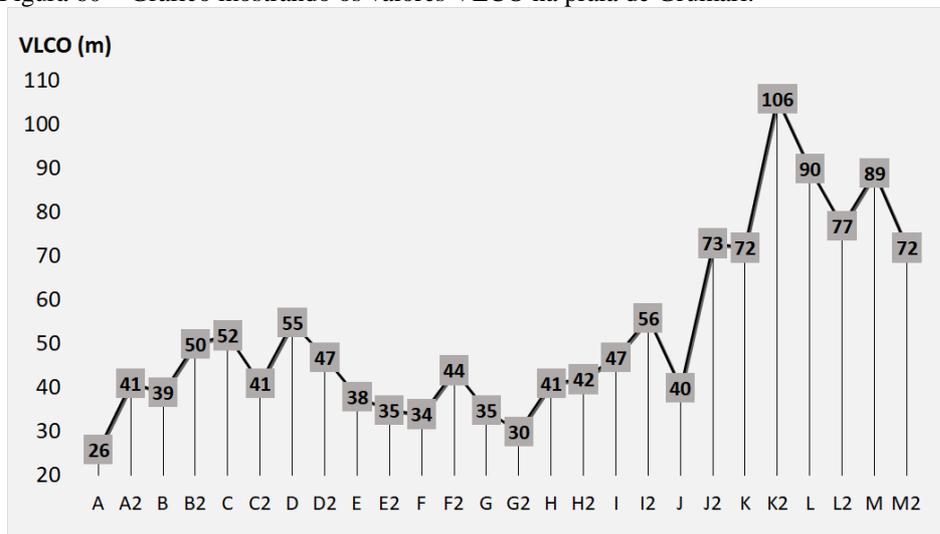
Legenda: Valores de VLCO até o percentil 20 estão em verde, entre o percentil 20 e 50 em amarelo, entre o percentil 50 e 80 em laranja e maior que o percentil 80 em vermelho.

Fonte: A autora, 2020.

4.3.4 Variação da linha de costa e forma em planta de equilíbrio estático (VLCO e θ_{costa})

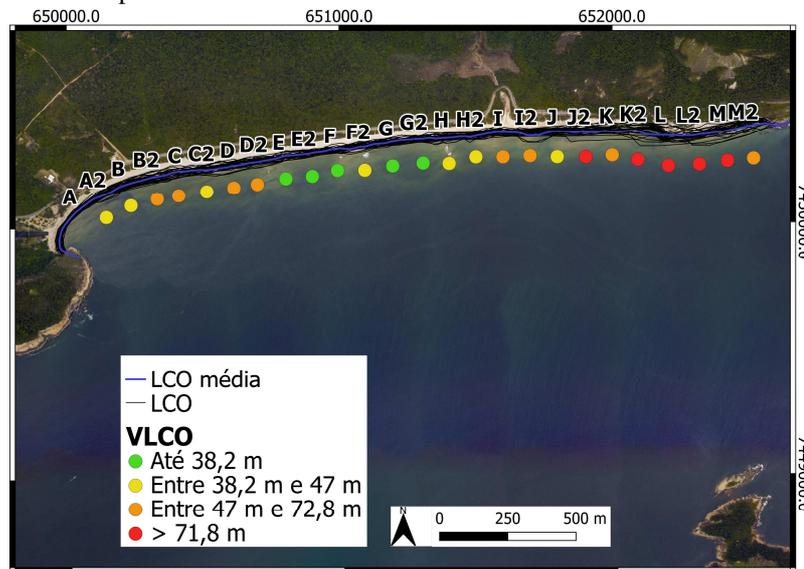
Em Grumari o valor médio de VLCO da praia como um todo foi de 54 m. O menor valor de variação da linha de costa foi observado no setor A (26 m), enquanto o maior valor observou-se no setor K2 (106 m) (Figura 60). Nesta praia, os setores entre J e M2 apresentaram as mais altas taxas de VLCO ao longo desta praia (Figura 61), esta é uma região em que a faixa de areia eventualmente é perdida por completo (Figura 62).

Figura 60 – Gráfico mostrando os valores VLCO na praia de Grumari.



Fonte: A autora, 2020.

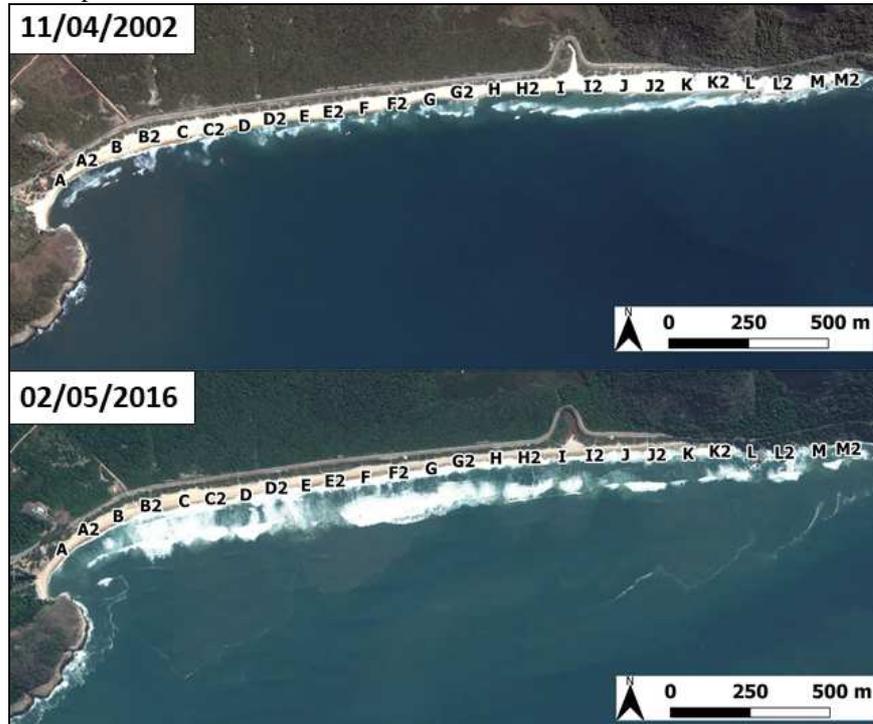
Figura 61 – Mapa mostrando as LCOs, LCO_{MÉDIA} e a distribuição dos valores de VLCO na praia de Grumari de acordo com os percentis.



Legenda: Valores de VLCO até o percentil 20 estão em verde, entre o percentil 20 e 50 em amarelo, entre o percentil 50 e 80 em laranja e maior que o percentil 80 em vermelho.

Fonte: A autora, 2020.

Figura 62 – Imagem do Google Earth da praia de Grumari em diferentes momentos mostrando uma larga faixa de areia nos setores de K a M2 no dia 11 de abril de 2002 e um outro momento em que não há faixa de praia nesses setores no dia 02 de maio de 2016.

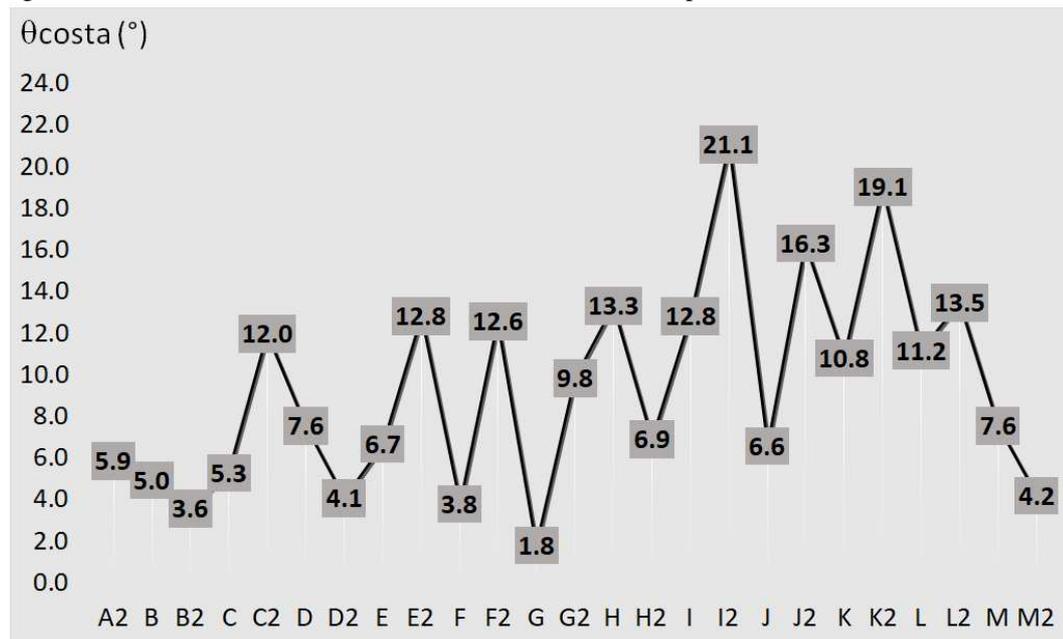


Fonte: Adaptado do Google Earth.

4.3.5 Forma em planta de equilíbrio estático (θ_{costa})

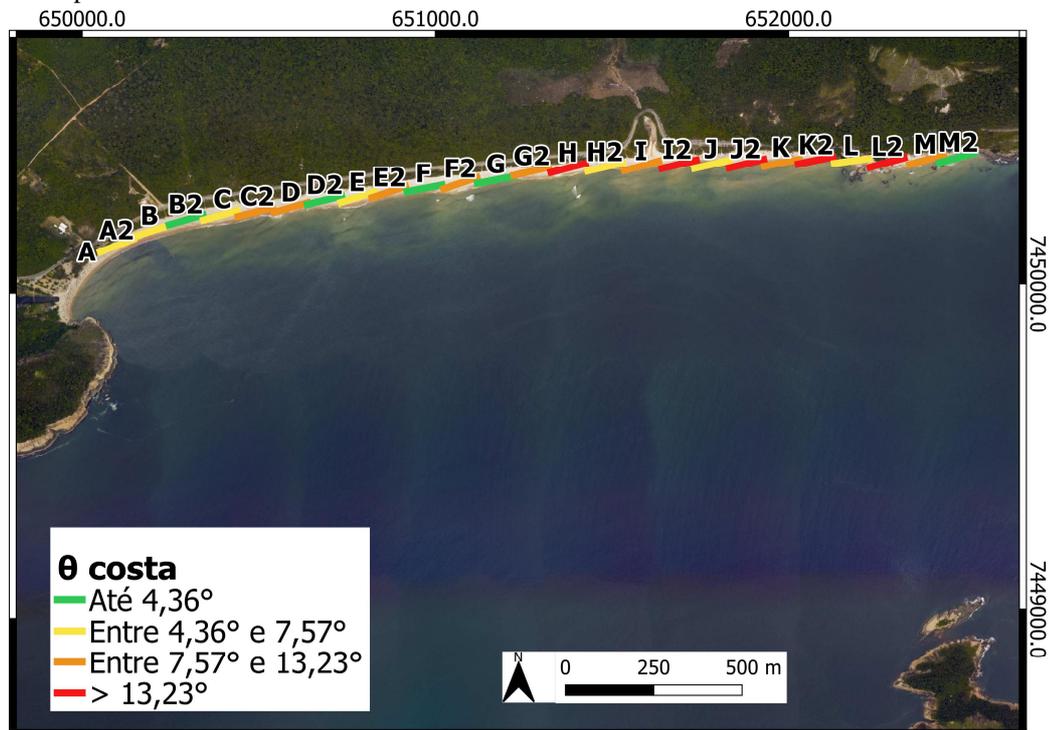
Em relação ao θ_{costa} , a praia de Grumari apresentou uma média da praia como um todo de $9,33^\circ$ deste parâmetro. Os maiores valores de θ_{costa} nesta praia foram encontrados em I2, K2 e J2 sendo respectivamente $21,08^\circ$, $19,06^\circ$ e $16,33^\circ$ (Figuras 63 e 64).

Figura 63 – Gráfico mostrando o valor de θ_{costa} nos setores da praia de Grumari.



Fonte: A autora, 2020.

Figura 64 – Mapa mostrando a distribuição dos valores de θ_{costa} na praia de Grumari de acordo com os percentis.



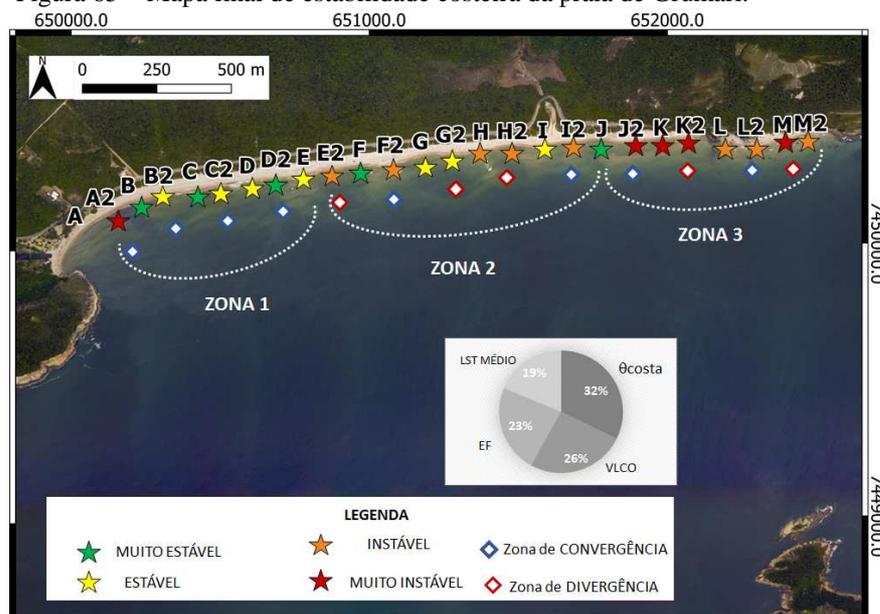
Legenda: Valores de θ_{costa} até o percentil 20 estão em verde, entre o percentil 20 e 50 em amarelo, entre o percentil 50 e 80 em laranja e maior que o percentil 80 em vermelho.

Fonte: A autora, 2020.

4.3.6. Classificação de estabilidade

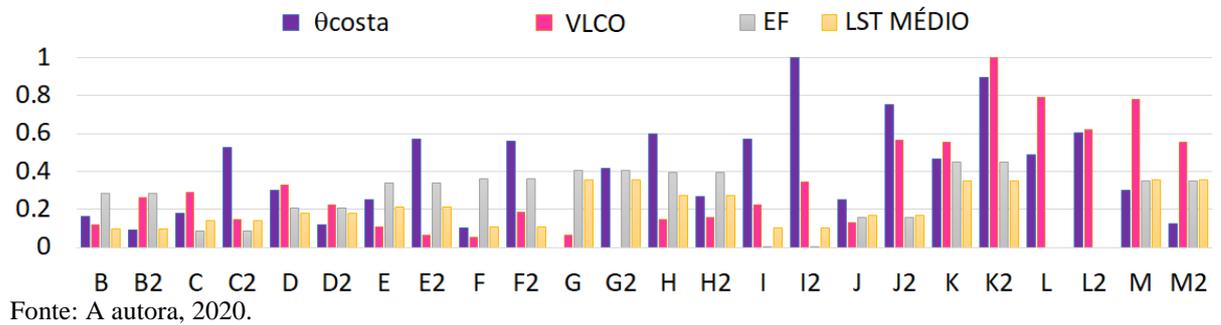
Foram identificadas de 3 zonas na praia de Grumari (Figura 65) a partir da compilação dos parâmetros apresentados anteriormente da distribuição deles ao longo da praia (Figura 66). A primeira zona desta praia (de A à E) é relativamente estável e nela observa-se uma célula de convergência do LST. A alta instabilidade associada ao setor A2 se deu devido aos valores de EF e $LST_{MÉDIO}$ neste setor, que foram os maiores da praia. No entanto, quando olhamos para os outros parâmetros, vemos que este setor acompanha a tendência dos outros setores de sua zona, apresentando valores baixos. Uma outra exceção nesta zona é quanto ao valor de θ_{costa} em C2, que é relativamente alto quando comparados aos setores adjacentes. A Zona 2 de Grumari compreende uma região relativamente instável, onde se observa alguns setores com estabilidade. Ao meio dessa zona observa-se uma célula de divergência do LST, a qual é adjacente a duas células de convergência. Observando a Figura 65, vemos que a partir nessa zona há uma grande importância do valor de θ_{costa} contribuindo para a instabilidade local. A Zona 3 de Grumari é uma região bastante instável, na qual há grande contribuição do VLCO para esta classificação, esta é uma região marcada pela perda total da faixa de areia em setembro de 2015, maio de 2016 e setembro de 2017. Percebe-se que apesar da tendência do LST indicar alguns pontos de convergência, esta é dependente do aporte de sedimentos que vem de leste.

Figura 65 – Mapa final de estabilidade costeira da praia de Grumari.



Fonte: A autora, 2020.

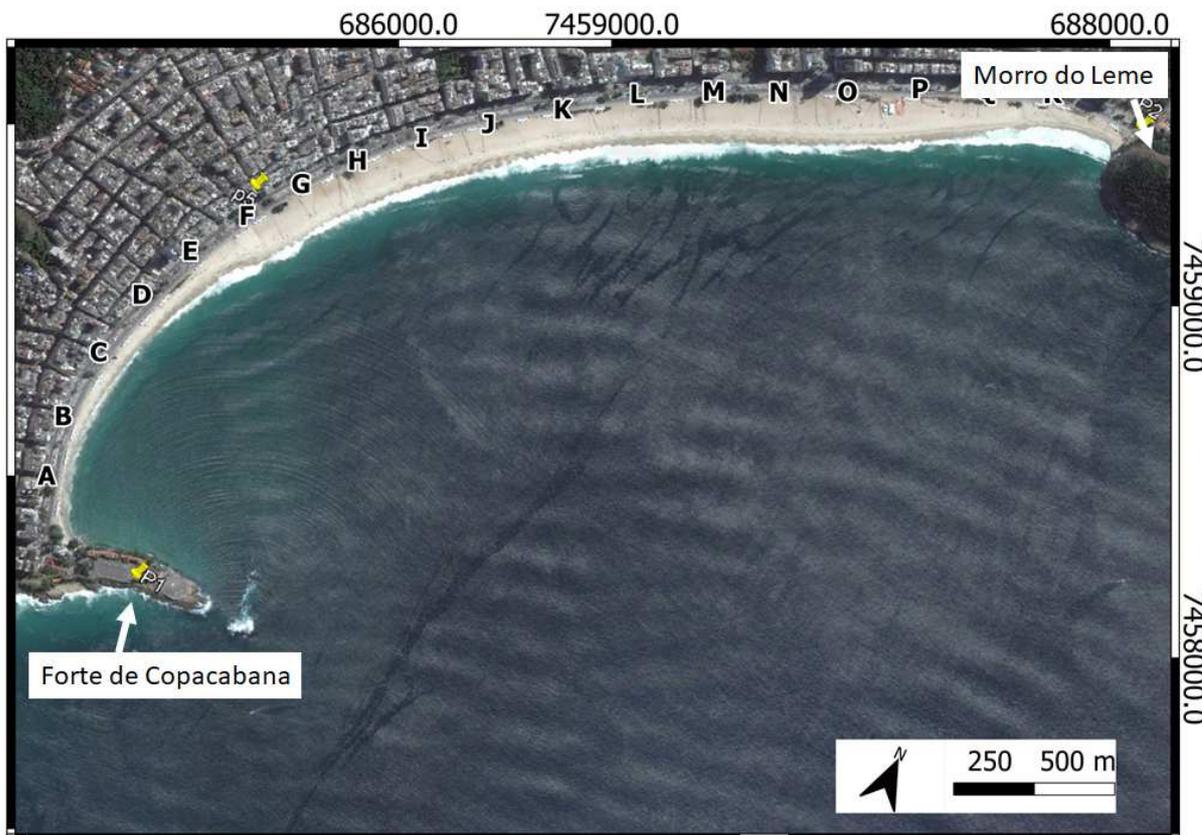
Figura 66 – Valores de EF, VLCO, θ_{costa} e $LST_{\text{MÉDIO}}$ da praia de Grumari normalizados entre 0 e 1 em cada um dos setores.



5 DISCUSSÃO

A análise do fluxo de energia das ondas (EF), transporte longitudinal de sedimentos (LST), variação da linha de costa (VLCO) e o cálculo da forma em planta de equilíbrio estático permitiu a identificação de áreas mais sensíveis nas praias estudadas, além de apontar para a contribuição de cada um dos parâmetros no grau de sensibilidade desses setores. Em Copacabana os principais fatores que contribuíram para a instabilidade da praia como um todo foram o EF e VLCO. Nesta praia, enquanto os setores mais a sudoeste (próximos ao Forte de Copacabana) apresentaram os maiores valores de θ_{costa} , a extremidade nordeste da praia (adjacente ao Morro do Leme) apresentou os maiores valores de EF (Figura 42). A ausência de formação de uma zona de sombra adjacente ao Morro do Leme (Figuras 33 e 67) pode ser explicada por dois fatores: a orientação da praia (NE-SO) e a direção de ondas incidentes vindas de offshore. Devido a estes dois fatores seria necessária a presença de ondas do 1º quadrante para gerar uma zona de sombra causada pelo Morro do Leme, e como dito anteriormente, nesta região as ondas são incidentes do 2º quadrante (Figuras 28 e 30). Quanto aos valores de VLCO, percebe-se em Copacabana que as regiões compreendidas entre os setores de D a F e de L2 a N2 apresentaram os maiores valores para este parâmetro, tais regiões estão localizadas em um local onde observa-se transição da largura da faixa de areia da praia. A praia da Macumba apresentou uma distribuição mais uniforme de contribuição dos parâmetros levantados para a classificação de estabilidade. Nesta praia, os setores mais a leste apresentaram maior importância dos valores de θ_{costa} , ao passo que o EF foi maior nos setores mais a oeste da praia. Comparada a outras praias, a praia da Macumba apresentou os menores valores de transporte, o que pode ser explicado pela presença de sedimentos mais grossos nesta (areia média) em relação as demais (areia fina). A praia de Grumari também apresentou uma contribuição uniforme dos parâmetros considerando a praia como um todo. Nesta praia, foi encontrado um aumento de importância do VLCO e do θ_{costa} em direção à leste, ou seja, em direção aos setores que ficam abrigados pelas ilhas (Figura 66).

Figura 67 – Imagem da praia de Copacabana no dia 09/06/2015 onde é mostrada uma região adjacente ao promontório do Forte de Copacabana, entre os setores A e D, protegida do ataque de ondas.



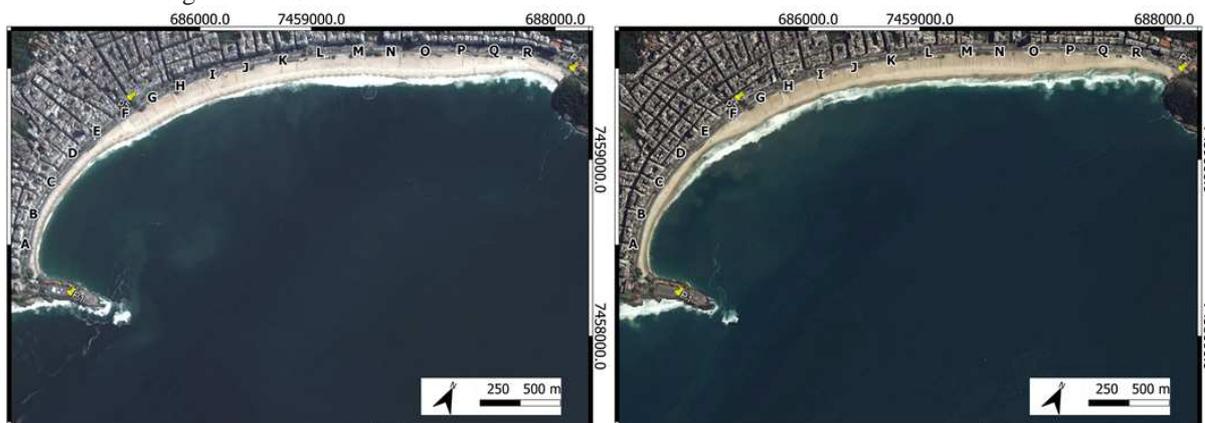
Fonte: Adaptada do Google Earth.

Os resultados de LSTR, os quais não foram incluídos no cálculo final de estabilidade da praias, revelaram a existência de variação da direção do transporte de sedimentos ao longo do ano em alguns setores. Assim, alguns locais onde o $LST_{MÉDIO}$ foi baixo, possuem uma maior movimentação dos sedimentos quando comparado a outros locais. Por exemplo, na praia da Macumba o setor B apresenta um valor de $LST_{MÉDIO}$ de $-0,89 \text{ m}^3/\text{h}$, enquanto o setor H apresenta um valor de $-30,91 \text{ m}^3/\text{h}$, no entanto, o LST_{TOTAL} não apresenta valor de $172,24 \times 10^5$ e $158,99 \times 10^5 \text{ m}^3$ nos setores B e H, respectivamente. Nesta mesma praia, o mesmo se observa comparando os setores H e J, este último apresenta $LST_{MÉDIO}$ de $-26,34 \text{ m}^3/\text{h}$ e LST_{TOTAL} de $183,66 \times 10^5 \text{ m}^3$. Em Grumari, este comportamento também é observado nos setores G e E, os quais apresentam $LST_{MÉDIO}$ de $-10,82 \text{ m}^3/\text{h}$ e $-65,22 \text{ m}^3/\text{h}$, respectivamente, ao passo que o LST_{TOTAL} no setor G é de $567,53 \text{ m}^3$ e em E $300,27 \text{ m}^3$. Mesmo com essas variações do LST ao longo em alguns setores algumas zonas de convergência e divergência do LST foram identificadas e podem ser relacionadas ao formato da linha de costa nas praias estudadas. Este tipo de análise foi feita por Rodriguez e Dominguez (2017) que verificaram a presença de divergências de LST, calculadas através do SMC-Brasil, coincidindo com pontos em que foram observadas erosões severas na costa do município de Aracaju, nas praias do

Refúgio-Mosqueiro e na Praia da Coroa do Meio. Neste sentido, espera-se que locais que apresentem zonas de divergência do LST apresentem tendências à erosão.

Em Copacabana, observa-se a ocorrência de uma zona de divergência do LST na Zona 1, mesmo local onde se observa a presença de uma região mais estreita da praia (Figuras 35 e 40). Nestes setores, além da tendência de saída dos sedimentos em direção a nordeste, temos que a presença do promontório do Forte de Copacabana dificulta a chegada de sedimentos nessa região (Figura 68), o que pode explicar esta presença de uma zona mais estreita da praia. Na Zona 2 desta praia, observa-se a presença de uma zona de convergência do LST, região que coincide com a transição de uma faixa estreita da praia (O10 m) para uma faixa mais larga (O100 m) (Figura 36). No entanto, os valores de VLCO da Zona 2 mostram que se trata de um local com bastante variação da largura da faixa de areia, entre 50 m e 89 m (Figuras 37 e 38). Sendo assim, apesar de o cálculo do LST indicar a presença de uma zona de convergência, a manutenção da largura da praia nessa região depende do aporte de sedimentos vindos da Zona 1, a qual já apresenta uma restrição a chegada de sedimentos devido a presença do promontório do Forte de Copacabana. Isso pode justificar a presença de uma faixa de areia estreita, mesmo onde há a tendência à convergência do transporte. Na Zona 4, nos setores de L a O2 há a presença de uma região protuberante da praia em relação às áreas adjacentes. Esta protuberância, em alguns momentos é menos saliente, e sua variação pode ser vista nos altos valores de VLCO observados entre L e N2 (Figura 37). Sendo assim, também neste setor, apesar de a tendência de convergência do LST nos setores M, N e P há, mais uma vez, dependência do aporte de sedimentos para manutenção da largura da praia.

Figura 68 – Esquerda: praia de Copacabana no dia 03 de agosto de 2015. Direita: praia de Copacabana no dia 25 de agosto de 2017.



Fonte: Google Earth.

Na praia da Macumba, observa-se na Zona 3 a presença de uma célula de convergência do LST juntamente com altos valores de VLCO, com um histórico de erosões

severas (CARVALHO et al, 2020). Estudos recentes mostram que nesta praia, durante um evento de tempestade com ondas de sudeste com Hs entre 2 e 4 m, linha de costa recuou entre 10 m e 20 m em abril de 2010. Em um outro evento com características similares em agosto de 2017 este movimento da linha de costa atingiu valores de recuo da linha de costa entre 20 m e 30 m. (Carvalho et al. 2020). Nas imagens de satélite levantadas na plataforma do Google Earth, foram observados momentos em que o setor G teve perda total de sua faixa de areia, mesmo período em que se observa alargamento da faixa de areia em G2 (Figuras 48 e 50). Sendo assim, pode-se supor que, devido à presença da Pedra da Macumba (localizada entre G e G2) o transporte de sedimentos de H para G pode ocasionalmente ficar retido em G2, fazendo com que a zona de divergência do LST no setor F se estenda até a Pedra da Macumba.

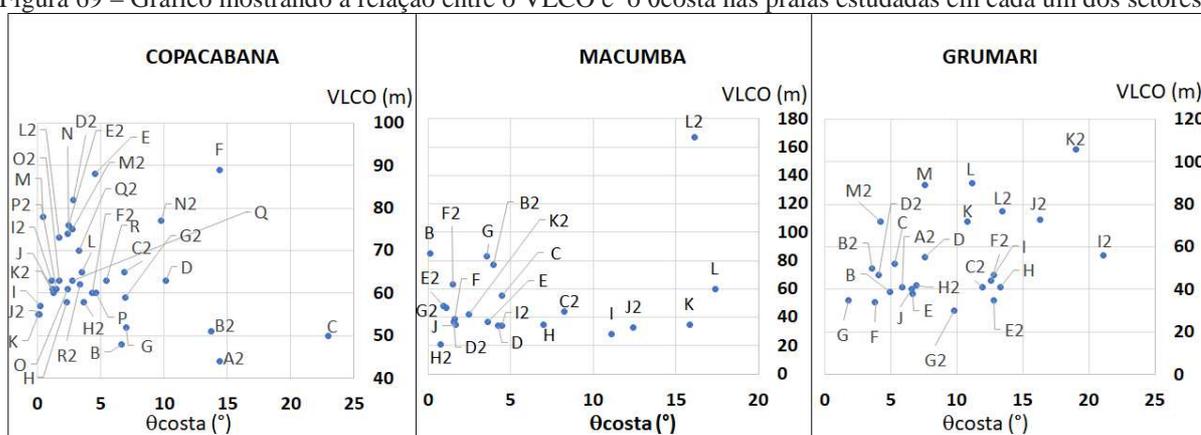
Por fim, em Grumari, na zona de instabilidade entre J2 e M2, observou-se perda total da faixa de areia em maio de 2016 e setembro de 2017 (Figuras 60 e 62). Além disso, na região entre L e M é mostrada a presença de uma zona de convergência do LST. No entanto, esta região, que está entre duas zonas de divergência, é dependente do transporte de sedimentos que vem de leste, ou seja, que vem da região da praia da Macumba. Conforme mostrado anteriormente, devido à maior granulometria, o $LST_{MÉDIO}$ da praia da Macumba como um todo é aproximadamente 2 vezes menor que o transporte ao longo de Grumari. Por esta razão, se levado em consideração apenas o LST vindo da Macumba como fonte de sedimentos para Grumari, esta apresentaria um déficit de aporte de sedimentos.

A utilização da orientação da forma em planta de equilíbrio estático permitiu a análise da representatividade desse parâmetro em relação a estabilidade de uma linha de costa. Algumas regiões onde o θ_{costa} apresentou um valor baixo coincidiu com locais mais estáveis, como é o caso da Zona 3 de Copacabana, Zona 2 da Macumba e Zona 1 de Grumari (Figuras 41, 42, 53, 54, 65 e 66). Similarmente, algumas regiões instáveis, como a Zona 3 de Grumari e Zona 4 da Macumba, coincidiram com locais onde se observa valores maiores de θ_{costa} . Além disso, estas são zonas onde foram observados focos de erosão com perda da faixa de areia em algumas imagens do Google Earth (Figuras 50 e 62). No entanto, algumas exceções ocorreram em alguns setores que foram considerados instáveis devido à influência de outros parâmetros, como é o caso dos setores O e O2 da praia de Copacabana, o qual foi bastante influenciado pelo EF; o setor G na Macumba, onde os valores de EF e VLCO se mostraram importantes; e o setor M2 em Grumari, o qual foi sensível ao EF, VLCO e $LST_{MÉDIO}$.

De acordo com a literatura, ao atingir a forma em planta de equilíbrio estático, que corresponde à sua configuração de maior estabilidade, a praia atinge sua posição de máximo

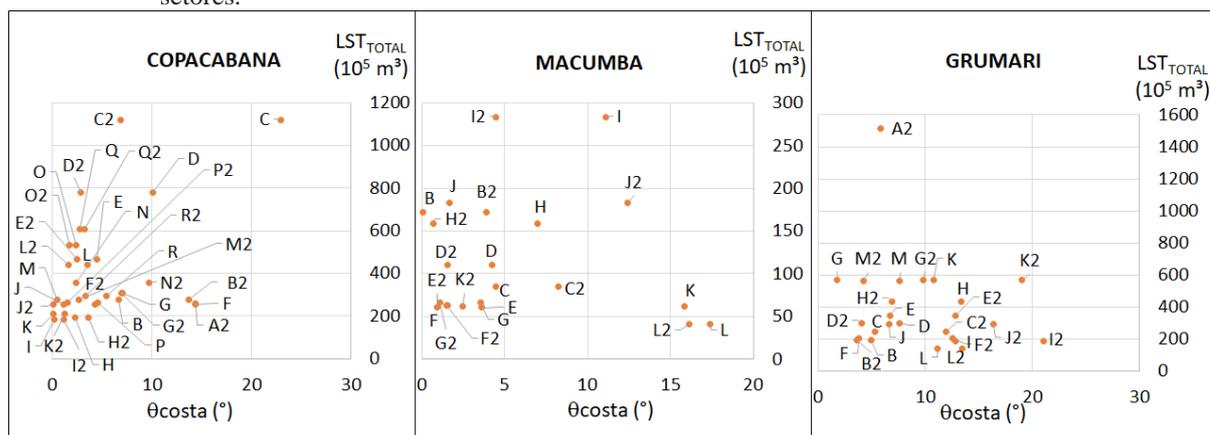
recuo e, assim, cessa o transporte longitudinal de sedimentos (HO, 1971; HSU E EVANS, 1989; LONGUET-HIGGINS E STEWART, 1962; GONZALEZ E MEDINA, 2001). Sendo assim, espera-se que quanto mais afastada da orientação de equilíbrio estático uma praia esteja, esta apresente maior variação da linha de costa, ou seja, neste trabalho, quanto maior o valor θ_{costa} , maior também seria o valor de variação da largura da praia (VLCO). Do mesmo modo, espera-se encontrar menores volumes de sedimento sendo transportados em setores com menores valores de θ_{costa} . Assim, espera-se obter uma relação diretamente proporcional tanto entre o θ_{costa} e o VLCO (Figura 69) quanto entre o θ_{costa} e o LST_{TOTAL} (Figura 70).

Figura 69 – Gráfico mostrando a relação entre o VLCO e o θ_{costa} nas praias estudadas em cada um dos setores.



Fonte: A autora, 2020.

Figura 70 – Gráfico mostrando a relação entre o $LSTO_{\text{TOTAL}}$ e o θ_{costa} nas praias estudadas em cada um dos setores.



Fonte: A autora, 2020.

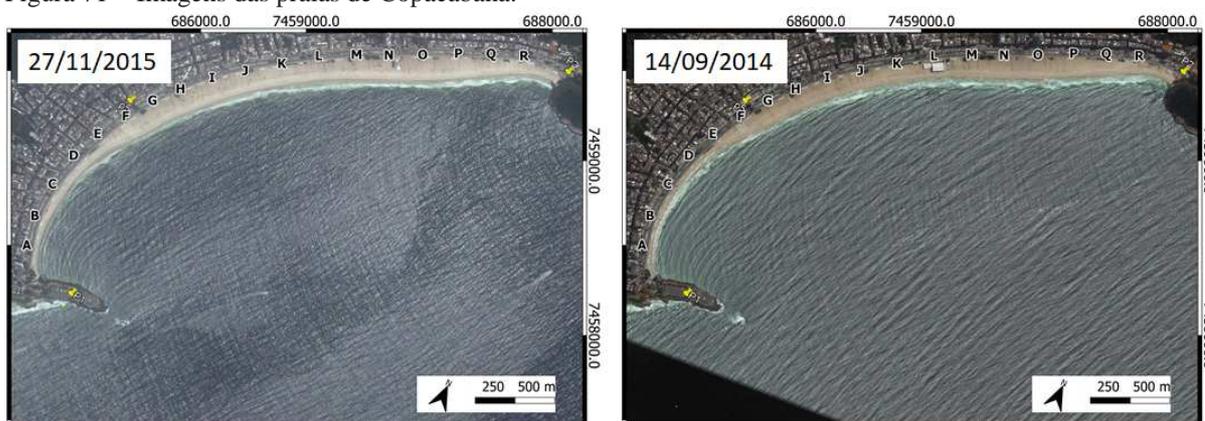
Em Copacabana, a relação entre o θ_{costa} e VLCO apresentou um valor negativo (-0,19), enquanto uma correlação positiva foi observada entre o θ_{costa} e LST_{TOTAL} (0,39). Percebe-se que os setores A2, B2 e C apresentaram um comportamento distinto dos demais na relação entre θ_{costa} e VLCO, com valores altos de θ_{costa} e baixos de VLCO. Assim, ao

refazer o cálculo de correlação entre θ_{costa} e VLCO excluindo os resultados desses setores, esta passou para um valor positivo (0,25). Na Macumba a correlação entre o θ_{costa} e VLCO foi positiva (0,27), enquanto o oposto se observou na relação entre o θ_{costa} e LST_{TOTAL} (-0,6). Mesmo com a correlação θ_{costa} e VLCO positiva, também foi possível identificar na praia da Macumba setores com altos valores de θ_{costa} e baixos valores de VLCO, são esses os setores I, J2, K, L. Além desses, o setor B da Macumba também apresentou um comportamento distinto, com um alto valor de VLCO em relação aos demais setores e baixo valor de θ_{costa} . É possível que o alto valor de VLCO apresentado neste setor seja fortemente influenciado pela saída de sedimentos do canal, além de interferências antrópicas como, por exemplo, a dragagem deste. Assim, como na praia da Macumba, em Grumari a correlação entre o θ_{costa} e VLCO foi positiva (0,41) e a correlação entre θ_{costa} e LST_{TOTAL} foi negativa (-0,18). Nesta praia, o setor I2, que apresentou o maior valor de θ_{costa} , não apresentou valores tão altos de VLCO quando comparado a outros setores. Do mesmo modo, o setor A2 apresentou comportamento distinto dos demais setores com alto valor de LST_{TOTAL} e baixo valor de θ_{costa} .

As relações excepcionais entre o θ_{costa} com o VLCO e LST_{TOTAL} encontradas em alguns setores, podem indicar a presença de outros fatores influenciando na forma em planta encontrada nessas praias. Em Copacabana e Macumba, os setores que apresentaram baixos valores de VLCO e altos θ_{costa} estão em regiões abrigadas (Zona 1 de Copacabana e Zona 4 na Macumba). É possível que estes setores estejam em situação de equilíbrio dinâmico, estado no qual a posição da linha de costa permanece constante, ou seja, pequena variação de VLCO, desde que seja mantido o balanço sedimentar. Em Copacabana, a comparação da relação entre VLCO e o θ_{costa} (Figura 68), e LST_{TOTAL} e o θ_{costa} (Figura 69) sugere que a Zona 1 juntamente com o setor C estejam em equilíbrio dinâmico, uma vez que apresentam baixos valores de VLCO e altos valores de θ_{costa} . No entanto, para ser mantido o equilíbrio dinâmico no setor C seria necessária a chegada de um grande volume de sedimentos, conforme mostrado em seu valor de LST_{TOTAL} (Figura 69). No entanto, a presença do promontório do Forte de Copacabana dificulta a chegada de sedimentos vindos de sudoeste, os quais seriam necessários para alimentar a Zona 1 dessa praia (Figura 70). Sendo assim, é possível que a forma em planta encontrada nas Zonas 1 e 2 de Copacabana não tenham origem unicamente na sua relação com o transporte longitudinal de sedimentos, uma vez que a carência de sedimentos nestas zonas resultariam em uma forma em planta de equilíbrio estático. Além disso, o processo de reflexão de ondas, o qual não foi levado em consideração

no cálculo da forma em planta, pode ser responsável por modificações na linha de costa dessa praia. Imagens do Google Earth do dia 14/09/2014 e 27/11/2015 mostram a ocorrência de reflexão de ondas no promontório do Morro do Leme em direção a outra extremidade da praia (Figura 71). Na praia da Macumba, também há indícios de um equilíbrio dinâmico na Zona 4, com exceção do setor L2. Este setor está localizado em uma região onde se observa a formação de um tómbolo adjacente ao Morro do Pontal o qual, apesar de estar em uma região bastante abrigada do ataque de ondas, apresenta uma grande variação das posições de sua LCO (Figuras 48, 49 e 50), tanto na direção leste-oeste, quanto em direção ao continente. Este setor, apesar de estar na zona de sombra do promontório, apresenta grande influência das correntes longitudinais à costa, por vezes vindas de regiões a leste do tómbolo. Em Grumari, a relação encontrada no setor I2, com alto valor de θ_{costa} e baixo valor de LST_{TOTAL} , podem indicar a presença de outro tipo de transporte, que não o longitudinal, deslocando os sedimentos dessa praia.

Figura 71 – Imagens das praias de Copacabana.



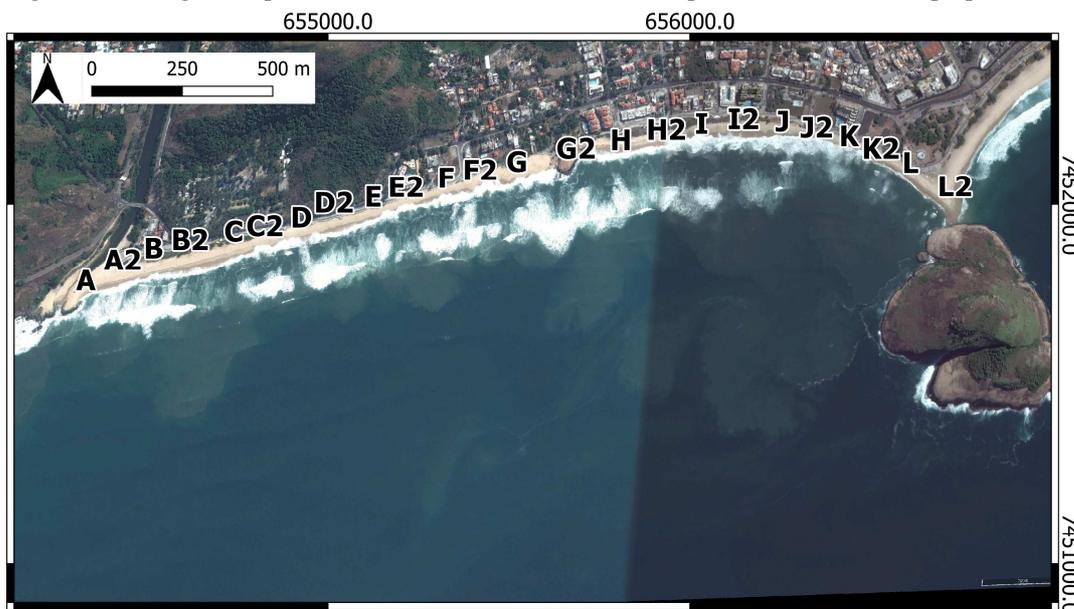
Fonte: Google Earth.

Harley et al. (2015) mostraram que a compreensão clássica de que o processo de rotação de praias encaixadas entre promontórios se deve unicamente às trocas de sedimentos ao longo da costa é muito simplificada. De acordo com estes autores, a rotação dessas praias apresenta um padrão complexo em que a variabilidade observada ao longo da praia pode ser mais fortemente influenciada pelo transporte transversal à costa. Neste estudo, os autores encontraram que 55% de toda a variabilidade observada no volume/largura e declividade da praia de Narrabeen-Collaroy (SE da Austrália) ocorre devido a trocas de sedimentos transversalmente à costa, as quais são fortemente controladas pelo gradiente ao longo da costa da altura das ondas na zona de arrebentação. Estes autores concluíram que, já que as trocas de sedimentos são mais efetivas nas regiões da praia que estão mais expostas ao clima de ondas,

setores da praia mais afastados da zona de sombra do promontório apresentam um padrão de rotação de praia que não está relacionado aos processos de transporte de sedimentos ao longo da costa. Um outro estudo realizado por Robinet et al. (2020) em praias com formato curvo, como as estudadas neste trabalho, mostrou que a geologia inerente a cada praia desse tipo influencia fortemente a sua variabilidade espacial. Neste estudo, os autores encontraram modificações morfológicas ao longo da costa na praia de Narrabeen (SE da Austrália) provocadas por um afloramento offshore, que é responsável por limitar a rotação dessa praia. Outros resultados encontrados pelos mesmos autores foi que a extensão rochosa submersa do promontório dessa praia aumenta a rotação de linha de costa e a variabilidade do modo de migração dos sedimentos transversalmente à costa.

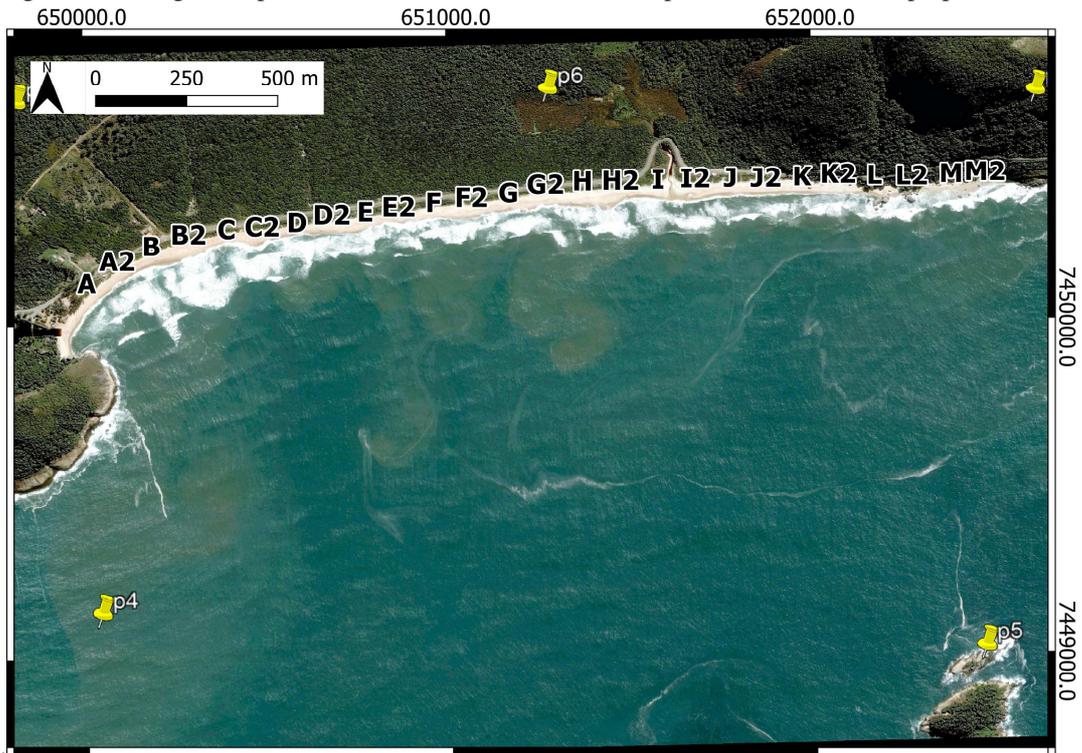
Sendo assim, é possível afirmar que a presença de zonas de convergência do transporte longitudinal de sedimentos nas praias estudadas nem sempre coincide com uma costa menos suscetível à erosão. Dentro desse contexto, alguns fatores adicionais parecem ser importantes, dentre eles: o aporte sedimentar, o controle da geologia local e correntes transversais às praias. Alguns indícios da presença de transporte de sedimentos por correntes transversais a costa nas praias de Copacabana, Macumba e Grumari são mostrados nas Figuras 68, 72 e 73, onde há a presença de plumas de sedimentos perpendiculares a linha de costa.

Figura 72 – Imagem da praia da Macumba onde são mostradas plumas de sedimentos perpendiculares a costa.



Fonte: Adaptado do Google Earth

Figura 73 – Imagem da praia de Grumari onde são mostradas plumas de sedimentos perpendiculares a costa



Fonte: Adaptado do Google Earth.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados mostrados e do que foi discutido podemos concluir que ao longo de uma mesma praia, diferentes fatores podem ser responsáveis pela instabilidade costeira observada ao longo desta. Além disso, praias localizadas em regiões próximas podem estar sujeitas a diferentes condições contribuindo para a instabilidade observada em cada uma delas. De maneira geral, nas praias analisadas o uso da orientação da forma em planta em associação com outros parâmetros foi um bom indicador da estabilidade, pois houve uma tendência de valores maiores de θ_{costa} estarem em regiões que foram consideradas instáveis, ou seja, regiões mais sensíveis aos parâmetros que foram analisados (EF, VLCO, LST_{MÉDIO} e θ_{costa}). Além disso, quando comparado aos parâmetros indicativos da mobilidade dos sedimentos dessas regiões, LST_{TOTAL} e VLCO, o θ_{costa} apresentou correlação positiva com estes parâmetros, quando retirados alguns valores que mostravam tendência contrária à maioria dos valores calculados, que podem estar. No entanto, é necessário investigar melhor a possibilidade de ocorrência de equilíbrio dinâmico em alguns setores das praias, principalmente os que apresentam pequenos valores de VLCO e altos valores de θ_{costa} .

Assim, avaliações de estabilidade costeira devem levar em consideração não apenas a dinâmica da zona costeira avaliada, como também a herança geológica observada em cada local. Por exemplo, apesar de os cálculos de LST apontarem para a presença de uma zona de convergência de LST entre o setor G e H da Praia da Macumba, observa-se em G através de imagens do Google Earth erosões severas, ao passo que sedimentos são aprisionados em H a leste desse afloramento. Outro exemplo são os setores L e M em Grumari, onde o cálculo de LST apontou para a presença de uma zona de convergência, no entanto, este local depende da chegada de sedimentos vindo de leste, o que nem sempre ocorre. Desse modo, mais estudos são necessários nestas praias para compreender a influência da geologia local e do transporte de sedimentos onshore-offshore.

REFERÊNCIAS

- BOOIJ, N. Gravity waves on water with non-uniform depth e currents. Report n° 81-1, Delft University of Technology, 131. 1981.
- CAMUS, P.; MENDEZ, F.; MEDINA, R. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. **Fuel and Energy Abstracts**. v. 58, p. 851–862, 2011.
- 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. 198 f. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- 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.
- DAVIDSON-ARNOTT, R. **An introduction to coastal processes and geomorphology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- DERECZYNSKI, C. P.; MENEZES, W. F. Meteorologia da Bacia de Campos. In: MARTINS, R. P.; GROSSMANN-MATHESON, G. S. (Eds.). **Meteorologia e Oceanografia**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2015. p. 1–54.
- ELSHINNAWY, A. I; MEDINA, R.; GONZÁLEZ, M. Dynamic equilibrium planform of embayed beaches: Part 1. A new model and its verifications. **Coastal Engineering**, v. 135, p. 112–122, 2018.
- FINKELSTEIN, K. Morphological variations and sediment transport in crenulate-bay beaches, Kodiak Island, Alaska. **Marine Geology**, v. 47, n. 3-4, p. 261–281, 1982.
- GAINZA, J., GONZALEZ, E.M.; MEDINA, R. A process based shape equation for a static equilibrium beach planform. **Coastal Engineering**, v. 136, p. 119–129, 2018.
- GONZÁLEZ, M.; MEDINA, R. On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. **Coastal Engineering**, v. 43, p. 209–225, 2001.
- GONZÁLEZ, M.; MEDINA, R.; GONZALEZ-ONDINA, J.; OSORIO, A.; MÉNDEZ, F.J.; GARCIA, E. An Integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. **Computer & Geosciences**, v. 33, p. 916–931, 2007.
- GONZALEZ, M.; GUTIÉRREZ, O. Q.; CANOVAS, V.; KAKEH, N.; MEDINA, R.; ESPEJO, A.; MENDEZ, F.; ABASCAL, A.; CASTANEDO, S.; MARTINEZ, C.; KLEIN, A.; GOMES, P.; DALINGHAUS, C.; GONZALES, M.; ROGACHESKI, C.; BRELINGER, C. New coastal modeling system SMC-Brasil and its application to the erosional problem on the Massaguaçu Beach (Sao Paulo, Brazil). In: International Conference on Coastal 171 Engineering, 34. 2014, Seoul. **Anais...** Seoul: ICCE, 2014. p. 1–4.

HARLEY, M.; TURNER, I.; SHORT, A. New insights into embayed beach rotation: The importance of wave exposure and cross-shore processes. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 120, n. 8, p. 1470–1484, 2015.

HSU, J. R. C.; EVANS, C. Parabolic bay shapes and applications. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 87, p. 557–570, 1989.

HSU, J. R. C.; BENEDET, L.; KLEIN, A. H. F.; RAABE, A. L. A.; TSAI, C. P.; HSU, T. W. Appreciation of Static Bay Beach Concept for Coastal Management and Protection. **Journal of Coastal Research**, v. 24, n. 1, p. 198–215, 2008.

HSU, J. R.C.; YU, M. J.; LEE, F. C.; BENEDET, L. Static bay beach concept for scientists and engineers: A review. **Coastal Engineering**, v. 57, p. 76–91, 2010.

KLEIN, A. H. F.; FERREIRA, O.; DIAS, J. M. A.; TESSLER, M. G.; SILVEIRA, L. F.; BANEDET, L.; MENEZES, J. T.; ABREU, J. G. N. Morphodynamics of structurally controlled headland-bay beaches in southeastern Brasil: A review. **Coastal Engineering**, v. 57, p. 98–111, 2010.

KRUMBEIN, W. C. **Shore processes and beach characteristics**. Technical Memorandum, v. 3, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers. 1944. 35p. Relatório técnico.

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.; 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. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 18, n. 2, p. 85–102, 2018.

LONGUET-HIGGINS, M.; STEWART, R. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to ‘surf beats’. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 13, n. 4, p. 481–504, 1962.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Documento Temático – Ondas**. Brasília: MMA, 2018. 126p. Disponível em: <<https://smcbrasil.paginas.ufsc.br/files/2018/06/Documento-Tem%C3%A1tico-de-Ondas.pdf>>. Acesso em: 02 out. 2023

MORENO, L. J.; KRAUS, N. C. Equilibrium Shape Of Headland-Bay Beaches For Engineering Design. In: International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes, 99. 1999, Nova York. **Anais...** Nova York: ASCE, 1999, p. 860–875.

MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.. The Beaches of Rio de Janeiro. In: SHORT, A. D.; KLEIN, A. H. F. (Ed.). **Brazilian Beach Systems**. Berlim: Springer, 2016. p. 363–396.

PARENTE, C. E.; NOGUEIRA, I. C. M.; RIBEIRO, E. O. Climatologia de ondas. In: MARTINS, R. P.; GROSSMANN-MATHESON, G. S. (Eds.). **Meteorologia e Oceanografia**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2015. p. 55–96.

RADER, A. C. On the parabolic equation method for water-wave propagation. **Journal of Fluid Mechanics**, v.95, p. 159–176, 1979.

ROBINET, A.; CASTELLE, B.; IDIERA, D.; HARLEYD, M. D.; SPLINTERD, K. D. Controls of local geology and cross-shore/longshore processes on embayed beach shoreline variability. **Marine Geology**, v. 422, p. 106118, 2020.

RODRIGUEZ, T. K.; DOMINGUÉZ, J. M. L. Utilização do sistema de modelagem costeira (SMC-Brasil) no estudo da dinâmica do litoral do município de Aracaju-Sergipe. **Revista GeoNordeste**, n. 2, p. 95–116, 2017.

SILVESTER, R.; HO, S. -K. Use of Crenulate Shaped Bays to Stabilize Coasts. In: Coastal Engineering Proceedings, 13. 1972, Vancouver. **Anais...** Vancouver: ASCE, 1972, p 1347–1365.

SORENSEN, R. M. Coastal Zone Processes. In: SORENSEN, R. M. (Ed.). **Basic Coastal Engineering**. Boston: Springer, 2006. p. 247–286.

USACE. **Shore protection manual**. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, 1984.

VERA-CRUZ, D. Artificial Nourishment of Copacabana Beach. In: Coastal Engineering Proceedings, 13. 1972, Vancouver. **Anais...** Vancouver: ASCE, 1972, p 76.

YASSO, W. E. Plan geometry of headland-bay beaches. **Journal of Geology**, v.73, p. 702–714, 1965.

YU, M. J. M.; KLEIN, A. H. F.; HSU, J. R. C. Headland Control For Shore Protection and Coastal Management. In: KIM, Y. C. (Ed.). **Handbook of Coastal and Ocean Engineering**. Singapura: World Scientific Publishing Company, 2018. p. 1215–1242.