

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAOLA STEFANI DE ARAUJO

MODIFICAÇÕES MORFODINÂMICAS FRENTE À OBRA DE RECUPERAÇÃO DA
ORLA DE MATINHOS - PR

PONTAL DO PARANÁ

2023

PAOLA STEFANI DE ARAUJO

MODIFICAÇÕES MORFODINÂMICAS FRENTE À OBRA DE RECUPERAÇÃO DA
ORLA DE MATINHOS - PR

Trabalho de conclusão de curso apresentada
ao curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Paraná como requisito ao título de
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus

PONTAL DO PARANÁ

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DO CENTRO DE ESTUDOS DO MAR

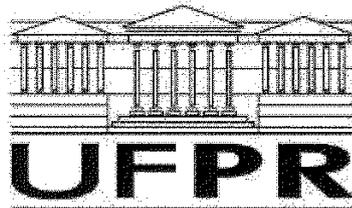
Araujo, Paola Stefani de
A663m Modificações morfodinâmicas frente à obra de recuperação da orla de Matinhos -
PR / Paola Stefani de Araujo. – Pontal do Paraná, 2023.
1 arquivo [78 f.] : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Paraná, Campus Pontal do
Paraná, Centro de Estudos do Mar, Curso de Engenharia Civil.

1. Morfodinâmica praial. 2. Hidrodinâmica praial. 3. Modelo numérico.
I. Kirinus, Eduardo de Paula. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 551.4



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

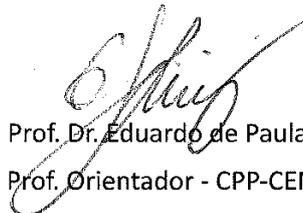
ATA DE REUNIÃO

TERMO DE APROVAÇÃO

Paola Stefani de Araujo

“MODIFICAÇÕES MORFODINÂMICAS FRENTE À OBRA DE RECUPERAÇÃO DA ORLA DE MATINHOS – PR”

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos membros:



Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus
Prof. Orientador - CPP-CEM/UFPR



Prof. Dr. Gustavo Pacheco Tomas
CPP-CEM/UFPR



Prof. Dr. Fernando Augusto Silveira Armani
CPP-CEM/UFPR

Pontal do Paraná, 27 de junho de 2023.

Dedicado a minha avó, Ruthe.

RESUMO

O avanço da urbanização vem provocando grandes transformações nas relações sociais e morfológica das áreas costeiras. O município de Matinhos é grande exemplo disso, frequentemente noticiando a invasão do mar, em maré alta, nas avenidas. Procurando reverter ou mitigar esta situação, em 2021 foi aberto o processo de licitação para gerenciamento da revitalização da orla. Uma obra, como a prevista, traz inúmeras modificações morfodinâmicas a praia, com custo elevado e de cronograma prolongado. Para observar os efeitos causados pela revitalização, é indispensável o desenvolvimento de estudos que analisem as características hidrodinâmicas e morfológicas da área de estudo.

O presente trabalho tem como objetivo modelar as feições praias em dois cenários, um antecedente e um posterior as obras construídas, a fim de simular e prever o ambiente, tendo como resultados parâmetros da área costeira que possibilitará a discretização dos efeitos causados pela obra. Para isto, a ferramenta utilizada para o desenvolvimento deste projeto foi o modelo numérico TELEMAC, que conta com os modelos TELEMAC-3D, utilizado para modelagens hidrodinâmicas e SYSIPHE, utilizado para modelagens morfodinâmicas. Ao final, poderá ser apontado se as diferenças dos efeitos entre os cenários e os impactos causados pela implementação das obras costeiras.

Palavras-chaves: Morfodinâmica praial; Hidrodinâmica praial; Modelo numérico;

ABSTRACT

The progress of urbanization has provoked great transformations in the social and morphological relations of coastal areas. The municipality of Matinhos is a great example of this, often reporting the invasion of the sea, at high tide, on the avenues. Seeking to reverse or mitigate this situation, in 2021 the bidding process for managing the revitalization of the rim was opened. A work, like the one planned, brings enumerated morphodynamic modifications to the beach, with high cost and long schedule. To observe the effects of revitalisation, the development of studies analysing the hydrodynamic and morphological characteristics of the study area.

The present work aims to model the beaches in two scenarios, a background and a later the constructed works, to simulate and predict the environment, having as results parameters of the coastal area that will allow the discretization of the effects caused by the work. To this end, the tool used for the development of this project was the TELEMAC numerical model, which has the TELEMAC-3D models, used for hydrodynamic modeling and SYSIPHE, used for morphodynamic modeling. In the end, it may be pointed out whether the differences in effects between scenarios and impacts caused by the implementation of coastal works.

Key-words: Coastal morphodynamics; Coastal hydrodynamics; Numerical model;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1	– Fluxograma de artificialização do litoral.	16
FIGURA 2	– Imagem de satélite (Landsat 2019) representando o arco praial Matinhos, enfatizando a área estudado.	19
FIGURA 3	– Vista Panorâmica da Obra.	21
FIGURA 4	– Planta Referente aos Guias-Correntes Sul e Norte da Avenida Paraná.	22
FIGURA 5	– Planta de Corte da Seção Longitudinal dos Guias-Correntes da Avenida Paraná: a. Guia-Corrente Sul; b. Guia-Corrente Norte.	23
FIGURA 6	– Planta Referente ao Espigão da Praia Brava.	23
FIGURA 7	– Planta de Corte da Seção Longitudinal do Espigão da Praia Brava.	24
FIGURA 8	– Perfil tipo 1 do Engordamento da Praia entre os Guias-Correntes da Avenida Paraná até o espigão da Praia Brava.	24
FIGURA 9	– Imagens da malha com elementos numéricos da área de estudo	32
FIGURA 10	– Comparação das malhas, com nível em metros (m), antes a. e depois b. da revitalização enfatizando a área estuda entre o Morro do Boi e o Pico de Matinhos.	33
FIGURA 11	– Comparação das malhas, com o nível em metros (m), antes a. e depois b. da revitalização ressaltando a região que foi construída os guias correntes da Avenida Paraná.	34
FIGURA 12	– Comparação das malhas, com o nível em metros (m), antes a. e depois b. da revitalização ressaltando a região que foi construída o espigão da Praia Brava.	36
FIGURA 13	– Condições iniciais hidrodinâmicas para a camada superficial do módulo TELEMAC-3D . a. Temperatura (°C), b. Salinidade.	37
FIGURA 14	– Condições iniciais hidrodinâmicas para a camada superficial do módulo TELEMAC-3D . c. Intensidade da Velocidade ($m.s^{-1}$) e d. Nível da superfície (m).	38
FIGURA 15	– Acoplamento Morfodinâmico e Hidrodinâmico, apenas com as Correntes.	39
FIGURA 16	– Comparação das velocidades máxima da corrente, antes a. e depois b. da obra.	41
FIGURA 17	– Comparação das velocidades máxima da corrente antes a. e depois b. da obra. Destaque na região das guias correntes da Avenida Paraná. Os pontos pretos representam o valor de 0 (zero) m da batimetria.	42
FIGURA 18	– Comparação das velocidades máxima da corrente antes a. e depois b. da obra. Destaque na região do Pico de Matinhos onde está localizado atualmente o espigão da Praia Brava. Os pontos pretos representam o valor de 0 (zero) m da batimetria.	44
FIGURA 19	– Comparação das velocidades máximas de fundo antes a. e depois b. da obra. Destaque na região das guias correntes da Avenida Paraná. Os pontos pretos representam o valor de 0 (zero) m da batimetria.	46

FIGURA 20 – Comparação das velocidades de fundo antes a. e depois b. Destaque na região do Pico de Matinhos onde está localizado atualmente o espigão da Praia Brava. Os pontos pretos representam o valor de 0m da batimetria.	47
FIGURA 21 – Comparação das velocidades residuais antes a. e depois b. focando na região onde está localizado os guias correntes da Avenida Paraná.	49
FIGURA 22 – Comparação das velocidades residuais antes a. e depois b. Destaque na região do Pico de Matinhos onde está localizado atualmente o espigão da Praia Brava.	50
FIGURA 23 – Comparação das médias das tensões de atrito cisalhante com o fundo antes a. e depois b. da obra.	51
FIGURA 24 – Comparação das médias das tensões de atrito cisalhante com o fundo antes a. e depois b. da obra. Destaque na região das guias correntes da Avenida Paraná. Os pontos pretos representam o valor de 0m da batimetria.	52
FIGURA 25 – Comparação das médias das tensões de atrito cisalhante com o fundo antes a. e depois b. . Destaque na região do Pico de Matinhos onde está localizado atualmente o espigão da Praia Brava. Os pontos pretos representam o valor de 0m da batimetria.	53
FIGURA 26 – Comparação da evolução do fundo antes a. e depois b. da obra.	55
FIGURA 27 – Comparação da evolução do fundo antes a. e depois b. da obra. Destaque na região das guias correntes da Avenida Paraná. Os pontos pretos representam o valor de 0 (zero) m da batimetria.	56
FIGURA 28 – Comparação da evolução do fundo antes a. e depois b. . Destaque na região do Pico de Matinhos onde está localizado atualmente o espigão da Praia Brava. Os pontos pretos representam o valor de 0 (zero) m da batimetria.	57
FIGURA 29 – Localização dos pontos selecionados. a. Guias-corrente; b. Pico de Matinhos; c. Praias.	59
FIGURA 30 – Gráfico de comparação de velocidades superficiais referentes ao P1 a., P2 b. e P3 c., nas proximidades da guia-corrente da Avenida Paraná.	60
FIGURA 31 – Gráfico de comparação de velocidades superficiais referentes ao P4, no centro da praia entre as obras do guia-corrente e o espigão.	61
FIGURA 32 – Gráfico de comparação de velocidades superficiais referentes ao P5 a., P6 b. e P7 c., nas proximidades do espigão do Pico e Matinhos.	62
FIGURA 33 – Gráfico de comparação de velocidades superficiais referentes ao P8, na praia após o Pico de Matinhos.	63
FIGURA 34 – Imagem do município salientando pontos que sofrerão mais com a erosão.	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO	14
1.1.1	Objetivos Específicos	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3	MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1	ÁREA DE ESTUDOS	19
3.1.1	Caracterização da Área de Estudo	20
3.1.2	Projeto Executivo de Proteção da Orla	21
3.2	MODELOS NUMÉRICOS	24
3.2.1	Modelo Hidrodinâmico Telemac - 3D	24
3.2.1.1	Fricção com o fundo	25
3.2.1.2	Influência do vento	26
3.2.1.3	Força de Coriolis	26
3.2.1.4	Equação da massa específica da água	27
3.2.1.5	Modelo de turbulência $k-\epsilon$	27
3.2.1.6	Traçadores	28
3.2.2	Modelo Morfodinâmico - SISYPHE	28
3.2.2.1	Interações Fluido - Sedimento	29
3.2.2.2	Transporte de Sedimentos	29
3.2.2.3	Parâmetro de Shields	30
3.2.2.4	Carga de Material Transportada junto ao Fundo (<i>BE-DLOAD</i>)	30
3.2.2.5	Carga de Material Transportada junto ao Fundo (<i>BE-DLOAD</i>)	31
3.2.3	Malha Numérica	32
3.2.4	Condições de Contorno Inicial e Final	35
3.2.5	Acoplamento	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1	HIDRODINÂMICA	40
4.2	MORFODINÂMICA	48
4.3	SÉRIES TEMPORAIS	58
4.4	REGIÕES CRÍTICAS PARA EROSIÃO	61
5	CONCLUSÃO	64

	10
REFERÊNCIAS	66
ANEXOS	70
.1 PARAMETRIZAÇÃO	71
.1.1 TELEMAC3D	71
.1.2 SISYPHE	76

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma extensa faixa costeira com cerca de 8.600 km de comprimento. Essa linha de costa está sujeita a constantes mudanças devido à interação entre o continente e o mar, o que resulta em alterações no equilíbrio de sedimentos. Para compreender as a dinâmica das mudanças que ocorrem nas praias, é crucial conhecer aspectos geológicos e hidrodinâmicos locais, como a granulometria dos sedimentos e as variações das ondas (CALLIARI et al., 2003). No material geológico do litoral paranaense temos a composição fornecida pelos rios, mas o que predomina é a composição fornecida pelas restingas arenosas (ANGULO et al., 1982).

No transporte de sedimentos, considera o movimento tanto no fundo quanto em suspensão. No fundo, é determinado o transporte pela tensão de cisalhamento do fundo, onde a taxa de transporte é calculada em função do parâmetro de Shields. Já o transporte em suspensão, calculado através do cisalhamento na camada limite, devido a turbulência, sendo um produto da velocidade do fluido e da concentração de sedimentos (RIJN, 1998).

A erosão é um processo natural causado pelo desequilíbrio sedimentar em uma determinada região, resultando na perda de grãos de areia através do transporte dos sedimentos. Esse fenômeno pode ser agravado pela ocupação urbana das áreas costeiras, especialmente quando há construções próximas à berma (pós-praia), onde ecossistemas como as restingas são removidos para ampliar áreas de construção e pavimentação, contribuindo para a erosão (GOUVEIA SOUZA et al., 2008). Também é apontado, em alguns estudos, o déficit de sedimentos vindos de Santa Catarina, que apresenta praias cada vez mais erodidas (ABREU et al., 2011).

Há algumas décadas, a costa do estado do Paraná tem enfrentado esse problema, como é o caso do município de Matinhos. Isso resultou no recuo da linha de costa das praias Brava de Caiobá, Mansa e Flamingo/Riviera, enquanto houve um crescimento em Pontal do Sul. Na praia Brava, o problema chegou a um ponto crítico, com o mar invadindo a cidade durante ressacas, destruindo a calçada, com ondas de tormentas, devido à falta de barreiras de proteção. Mostrando como a discussão e estudo desta pauta se pendura por algumas décadas, segundo o artigo, realizado em 1982, sobre a viabilidade de controle de erosão nas praias de Caiobá e Guaratuba, há dois possíveis motivos ditados para a erosão da praia Brava. O primeiro sendo a construção de avenidas a beira-mar sobre a praia e vegetação local, não respeitando a configuração natural costeira. E o segundo, sendo associado aos baixios de areia relacionados a embocadura da Baía de Guaratuba, que causam a refração das ondas, que inicialmente, geradas por ventos a sudeste, tem sua direção alterada, fazendo

com que ondas atinjam frontalmente a praia, originando-se uma zona de divergência, erodindo a berma (ANGULO et al., 1982).

Para a recuperação da orla do município, foi realizado o engordamento da praia, processo que consiste em dragar areia de uma jazida submarina e depositar na orla. Além disso, serão construídas estruturas semirrígidas em locais estratégicos para preservar o acúmulo artificial de sedimentos e aumentar a deposição de areia na cidade (IAT, 2021). Sendo assim, espera-se que o problema da erosão tenha sido mitigado após a conclusão da obra, tornando de extrema relevância abordagens prognósticas dos resultados morfodinâmicos para monitoramento e a verificação das condições da dinâmica local.

Contudo, vale ressaltar que neste trabalho há certas limitações que não permitem a utilização dos resultados dispostos nesse como referência de mudança, como a batimetria não atualizada do local, falta de geração de modelos de elevação digital, simulações ao longo do período de transporte sedimentar e a influência das ondas no balanço sedimentar.

O município de Matinhos vem enfrentando fortes ressacas ao longo dos anos, as quais geram enormes prejuízos socioeconômicos, além da aceleração da erosão no local. Com o intuito de intervir na erosão e reverter a situação, foi proposto a alimentação artificial da praia, com um avanço na linha de praia a cerca de 100 metros ao longo de 5,75 km do continente, o engordamento sendo uma estrutura flexível e temporária, se faz necessário a construção de estruturas semirrígidas, como guias-correntes, espigões e *headland*, que serão implantadas ao longo da orla, sendo posicionados nos locais que mais sofrem com a ressaca (IAT, 2021).

Quando se observa a costa, por algumas semanas a meses, é possível perceber variações morfodinâmicas, ocorrência de eventos extremos, variação das estações do ano, ocasionadas por forçantes que dominam os padrões dinâmicos da costa brasileira como as ondas, marés, vento, correntes e por fim, a granulometria dos sedimentos. A erosão ocorre devido a dinâmica de cada praia, considerando a sua inclinação e direção ao mar, que influenciará no tipo de quebra de onda, tornando-a mais destrutiva quando a zona de arrebentação for mais inclinada. Dependendo do tipo de quebra, a variação de energia dissipada diretamente na praia pode ser maior, fazendo com que os sedimentos entrem em suspensão e serão conseqüentemente transportados pelas as ondas através da deriva litorânea potencializada por correntes longitudinais (ANGULO, 2000).

Em certas épocas, o efeito erosivo é intensificado, com o mar retirando a areia e pondo em risco construções próximas a ele, quando não há uma vegetação, como a restinga, que auxilia como barreira para evitar o mar adentrar a cidade (ANGULO, 2000). Em situações de problemas erosivos na costa, a solução pode ser a construção de obras

costeiras que protegem a LP (linha de praia) da quebra das ondas e evitando que ocorra o balanço sedimentar negativo, auxiliando no assoreamento do local, favorecendo a estabilização e propagação da berma (KLEIN et al., 2005).

Do ponto de vista econômico, as praias são áreas recreativas envoltas de atividades turísticas desenvolvendo o comércio local e lazer familiar. Além disso, os investimentos imobiliários podem migrar para uma região de melhor qualidade ambiental, gerando novos mercados turísticos. Muitas cidades têm sua economia baseada no turismo, como acontece no litoral paranaense, e com o aumento da urbanização dessas cidades costeiras, a utilização de obras de proteção e defesa expande (PAULA, 2015).

Considerado como um dos maiores engordamentos de praia da América Latina, Balneário Camboriú é um exemplo de obra costeira que teve a recuperação de orla, aumentando largura da berma, que anteriormente estava cada vez mais estrangulada pela urbanização, com seus arranha-céus, e o mar.

Alguns problemas foram o decisivos para projetar este engordamento (NOVAK et al., 2021), tais como:

- Superlotação de praia;
- Sombreamento;
- Processos erosivos;
- Variação na largura da praia;
- Engarrafamento no trânsito;

Como uma cidade turística, essa intervenção proporcionou maior qualidade socioeconômica e de recreação, além de ser restaurado a restinga em alguns pontos, fornecendo um habitat para fauna e flora local, também aumentando a proteção a cidade quanto a tempestades, e agindo sobre o balanço sedimentar, ampliando ainda mais a berma ou estabilizando a mesma (IAT, 2021). Como em Balneário Camboriú, a obra realizada em Matinhos visa os mesmos objetivos, pensando na melhoria socioeconômica e no lazer da cidade.

Dessa forma, o turismo possui papel principal como atividade econômica de maior impacto no litoral, principalmente em época de veraneio, sendo suma importância para a região, com grande aumento populacional registrado no verão. Além disso, os argumentos mais utilizados por, pelas autoridades, para defender a obra é uma série de benefícios incluindo o aumento do turismo, com isso, melhorando a economia local e a qualidade de vida da população nativa. Fora os problemas ambientais sofridos

pela ressaca, com a faixa de areia adicionada, não ocorrerá o avanço do mar na orla, diminuindo prejuízos do comércio local e de infraestrutura (IAT, 2021).

Sendo assim, visando estudar as alterações morfodinâmicas causadas pela realização desta obra, será aplicada modelagem numérica para avaliar as taxas de sedimentação nas praias Brava de Matinhos e adjacências. A partir das simulações geradas pelos modelos computacionais será possível diagnosticar as variações na morfodinâmica do litoral paranaense, alertando riscos, prejuízos e benefícios.

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é avaliar as alterações morfodinâmicas da implementação das obras de recuperação da orla de Matinhos.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Desenvolver de cenários numéricos que possuam as características atualizadas das alterações propostas;
- Avaliar modificações morfodinâmicas frente as diferentes forçantes hidrodinâmicas e morfodinâmicas;
- Identificar regiões de potencial risco erosivo e assoreamento expressivos frente a implementação das obras de recuperação de orla;
- Mapear alterações significativas nos padrões hidrodinâmicos e morfodinâmicos locais resultantes da obra.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Obras costeiras são construções que estão ligadas diretamente às necessidades das atividades humanas podendo ter diferentes funções específicas e serem agrupadas em duas principais categorias:

- Obras de defesas do litoral
- Obras de abrigo portuário

As obras de defesas são estruturas que atuam como proteção intervindo na erosão e na estabilização/ ampliação da linha costeira. Enquanto as obras de abrigo portuário compreendem a infraestrutura de proteção e acesso do porto (BRUUN, 2013; AIROLDI et al., 2005).

Segundo a Comissão Interministerial para os Recursos do Mar, (NORDSTROM et al., 2007):

[...] uma das melhores soluções de proteção costeira que se vem adotando internacionalmente é a recuperação das praias, com aumento do estoque de areia e restabelecimento do equilíbrio do ambiente praias, uma vez que diminui a energia das ondas de tempestade, bem como recupera o seu habitat com sua rica biodiversidade, que dependem de praias saudáveis.

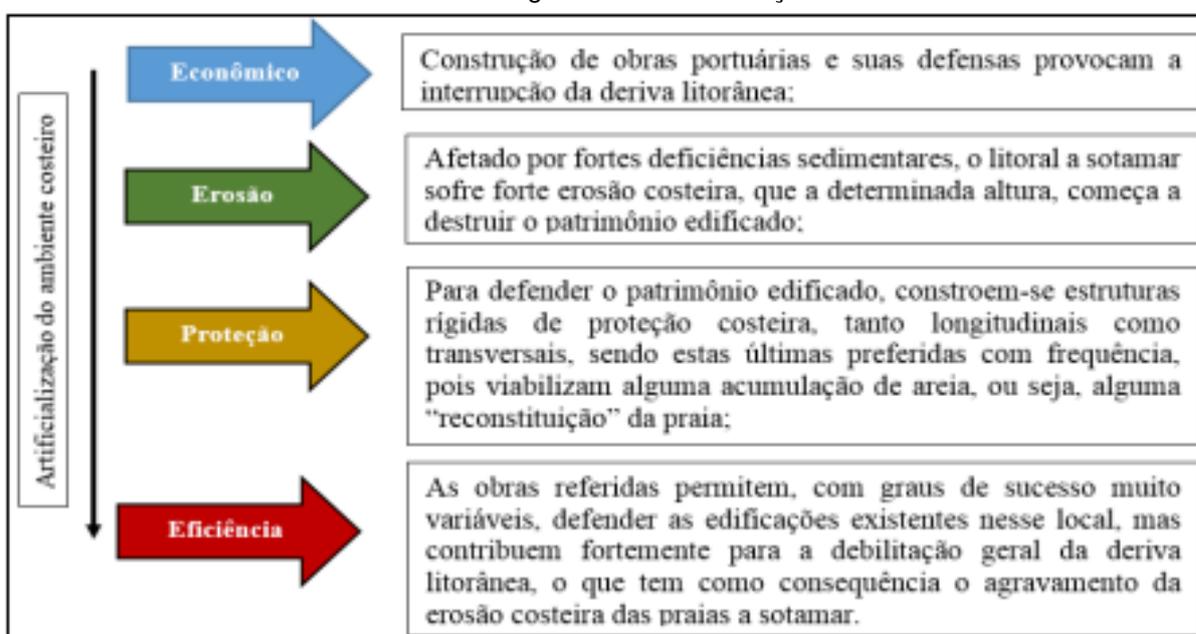
A avaliação dos impactos e as respostas dos ambientes a eles são de suma importância para a gestão e posição de políticas públicas que envolvem recuperação dos ambientes costeiros e adaptação das populações as novas condições. Um exemplo disso seria Portugal, que adotou a Estratégia Nacional para a Gestão Integrada da Zona Costeira (ENGIZC) para compor seguimentos de problemas ambientais, considerando o aumento do nível do mar, com um investimento de 196 milhões, realizado em obras costeiras entre 1995 e 2014 (GOMES, 2016).

Conforme a Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (2018) (CIRM, s.d.), foi criado um guia de diretrizes para prevenção à erosão costeira que relata a necessidade de definir o problema da região litorânea e estudar estratégias preventivas e mitigadoras de proteção e recuperação . Por esse guia apresentada alguns decretos e sugestões para evitar problemáticas como invasão do mar, um exemplo apresentado no guia é a ampliação máxima do recuo frontal da edificação para imóveis localizados nas vias adjacentes à orla marítima, já imposto pelo plano diretor. Também é exposto no guia,

a legislação municipal específica sobre parcelamento do solo com obrigatoriedade de implantação de parque adjacente à orla com, no mínimo, 150 m de largura (LOUREIRO FILHO, 2014).

É necessário a viabilização da artificialização da praia, visando as conveniências e necessidades (FIGURA 1), levando em consideração os impactos socioeconômicos e ambientais (PAULA, 2015). No fluxograma (Figura 1), desenvolvido por (COSTA, 2015), e pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), temos esta relação do problema com as intervenções propostas, expondo o efeito desejado deste tipo de construção e contrapondo com suas nocividades.

FIGURA 1 – Fluxograma de artificialização do litoral.



Fonte: IPEA, 2015.

Quando nos deparamos com um problema grave de erosão costeira, é necessário considerar medidas mais intrusivas que envolvem a modificação da dinâmica da praia. Isso pode incluir a implantação de obras de proteção, como espigões ou alimentação artificial de praia. Vale ressaltar que a alimentação artificial de praia é uma solução temporária e requer outras estruturas auxiliares para promover o assoreamento (KOERNER et al., 2013). A decisão de implementar essas obras está cada vez mais embasada em tecnologias de modelagem, que nos permitem recriar e simular o local afetado pela erosão, considerando condições adequadas de contorno. Dessa forma, podemos visualizar e avaliar os efeitos resultantes de obras costeiras, analisando a viabilidade da construção e o comportamento da região após a modificação.

Existem diferentes tipos de estruturas costeiras utilizadas para combater a erosão. Entre elas estão os paredões, quebra-mares, espigões, molhes, guia-correntes,

revestimentos e alimentações de praia (NETTO et al., 2017). Os paredões são estruturas verticais construídas paralelamente à linha de costa com o objetivo de protegê-las das ondas. Os quebra-mares são barreiras projetadas no mar para reduzir a energia das ondas antes que elas atinjam a costa. Os espigões são paredes construídas perpendicularmente à linha da costa, cuja finalidade é reduzir a velocidade do fluxo próximo a margens, evitando a erosão e, conseqüentemente, retendo areia na face oposta da obra, considerando que a face frontal seja a que é impactada pelas correntes (BRUUN, 2013).

Já os molhes são estruturas semelhantes aos espigões, porém são mais extensos e se estendem para dentro da água. Os revestimentos são estruturas inclinadas que absorvem a energia das ondas e protegem a linha costeira. Por fim, o engordamento de praia consiste na deposição de areia de granulometria semelhante à areia natural, visando aumentar a faixa de areia e alterar a inclinação da praia, o que reduz a energia das ondas ao atingirem a costa, protegendo-a (BRUUN, 2013).

Embora essas estruturas possam oferecer proteção, é importante estar ciente dos impactos negativos que podem gerar nos ecossistemas costeiros. Elas podem afetar as correntes naturais e causar erosão em áreas adjacentes, além de ter impactos na vida marinha. Ademais, quando mal planejadas e construídas, as estruturas acabam intensificando a erosão, prejudicando ainda mais a zona costeira (ANGULO, 2000). Portanto, é fundamental avaliar cuidadosamente as vantagens e desvantagens das estruturas costeiras antes de sua construção.

Com o avanço da tecnologia e aumento na capacidade de processamento nos últimos anos, a modelagem numérica desponta-se como uma ferramenta capaz de analisar o comportamento do oceano, embasando-se em equações e leis teóricas, para que seja possível simular e prever os processos ocorridos e gerados por ele, como por exemplo, a circulação marítima e o transporte de sedimentos. Dessa forma, a simulação torna-se um recurso inestimável, devido a capacidade de prever e observar fenômenos e situações com acurácia e precisão, sendo uma alternativa para analisar o movimento dos fluidos.

Integralizando na área estudada, devido ao seu estado modal, a praia de Matinhos é caracterizada por ser dinamicamente ativa e vem sendo área de estudos e fonte de modelagens para esmiuçar suas singularidades ao decorrer dos anos. Em 2019, foi publicado um estudo referente aos efeitos hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos do local, utilizando a modelagem numérica computacional para simular os processos físicos ocorridos no litoral paranaense durante o inverno de 2018. Os modelos *WAVEWATCH III* e *SWAN* foram utilizados para obtenção de resultados de onda, como o sistema de modelagem computacional tridimensional *MOHID* aplicado para simular o local e sua dinâmica, demonstrando a importância da utilização de

modelagem numérica na compreensão dos processos costeiros (MOREIRA, 2019).

Outro estudo realizado no litoral paranaense, utilizando como ferramenta para a modelagem numérica, o modelo TELEMAC-3D acoplado como modelo morfodinâmico SISYPHE, o mesmo utilizado neste presente trabalho. Publicado em 2021, o objetivo principal deste estudo foi avaliar cinco cenários com diferentes obras costeiras rígidas, a fim de determinar qual apresentava melhor eficácia ao reduzir os efeitos erosivos, avaliando as principais mudanças em cada cenário devido a formação geométrica de cada molhe (KIRINUS et al., 2021).

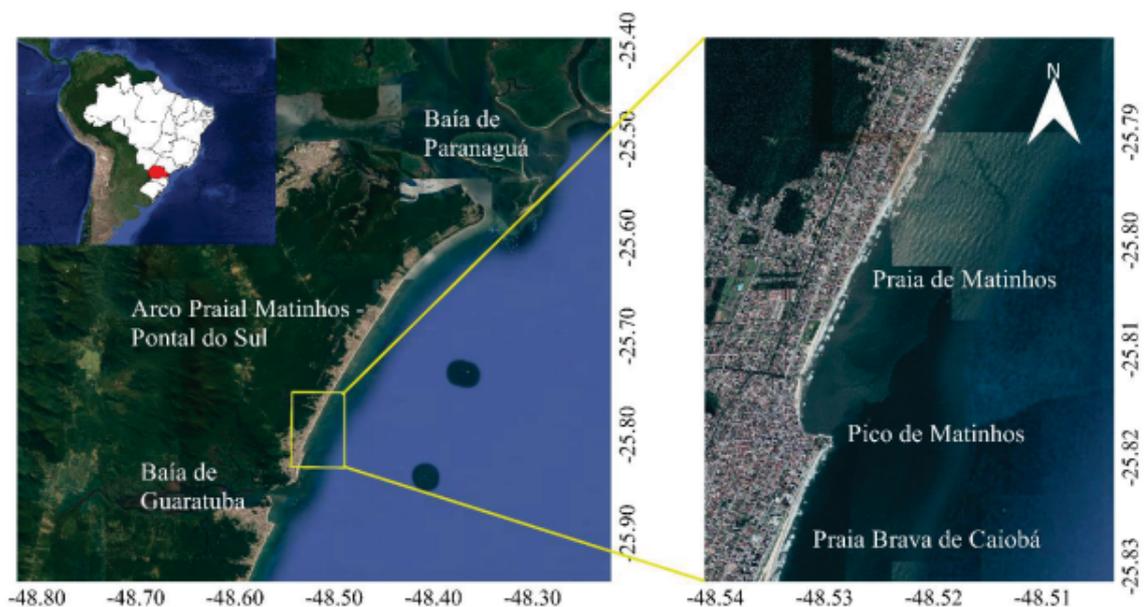
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho serão abordadas simulações numéricas considerando a situação atual e futura da orla de Matinhos. Para isso, será utilizado sistema numérico open TELEMAC-MASCARET, acionando os modelos hidrodinâmicos TELEMAC-3D e o morfodinâmico SISYPHE de forma acoplada.

3.1 ÁREA DE ESTUDOS

Este trabalho irá analisar a região do litoral paranaense, sul do Brasil, especialmente a orla da cidade de Matinhos ($25^{\circ} 49' 8''$ S e $48^{\circ} 32' 29''$ W), verificando os efeitos causados pela obra atual de engordamento da linha de praia e construção e obras semi-rígidas.

FIGURA 2 – Imagem de satélite (Landsat 2019) representando o arco praial Matinhos, enfatizando a área estudado.



Fonte: Landsat, 2019.

A região costeira do Paraná enfrenta desafios decorrentes de um planejamento inadequado e problemas técnicos. Nas últimas cinco décadas, tanto o litoral de Santa Catarina quanto o do Paraná têm sido impactados pela erosão causada por ressacas, que destroem a infraestrutura das praias, como calçadas, ruas e até mesmo residências. Além disso, a retirada de areia das praias durante as marés altas prejudica a qualidade e a segurança desses locais. Com o intuito de enfrentar essa situação, estão sendo construídas estruturas semirrígidas com o objetivo de proteger e aumentar o acúmulo de

sedimentos na área (IAT, 2021). No entanto, é importante ressaltar que o engordamento de praia não é uma solução permanente, e uma parte dos sedimentos adicionados será transportada pela corrente, o que impactará as taxas de mudança na linha costeira.

Neste estudo, será realizada uma análise da alteração do transporte sedimentar de fundo nas áreas diretamente e indiretamente afetadas pela orla, com foco no trecho entre o Morro do Boi e o Pico de Matinhos. Serão simulados dois cenários: um antes da implantação das obras de engordamento e outro após sua conclusão. O objetivo é observar as variações na morfodinâmica local.

Espera-se que essas mudanças resultem em alterações como o aumento da quantidade de sedimentos nas praias recuperadas, a captação de sedimentos a montante e a jusante das estruturas rígidas construídas, a redução da erosão nas praias, modificações na deriva litorânea e variações na altura das ondas em regiões específicas. Essas análises permitirão uma melhor compreensão dos efeitos das obras costeiras na região e contribuirão para a tomada de decisões adequadas no processo de gestão costeira.

Contudo, vale ressaltar que neste trabalho há certas limitações que não permitem a utilização dos resultados dispostos nesse como referência de mudança, como a batimetria não atualizada do local, pois para a construção da malha numérica foi utilizado informações geográficas de mapas (GOOGLE EARTH, 2023) e as medidas dispostas nos projetos iniciais (AQUAMODELO, 2021).

3.1.1 Caracterização da Área de Estudo

É de suma importância caracterizar dados climáticos e hidrodinâmicos médio da área de estudo.

A partir do Atlas Climático do Estado do Paraná, disponibilizado pelo Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná - IAPAR/EMATER, o Sistema Meteorológico do Paraná – SIMEPAR e do Instituto das Águas do Paraná. Sendo uma publicação das normais climatológicas de diversos elementos meteorológicos, utilizando banco de dados de estações meteorológicas e pluviométricas, que disponibiliza características climáticas do Paraná como a temperatura do ar. Utilizando uma base de dados georreferenciados, perfazendo uma série temporal de 40 anos, encontra-se que a temperatura do ar anual média fica em torno de 20,1 a 22,0°C (IAPAR, 2000). Por outro lado, temos a Diretoria de Hidrografia e Navegação, com uma infraestrutura de dados especiais marinhos, encontrando uma amplitude média de maré de 1,5 m (DHN, 2007). Visando dados hidrodinâmicos, encontra-se que o diâmetro médio dos sedimentos no litoral paranaense são areias de, aproximadamente, 0,2 a 0,3 mm (MARONE et al., 1995) e com correntes de deriva fluindo, majoritariamente, no sentido NE (NOERNBERG, 2001), enquanto isso, caracteriza-se as ondas com alturas significativas, predominantemente,

FIGURA 3 – Vista Panorâmica da Obra.



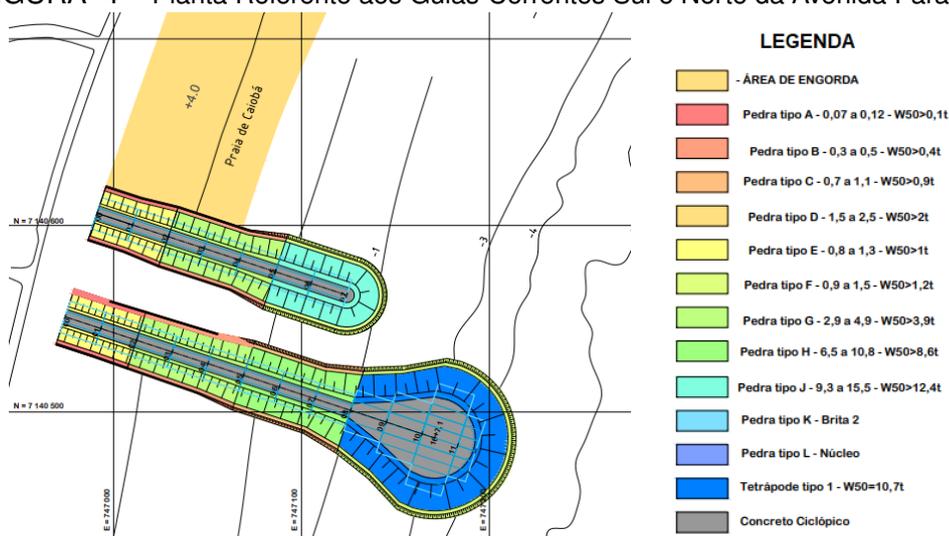
Fonte: Aquamodelo, 2021.

de 0,3 m a 0,8 m, em períodos de 0,5 a 0,9 segundos, com medidas máximas após tempestades, com principal direção de chegada S-SE e SE (MARONE et al., 1995).

3.1.2 Projeto Executivo de Proteção da Orla

A orla paranaense vem sofrendo um desequilíbrio entre o aporte e saída de sedimentos nos últimos anos, o que teria provocado um recuo da linha de costa das praias, este fenômeno estaria associado a alta urbanização e a falta de planejamento ao construir a cidade, sem respeitar os recuos necessários para área costeira, o deficit de sedimentos vindos de Santa Catarina (ABREU et al., 2011) e a influência da baía de Guaratuba, devido aos baixios, alterando a direção das ondas (ANGULO et al., 1982). A frente disso, buscou-se reverter a situação através da implementação da artificialização da área, como estruturas semirrígidas e engordamento praial (FIGURA 3).

FIGURA 4 – Planta Referente aos Guias-Correntes Sul e Norte da Avenida Paraná.



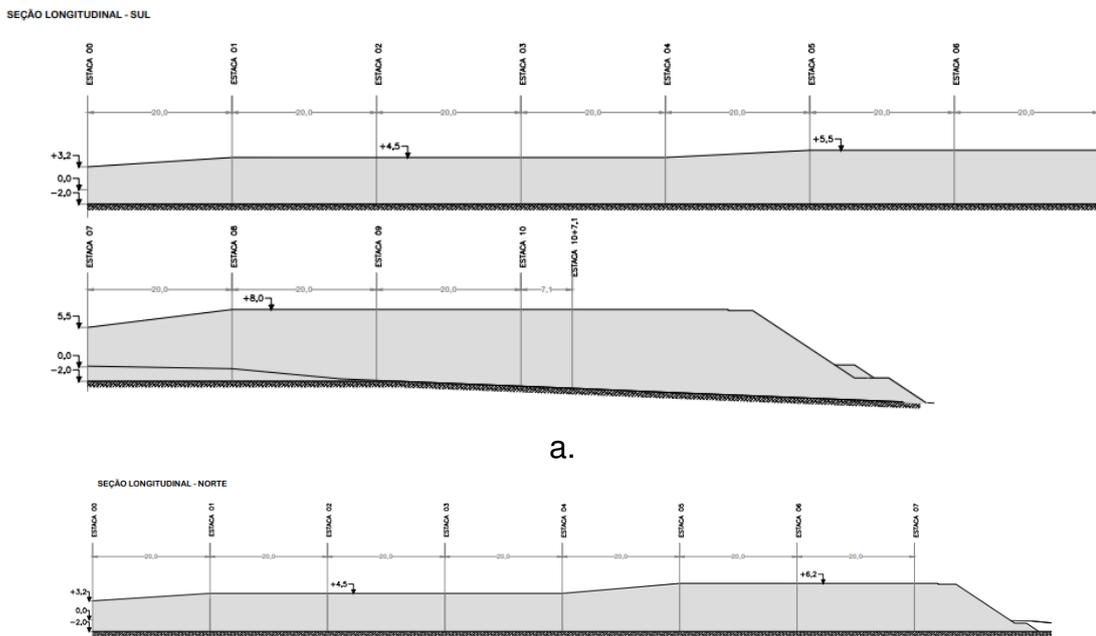
Fonte: Aquamodelo, 2021.

As estruturas semirrígidas propostas em projeto são guias-correntes a serem implantados no canal da Avenida Paraná, denominados como guia-corrente sul e guia-corrente norte, com objetivo de funcionar como uma barreira para as correntes deriva e diminuir o impacto da erosão na praia ao norte da estrutura. O guia-corrente sul apresenta 207 m de extensão no tronco e com um trecho final em forma de *headland*, com raio máximo de 43 m. O guia-corrente norte tem 161 m e é composto por um tronco de 140 m seguido do cabeço com raio de 21 m (FIGURA 4). As estruturas iniciam na mesma cota da avenida, 3,2 m, ditado pelo projeto, porém o guia-corrente sul tem sua altimetria máxima de 8,0 m, por outro lado, o guia-corrente norte, com altimetria máxima é de 6,2 m (FIGURA 5) (AQUAMODELO, 2021).

Também é proposto um pequeno espigão no trecho norte da praia Brava de Caiobá. Esta estrutura terá como objetivo principal manter a largura da praia citada, após o engordamento. Além disto, haverá uma proteção maior do calçadão. Esta estrutura apresenta 85 m de extensão no tronco e um cabeço com raio máximo de 25 m, com a cota inicial de 3,5 m, chegando em seu máximo de 5,85 m (FIGURAS 6 e 7) (AQUAMODELO, 2021).

Outrossim, o engordamento praiial é o segundo tipo de estrutura proposto para mitigar os problemas decorrentes de erosão. É previsto três tipos de perfis praiiais em toda Matinhos, com um volume total de $2.758.756 \text{ m}^3$, contudo, a área de estudo deste trabalho é focado na Praia de Caiobá, dessa forma, abrange apenas o perfil tipo 1, com uma avanço inicial de 100 m ao longo de 5,75 km de linha praia (FIGURA 8) (AQUAMODELO, 2021).

FIGURA 5 – Planta de Corte da Seção Longitudinal dos Guias-Correntes da Avenida Paraná: a. Guia-Corrente Sul; b. Guia-Corrente Norte.

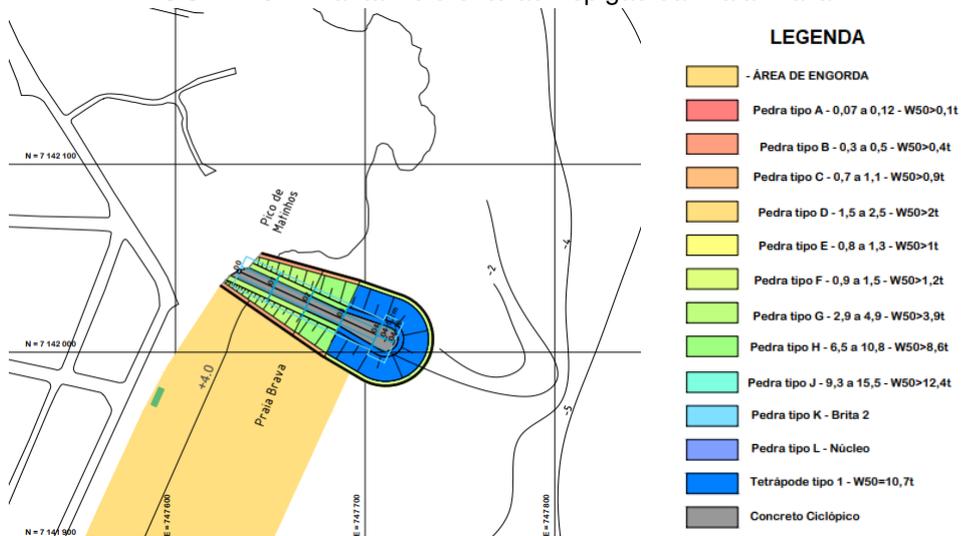


a.

b.

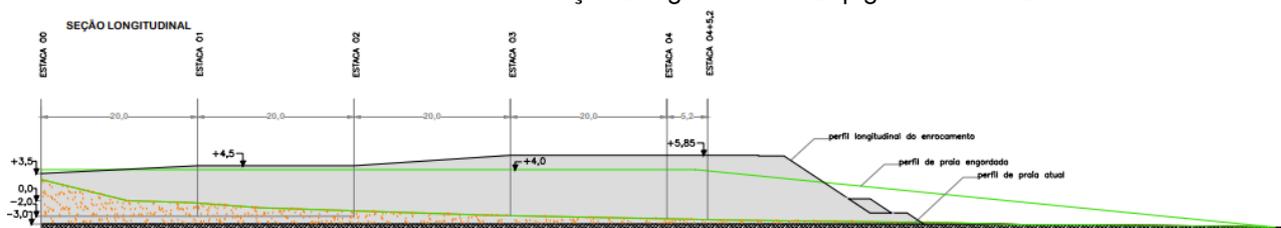
Fonte: Aquamodelo, 2021.

FIGURA 6 – Planta Referente ao Espigão da Praia Brava.



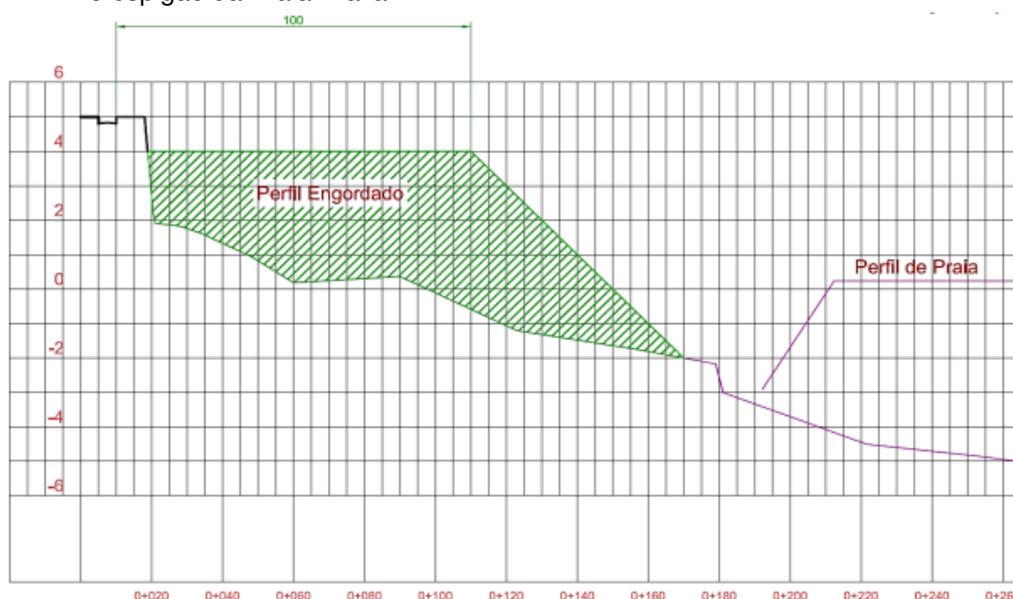
Fonte: Aquamodelo, 2021.

FIGURA 7 – Planta de Corte da Seção Longitudinal do Espigão da Praia Brava.



Fonte: Aquamodelo, 2021.

FIGURA 8 – Perfil tipo 1 do Engordamento da Praia entre os Guias-Correntes da Avenida Paraná até o espigão da Praia Brava.



Fonte: Aquamodelo, 2021.

3.2 MODELOS NUMÉRICOS

3.2.1 Modelo Hidrodinâmico Telemac - 3D

O modelo Telemac – 3D é utilizado para modelagens hidrodinâmicas em três dimensões, simulando a ação das correntes geradas pelos ventos e a energia transportada por elas que movimentam os sedimentos (HERVOUET, 2007). Este modelo utiliza o método de elementos finitos capaz de discretizar com grande detalhe a região costa, incluindo as obras costeiras projetadas.

Em cada ponto da malha numérica computacional será calculada a velocidade e quantidades transportadas, além da elevação da superfície livre resultante na camada superficial. Este modelo considera diversos efeitos na análise, resolvendo as equações de Navier-Stokes, utilizando das equações de advecção e difusão para solucionar

o sistema de equações como função do tempo . Adicionalmente, são consideradas as influências da temperatura e salinidade da água do mar, a influência da força de Coriolis, fricção com o fundo, descargas de rios, e a pressão atmosférica (HERVOUET, 2007).

Utilizando as aproximações hidrostáticas e de Boussinesq para resolver as formulações de Navier-Stokes, também discretiza o espaço, considerando a discretização vertical em coordenadas sigmas, respeitando as restrições de superfície e fundo (HERVOUET, 2007). As equações de continuidade (3.1), conservação da quantidade de movimento (Equações 3.2, 3.3, 3.4) e a pressão hidrostática (3.5) são a base para o equacionamento geral.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Equações da conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 (u) + F_x \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 (v) + F_y \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \nabla^2 (w) + F_z \quad (3.4)$$

Equação da pressão hidrostática:

$$p = p_{atm} + \rho_o(Z_s - z) + \rho_o g \int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_o} dz + pd \quad (3.5)$$

Nestas equações temos componentes de velocidade (u, v, w), tempo (t), aceleração da gravidade (g), profundidade em uma camada qualquer (z), coeficiente de viscosidade (ν), pressão (p) e pressão atmosférica (p_{atm}), massa específica média (ρ_o), variação da massa específica ($\Delta \rho$), elevação da superfície livre (Z_s), termos de fonte nas direções x, y e z (F_x, F_y e F_z) e os operadores laplacianos no plano das coordenadas cartesianas [$\nabla^2(u), \nabla^2(v)$ e $\nabla^2(w)$].

3.2.1.1 Fricção com o fundo

Com o conhecimento do comportamento fluxo no fundo, nos deparamos com a tensão de cisalhamento ($\vec{\tau}_b$) que se relaciona com a velocidade de corrente (\vec{U}), considerando a velocidade absoluta do fluido, resultando em um vetor normal descrito pela equação 3.6. A equação 3.7 que descreve a tensão de cisalhamento, baseado na

velocidade próxima ao fundo (HERVOUET, 2007). Assim, equacionando as equações 3.6 e 3.7 obtemos a relação presente na equação 3.8:

Equação da tensão de cisalhamento:

$$\vec{\tau} = -\vartheta \frac{\partial \vec{u}}{\partial \vec{n}} \quad (3.6)$$

Equação da tensão de cisalhamento em relação da velocidade da corrente próxima ao fundo:

$$\vec{\tau} = -\frac{1}{2} \rho C_f \sqrt{u^2 + v^2} \vec{u} \quad (3.7)$$

$$\nu \frac{\partial \vec{u}}{\partial \vec{n}} = \frac{1}{2} C_f \sqrt{u^2 + v^2} \vec{u} \quad (3.8)$$

Onde n = Coeficiente de viscosidade cinemática ($m^2.s^{-2}$) e ϑ é a viscosidade dinâmica absoluta do fluido ($N.s.m^{-2}$).

Frequentemente, os modelos de turbulência fornecem a expressão para o cisalhamento de velocidade ou o coeficiente de arrasto. Assim, existe uma série de fórmulas para a estimativa do coeficiente de arrasto que podem ser usadas pelo modelo TELEMAC - 3D, dentre elas, a fórmula de Manning foi utilizada, onde, C_f é o coeficiente de Manning e h é a profundidade da coluna da água (HERVOUET, 2007), mostrada abaixo: Equação do Coeficiente de Manning:

$$C_f = \frac{2gm^2}{h^{1/3}} \quad (3.9)$$

3.2.1.2 Influência do vento

A influência do vento é um fenômeno dependente da rugosidade da superfície livre, da intensidade do vento e da distância na qual a observação é feita a partir da superfície livre do mar (KIRINUS, 2017). Sendo considerado um modelo numérico de condição bidimensional, a tensão cisalhante superficial causada pelo vento é descrita pela equação 3.10:

$$\nu \frac{\partial \vec{u}}{\partial \vec{n}} = \frac{\rho_{ar}}{\rho} a_{vento} \vec{X} \cdot |\vec{X}| \quad (3.10)$$

De forma que, a massa específica do ar é definida como $\rho_{ar} = 1,29 kg.m^{-3}$, \vec{u} representa a velocidade horizontal na superfície livre do fluido e \vec{X} representa a intensidade do vento 10 metros acima do nível do mar.

3.2.1.3 Força de Coriolis

A força de Coriolis é considerada devido ao movimento de rotação da Terra envolta do seu próprio eixo e pelo fato da Terra ser um referencial não inercial . A

aceleração de Coriolis é dada por: Equações da aceleração de Coriolis em u e v:

$$f_v = 2\omega v \sin \theta \quad (3.11)$$

$$-f_u = -2\omega u \sin \theta \quad (3.12)$$

Onde, $\omega = \frac{2\pi}{86164}$ representa a velocidade de rotação da Terra, o período representa um dia sideral (de rotação) terrestre (HERVOUET, 2007).

3.2.1.4 Equação da massa específica da água

A equação da massa específica da água desempenha um papel fundamental no fechamento do sistema de equações de Navier-Stokes para a modelagem dos fluidos em movimento, especialmente em aplicações relacionadas à hidrodinâmica costeira e oceânica. Essa equação (3.13) descreve a conservação da massa em um determinado volume de água, permitindo a quantificação das variações na densidade ao longo do tempo e do espaço. Ao incorporar a equação da massa específica da água ao conjunto de equações de Navier-Stokes, é possível obter uma descrição completa e precisa do comportamento dos fluidos, levando em consideração as interações entre velocidade, pressão e densidade. Equação da massa específica da água:

$$\rho = \rho_{ref}[(1 - T(T - T_{ref})^2 - 750S)10^{-6}] \quad (3.13)$$

onde, T_{ref} representa a temperatura de referência de 4 °C, enquanto ρ_{ref} é a massa específica de referência nesta temperatura quando a salinidade é igual a zero, resultando em $\rho_{ref} = 999,972(kg.m^{-3})$.

3.2.1.5 Modelo de turbulência k- ϵ

O modelo TELEMAC-3D trabalha com a turbulência vertical e horizontal quando, em simulações oceânicas, apresentam escoamentos turbulentos devido ao número de Reynolds elevado, dessa forma, o modelo trabalha estas turbulências verticais e horizontais com cálculos das velocidades e dos traçadores (HERVOUET, 2007). É aplicado um modelo que une a energia (k) e a dissipação (ϵ) da turbulência, conhecido como modelo k- ϵ . Abaixo temos o equacionamento deste modelo: Equações que descrevem o modelo k- ϵ :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} + w \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + G - \epsilon \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + w \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} [P + (1 + C_{3\epsilon}) G] C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.15)$$

onde $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ representa a energia cinética turbulenta do fluido, $\epsilon = v \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j}$ representa a dissipação da energia cinética turbulenta, $P = v_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ é o termo da produção de energia turbulenta, $G = -\frac{v_t}{Pr_t} \frac{g}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$ é o termo fonte devido a forças gravitacionais, sendo Pr_t o número de Prandtl e v_T verifica a igualdade: $v_T = C_\eta \frac{k^2}{\epsilon}$. Os valores: $C_\eta, Pr_t, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ são constantes do modelo $k - \epsilon$.

3.2.1.6 Traçadores

Um escalar é definido como uma propriedade ou substância/partícula contida na água, podendo ter interação direta com processos hidrodinâmicos ou não. Escalares também estão relacionados com processos advectivos (controlado pelas correntes e ações dos ventos) e difusivos (processos turbulentos como fontes e sumidouros), sendo estes importantes para sua evolução temporal (HERVOUET, 2007). O equacionamento a seguir demonstra e controla o transporte desses traçadores: Equação do transporte de traçadores:

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \text{div}(\rho C \vec{U}) + q = F_{\text{fonte}} \quad (3.16)$$

onde, C representa a concentração de um traçador arbitrário que pode ser a salinidade, a temperatura ou quaisquer das propriedades citadas acima. F_{fonte} representa a taxa de criação do traçador e q o fluxo decorrente da difusão molecular ou turbulenta (HERVOUET, 2007).

A equação, na sua forma não conservativa, de advecção e difusão expressa abaixo, sabendo que v_c representa o coeficiente de difusão turbulenta associada ao traçador considerado: Equação de advecção e difusão:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \nabla C = \text{div}(v_c \nabla C) + F_{\text{fonte}} \quad (3.17)$$

3.2.2 Modelo Morfodinâmico - SISYPHE

O SISYPHE é um modelo de simulação que faz parte do sistema de modelagem numérica open TELEMAC-MASCARET, em função dos diversos fluxos e parâmetros do sedimento, calcula a carga de material transportada junto ao fundo. Aplicável para sedimentos não coesivos, sedimentos erosivos e misturas areia-lama (VILLARET et al., 2013). O transporte de sedimentos muda a inclinação da praia, alterando o tipo de quebra e para sedimentos coesivos, o efeito da consolidação do leito pode ser considerado (CALLIARI et al., 2003).

É condicionado ao modelo um número de camadas de sedimento no fundo, onde ocorrem as transferências de energia das correntes, gerando o transporte junto ao fundo. E assim iniciando a simulação, é possível analisar a movimentação dos grãos.

As taxas de transporte de sedimentos, divididas em carga de material transportada junto ao fundo (*bedload*) e material em suspensão (*suspended load*), são calculadas em cada ponto da malha como uma função. A carga de material transportada junto ao fundo (*bedload*) é calculada utilizando fórmulas clássicas de transporte de sedimentos, enquanto a carga em suspensão é determinada resolvendo uma equação de transporte adicional para a concentração de sedimentos em suspensão (HERVOUET, 2007). Entretanto, neste trabalho só foi utilizado o transporte pelo fundo.

Através das simulações hidrodinâmicas, é possível calcular a tensão de cisalhamento do leito decorrente das imposições de um coeficiente de atrito ou da rugosidade de fundo. O SISYPHE pode ser aplicado a uma grande variedade de condições hidrodinâmicas incluindo rios, estuários e aplicações costeiras, onde os efeitos de ondas sobrepostas a uma corrente de maré podem ser adicionados (VILLARET et al., 2013).

3.2.2.1 Interações Fluido - Sedimento

O tamanho de grão e a densidade dos sedimentos finos não coesivos com um diâmetro médio de grão $d_{50} > 60\mu m$ são parâmetros importantes para determinar sua resistência à erosão e as taxas de transporte sedimentar. Quando o modelo SISYPHE é acoplado ao TELEMAC - 3D, o coeficiente de arrasto com o fundo é alinhado à velocidade próxima ao fundo para permitir desvios por fluxos verticais, e a magnitude desse coeficiente está relacionada com a velocidade integrada na vertical (ENGELUND et al., 1967).

O equacionamento abaixo relaciona a transferência de energia das camadas superficiais até atingir a velocidade próxima ao fundo. Equação da velocidade próxima ao fundo

$$u(z_1) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) \quad (3.18)$$

onde u_* é a velocidade de fricção, z_0 é a distância vertical da borda limite, z_1 a distância mais próxima do fundo medida em coordenadas verticais e alinhada na direção oposta da aceleração da gravidade. A distância vertical está em função da rugosidade de fundo ($z_0 = \frac{k_s}{30}$), com a constante de Von Karman $k_s = 0,41$ sendo a altura da rugosidade do grão (KIRINUS, 2017).

3.2.2.2 Transporte de Sedimentos

O transporte de sedimentos no fundo pode ocorrer de diferentes formas, dependendo das características dos sedimentos e das condições hidrodinâmicas do ambiente. Sendo iniciado quando a corrente induz um atrito cisalhante ao fundo, causando processos de suspensão, em que partículas ficam flutuando na coluna d'água e transportadas pela energia correntes.

Além disso, pode ocorrer o transporte de sedimentos por arraste ou rolamento, que ocorre quando a energia hidrodinâmica é suficiente para mover partículas maiores ou em superfícies mais íngremes do fundo. Outro processo importante é o transporte de sedimentos é a saltação, em que partículas maiores se movem em saltos ou quicando sobre o fundo do oceano. O transporte de sedimentos no fundo do oceano é influenciado por uma série de fatores, incluindo a força das correntes, a topografia do fundo e a composição granulométrica dos sedimentos (ENGELUND et al., 1967).

A carga total sedimentar Q_t (3.20) inclui o transporte pelo fundo Q_b , na simulação não será contemplado o material em suspensão (Q_s), dessa forma, $Q_s = 0$: Equação da carga total sedimentar:

$$Q_t = Q_b + Q_s \quad (3.19)$$

3.2.2.3 Parâmetro de Shields

Sendo uma relação adimensional que descreve a condição de equilíbrio entre as forças de cisalhamento da água e as forças de resistência à erosão exercidas pelos sedimentos do fundo oceânico (CARNEIRO, 2009). O parâmetro de Shields é definido pela equação:

$$\Theta_c = \frac{\tau_c}{g(\rho_s - \rho)d_{50}} \quad (3.20)$$

Onde τ_c é a tensão de cisalhamento da água, ρ é a densidade da água, ρ_s é a densidade dos sedimentos, g é a aceleração da gravidade, d_{50} é o diâmetro médio do sedimento e $g(d_{50})$ é a gravidade específica do sedimento.

O Parâmetro de Shields é usado para prever a taxa de transporte de sedimentos em uma corrente de água e para determinar a probabilidade de ocorrência de erosão (CARNEIRO, 2009). Quando o valor do parâmetro de Shields é maior que um determinado limite crítico, a tendência é de que ocorra erosão do fundo. Caso contrário, quando o valor do parâmetro é menor que o limite crítico, a tendência é de que os sedimentos permaneçam depositados no fundo do oceano.

3.2.2.4 Carga de Material Transportada junto ao Fundo (*BEDLOAD*)

Através do equilíbrio do transporte de sedimentos, em função de vários fluxos e parâmetros sedimentares, é possível calcular a taxa de transporte, devido ao fato de que o movimento dos grãos ocorre no leito marinho e que essa camada adere rapidamente ao ritmo de qualquer energia adicionada naquele ambiente, tornando possível a condição de equilíbrio, dessa forma, assumindo que a variação de transporte corresponde a uma condição de saturação (NABI, 2010).

3.2.2.5 Carga de Material Transportada junto ao Fundo (*BEDLOAD*)

Evolução do fundo

O modelo de processos morfodinâmicos utiliza a equação de Exner (3.21) para calcular a evolução do fundo, evidenciando que a variação da espessura do sedimento de fundo pode derivar de um balanço de massa e por isso é válido para a condição de equilíbrio (NABI, 2010). Equação de Exner:

$$(1 - n) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + \nabla \cdot Q_b = 0 \quad (3.21)$$

onde, n é a porosidade do fundo não coesivo ($n \approx 0.4$ para sedimentos não coesivos), Z_f é a elevação do fundo do mar, e Q_b ($m^2 s^{-1}$) o transporte de volume sólido por unidade de comprimento.

Formulação para o transporte junto ao fundo

No SISYPHE, o usuário escolhe diferentes formulações disponíveis para calcular as taxas de transporte do fundo devido às diferentes particularidades de cada ambiente. Sendo assim, a taxa adimensional do transporte de areia induzido por correntes Φ_s é apresentada na equação (3.22), sendo, $\rho_r = \frac{\rho_s}{\rho}$ a densidade relativa:

$$\Phi_s = \frac{Q_b}{\sqrt{g(\rho_r - 1)d_{50}^3}} \quad (3.22)$$

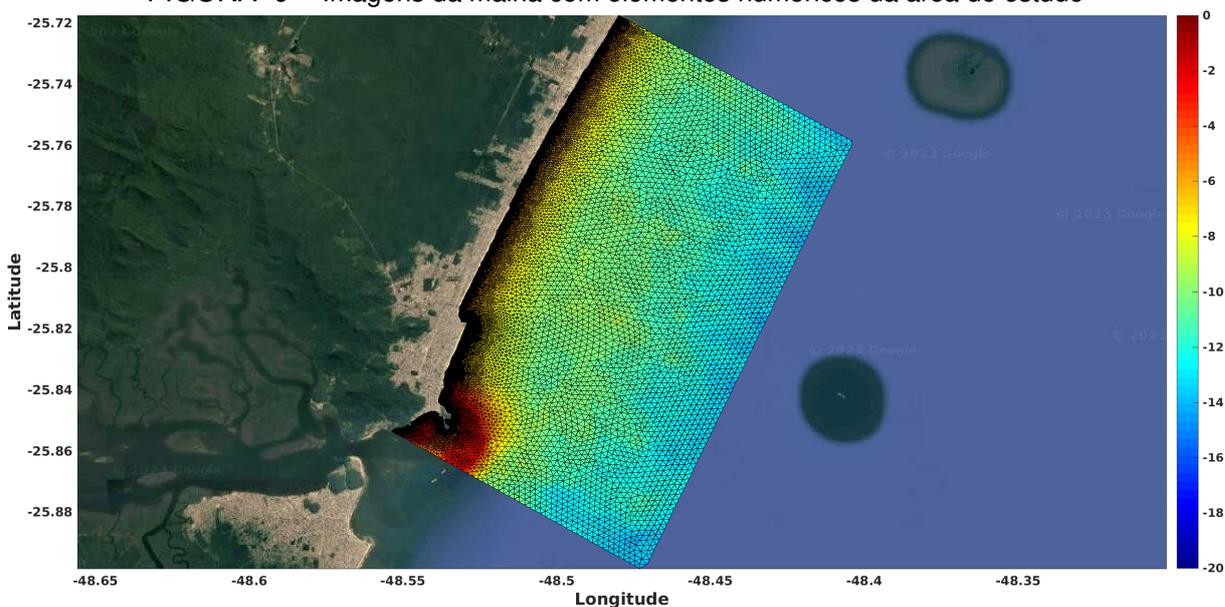
O fluxo exerce uma tensão no fundo e apenas uma parcela dessa tensão age sobre os grãos de sedimentos para produzir transporte, sendo esta porção chamada de tensão de fricção superficial τ_0 (*skin friction stress*, ou *grain stress*). A taxa adimensional do transporte de areia induzido por correntes Φ_s é, em geral, expressa como função tensão de fricção superficial não dimensional, ou parâmetro de Shields θ' (3.23), sendo, μ o fator de correção para a tensão de fricção superficial (CARNEIRO, 2009). Equação do parâmetro de Shields:

$$\theta' = \frac{\mu \tau_0}{g(\rho_r - \rho)d_{50}} \quad (3.23)$$

Planos de maré (*Tidal flats*)

Planos de maré são domínios computacionais onde a altura da água pode ser nulos na simulação, ocorrendo em lugares próximos a costas que sofrem grandes variações na elevação da superfície livre do mar. Neste estudo, está sendo aplicado como altura mínima para ser considerado zona de plano de maré igual a $0.001m$. Assim, quando a altimetria de um nó for inferior a este valor, será considerado como seco e sem variações morfodinâmicas durante a passagem do tempo (HERVOUET, 2007).

FIGURA 9 – Imagens da malha com elementos numéricos da área de estudo



Fonte: A autora, 2023.

3.2.3 Malha Numérica

A malha numérica computacional foi construída considerando um raio de $70km$ de Matinhos para a modelagem, focando nas obras entre o Pico de Matinhos e o Morro do Boi, englobando os guias correntes da Avenida Paraná, espigão da Praia Brava e a engorda neste trecho.

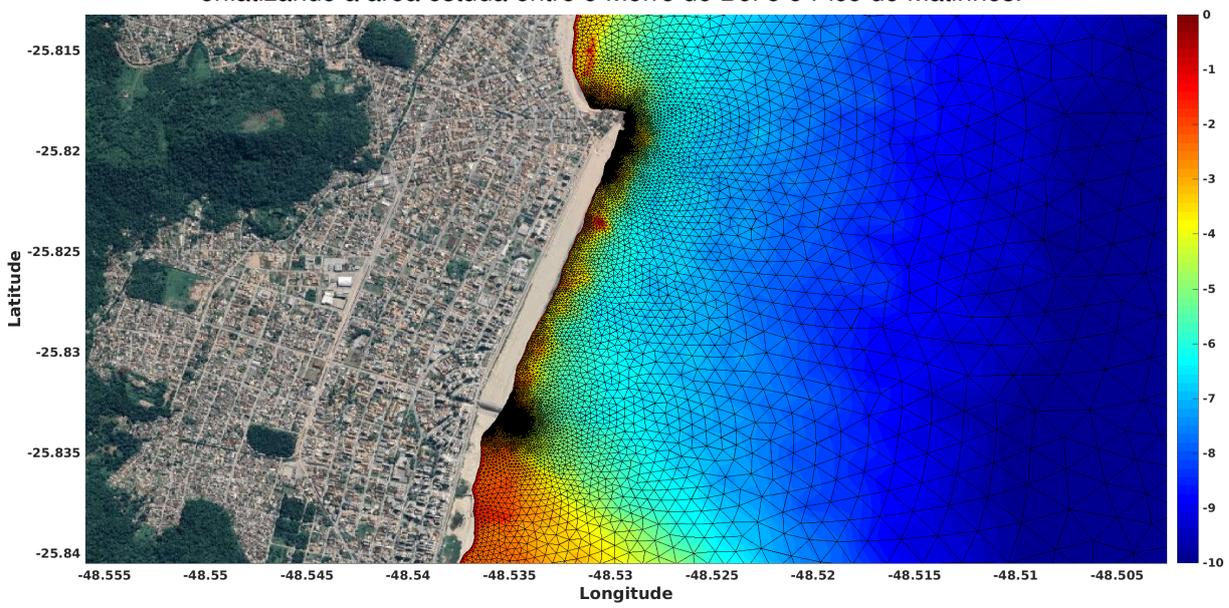
Dois cenários foram idealizados, o primeiro representando a linha de costa anterior ao início das obras, com a erosão predominante, com uma pequena faixa de areia em alguns lugares e nulas em outros, com o oceano cobrindo todo o perímetro. E o segundo cenário, agora contendo a engorda de praia e as obras semirrígidas. Seguindo as cotas dispostas nos projetos, com a faixa de areia variando de 3,5 a 4 metros, e com os guias correntes da Avenida Paraná e o espigão da Praia Brava, cada um seguindo sua própria altimetria.

Com a FIGURA 10 vemos com mais evidência a diferença de cotas entre as imagens, como já dito anteriormente, mesmo que o mapa seja igual, pois não foi possível utilizar uma imagem de satélite antes de 2022, esta parcela de areia mostrada já evidencia a engorda feita no local, neste caso, a primeira imagem se fosse condizente com a realidade de 2019, como mostra a FIGURA 2, a faixa de areia seria bem menor, dessa forma, o espaço que compreende a cota 0 (zero) m seria maior, quase perfilando a linha da avenida da cidade.

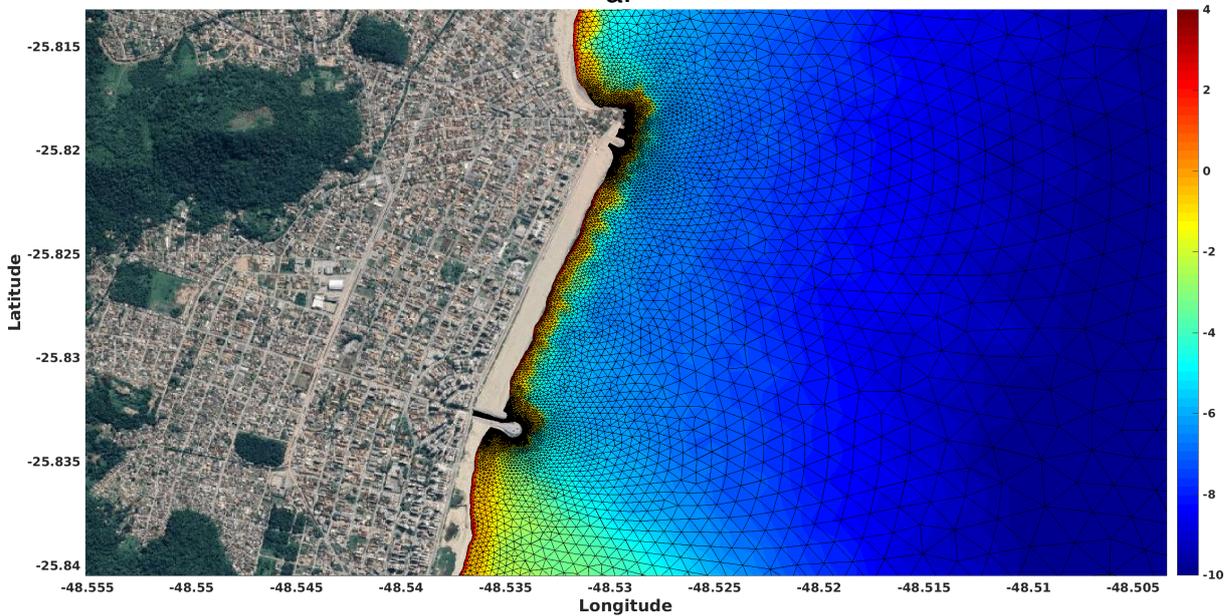
A seguir temos as comparações focando mais no local onde compreende cada obra semirrígida, em seu antes, 11 a., e depois, 11 b., da construção das mesmas.

E logo em seguida temos a comparação da região onde se encontra o pico de

FIGURA 10 – Comparação das malhas, com nível em metros (m), antes a. e depois b. da revitalização enfatizando a área estudada entre o Morro do Boi e o Pico de Matinhos.



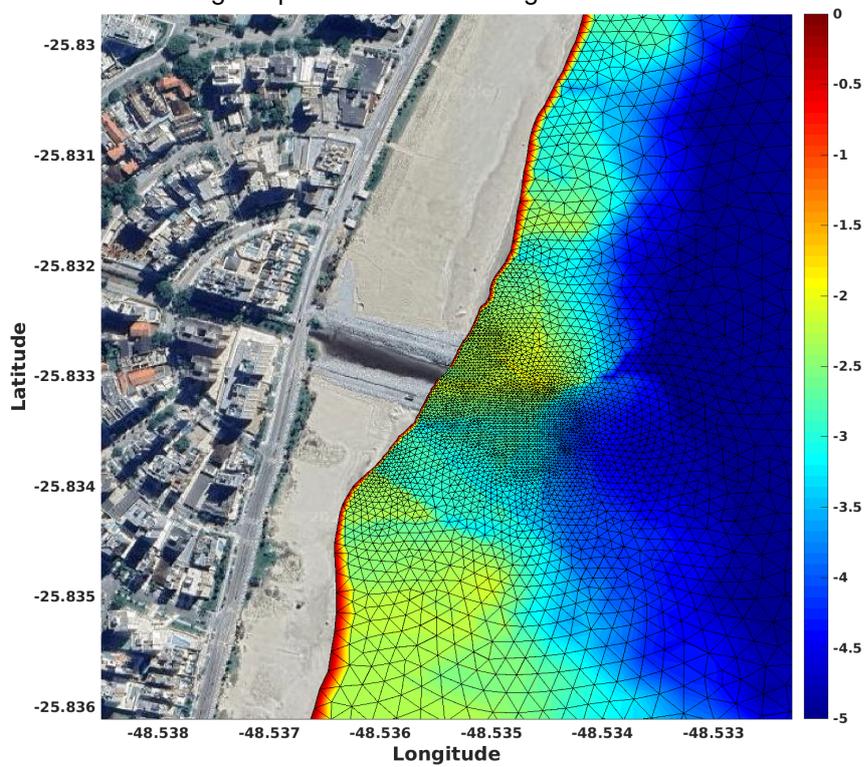
a.



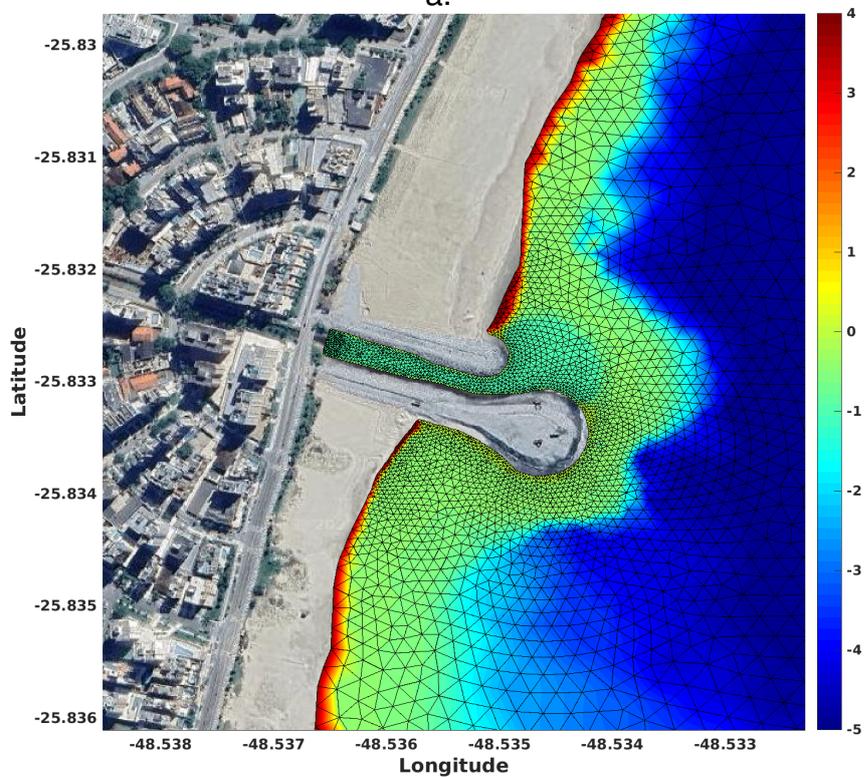
b.

Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 11 – Comparação das malhas, com o nível em metros (m), antes a. e depois b. da revitalização ressaltando a região que foi construída os guias correntes da Avenida Paraná.



a.



b.

Fonte: A autora, 2023.

Matinhos, que localiza o espigão Praia Brava, como mostra as figuras 12 a. e 12 b. .

3.2.4 Condições de Contorno Inicial e Final

As simulações serão feitas considerando os dois cenários (o antes e o após da revitalização da praia de Matinhos), será considerado como condições de contorno inicial as mesmas variáveis, no mesmo período e advindas dos mesmos bancos de dados para evitar efeitos adversos no resultado obtido. As simulações tiveram 192 dias de duração.

A partir do modelo HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*), foram obtidos os dados oceanográficos, representados pelas componentes da velocidade da corrente, salinidade e temperatura da água do mar, adicionadas como condição inicial e de contorno. A resolução espacial dos dados que estão sendo utilizados no trabalho é de 0,08 de latitude e longitude (aproximadamente 9km), com escala temporal é de 24 h (METZGER et al., 2006).

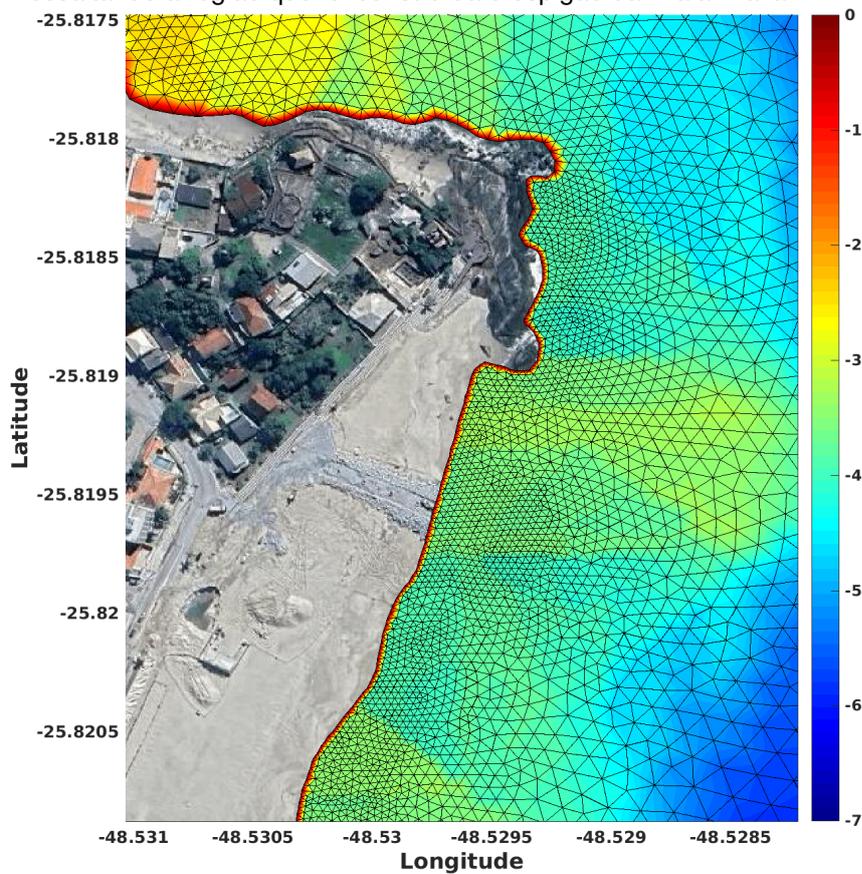
Os dados meteorológicos representam as condições superficiais, aplicadas durante todo o período simulado, utilizando o banco de dados do ERA-5 do ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), representados por velocidade de vento, temperatura do ar e pressão atmosférica. A resolução espacial dos dados utilizados no trabalho é de 0,125 (aproximadamente 14km), com escala temporal de 6 h.

Desta forma, os resultados obtidos formam um conjunto de condições de contorno anuais com dados médios diários (HYCOM) e médias de 6 h em 6 h (ERA5). Com o uso deste banco de dados, é possível reproduzir os principais ciclos de variabilidade sazonal da região de estudo. A partir destes conjuntos de dados, foram construídas condições iniciais e de contorno para as variáveis utilizadas como forçantes do modelo numérico nos dois cenários desenvolvidos. No canal da Avenida Paraná foi adicionado uma vazão constante de $1\text{m}^3/\text{s}$.

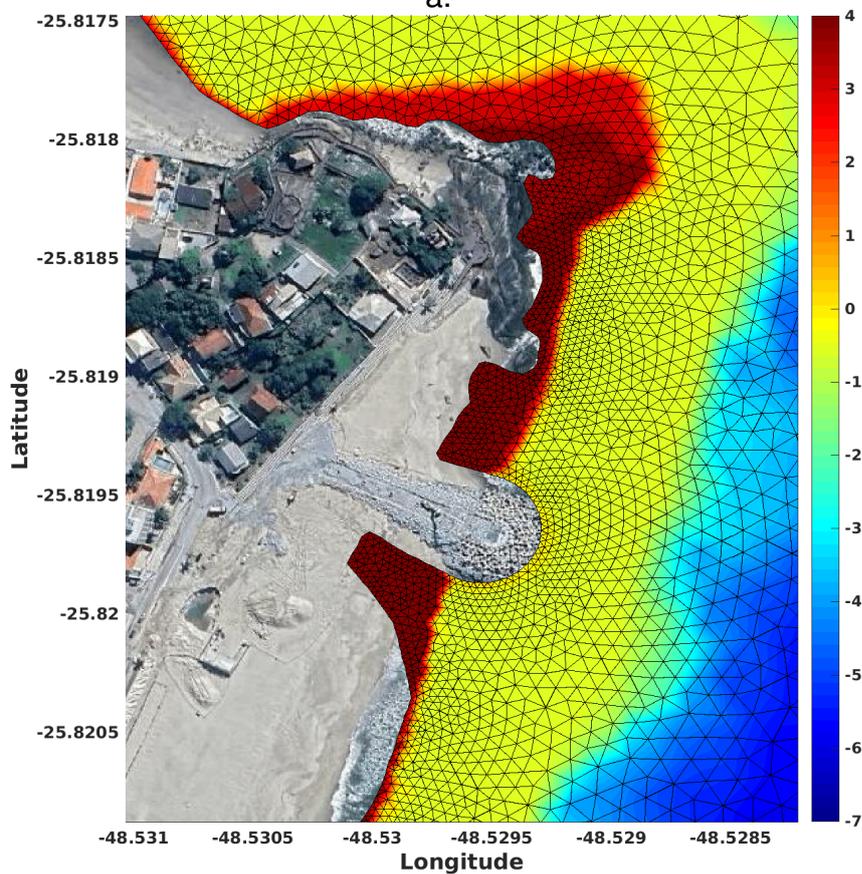
3.2.5 Acoplamento

A FIGURA 15 mostra como funciona o acoplamento dos modelos para simulação. Basicamente, com as condições de contorno iniciais, é iniciado o modelo hidrodinâmico, com velocidade e fundo iniciais, imediatamente, analisando o transporte de sedimento gerado a partir dessas informações, que irá alterar o fundo, gerando uma evolução do fundo, *bed evolution*, tudo isso em apenas um tempo de atualização, *update in time*. A partir disso, esses dados novos obtidos serão, novamente, introduzido no modelo hidrodinâmico e repetir todo o processo, continuamente, até o final da simulação.

FIGURA 12 – Comparação das malhas, com o nível em metros (m), antes a. e depois b. da revitalização ressaltando a região que foi construída o espigão da Praia Brava.



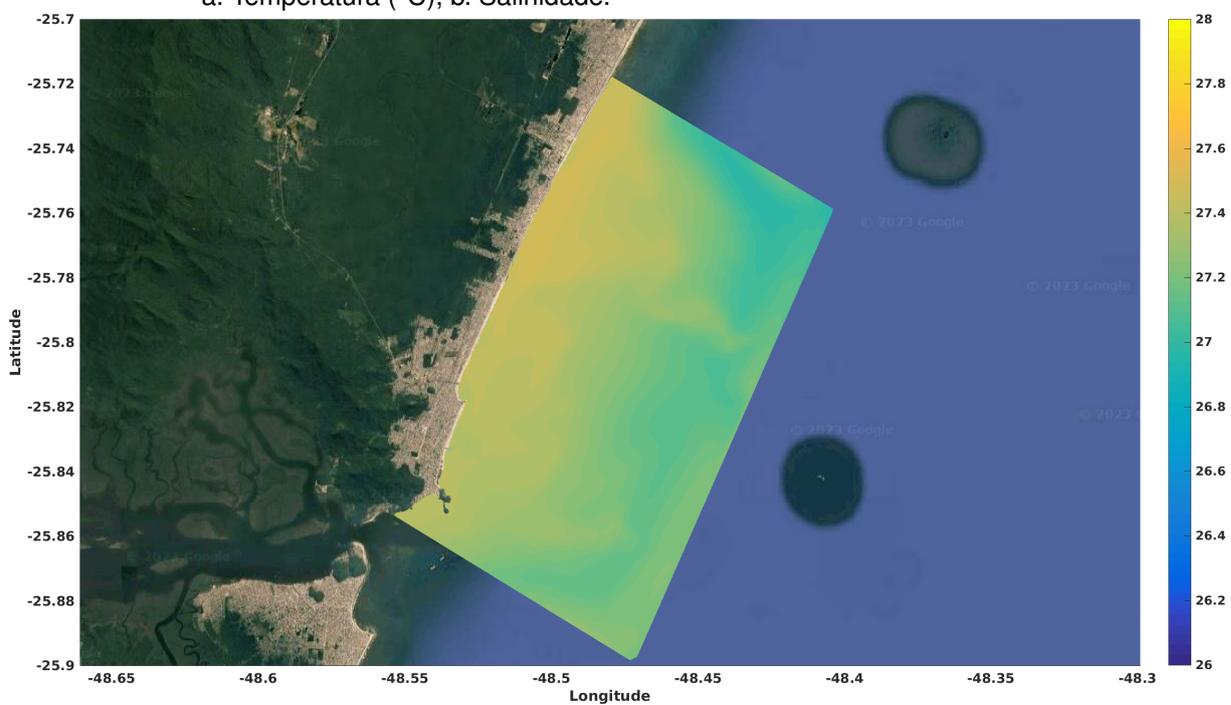
a.



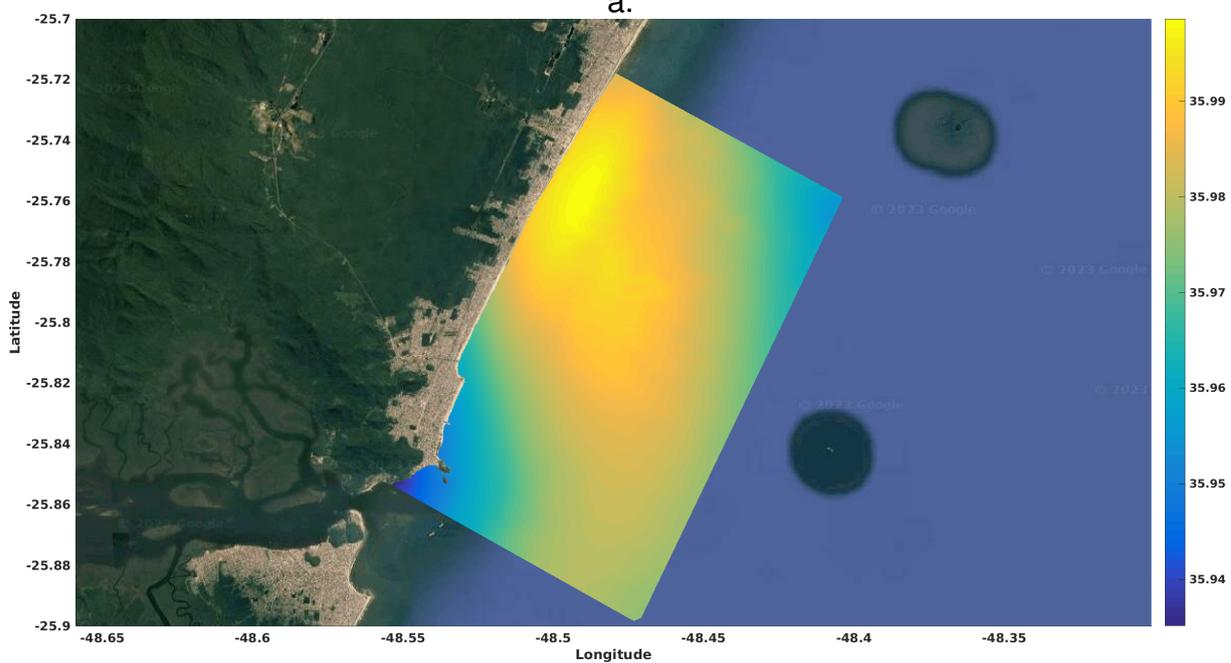
b.

Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 13 – Condições iniciais hidrodinâmicas para a camada superficial do módulo TELEMAC-3D .
a. Temperatura (°C), b. Salinidade.



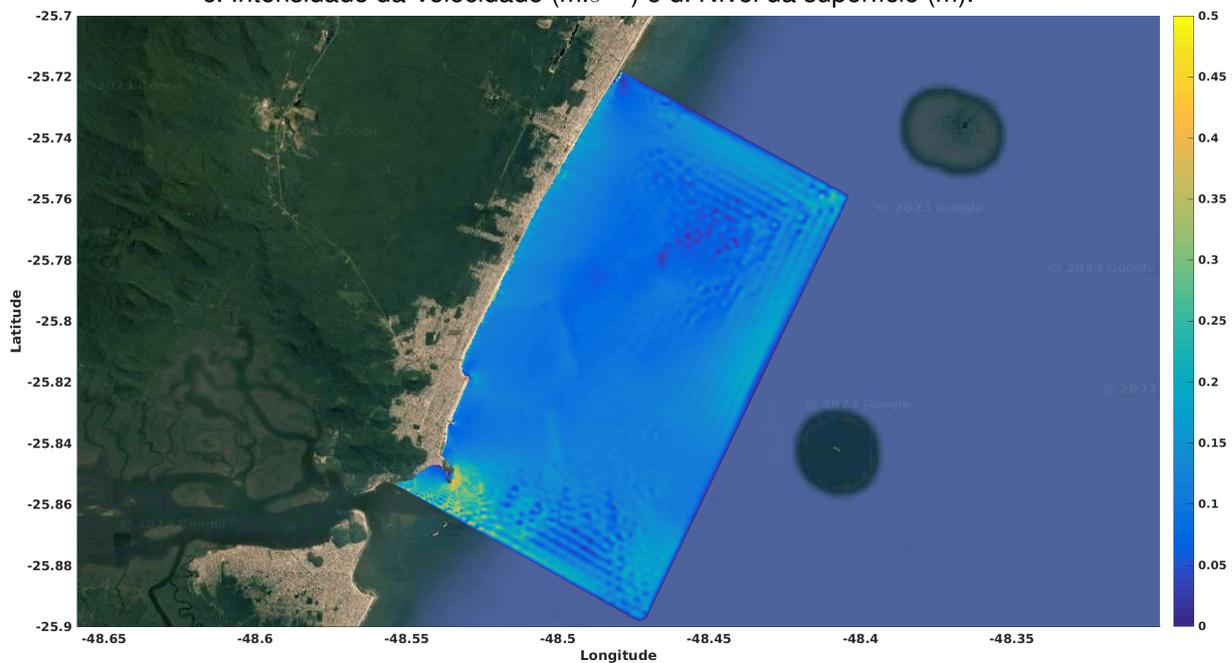
a.



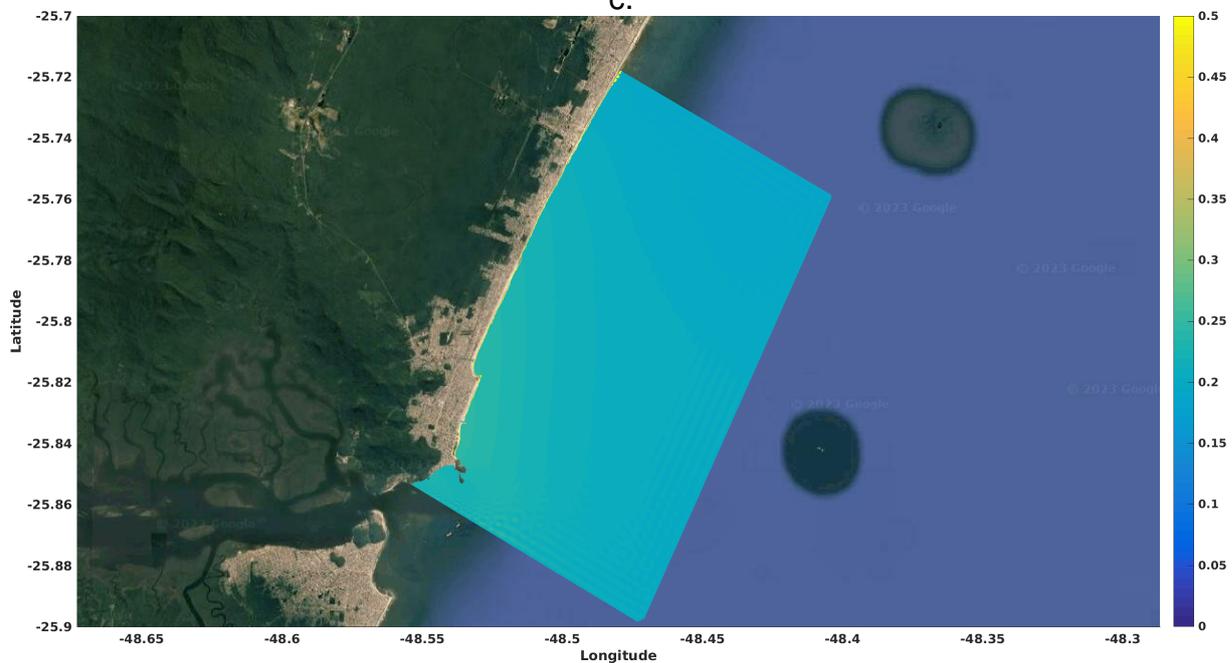
b.

Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 14 – Condições iniciais hidrodinâmicas para a camada superficial do módulo TELEMAC-3D .
c. Intensidade da Velocidade ($m.s^{-1}$) e d. Nível da superfície (m).



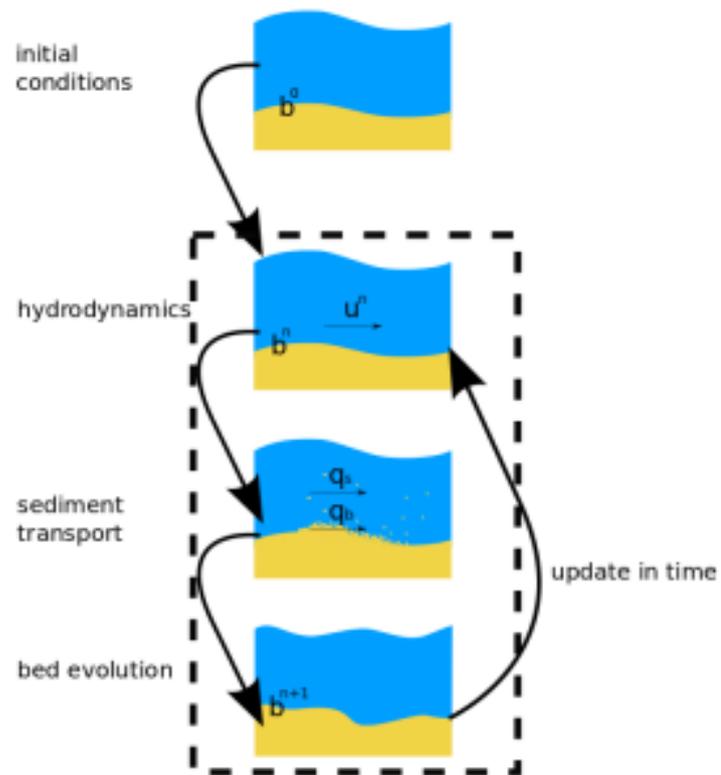
C.



d.

Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 15 – Acoplamento Morfodinâmico e Hidrodinâmico, apenas com as Correntes.



Fonte: Manual Sisyphe. Pablo Tassi. 2023.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das simulações será apresentado a seguir referente á dois cenários: o primeiro sendo da praia de Matinhos, do trecho entre o Morro do Boi ao de Pico de Matinhos, antes da revitalização da orla, e o segundo cenário consta com o acréscimo das obras realizadas, sendo elas os guias-correntes da Avenida Paraná, o espigão da Praia Brava e a engorda da praia que acompanha todo este trecho.

Os resultados de alguns parâmetros da área costeira possibilitará a visualização de possíveis pontos críticos nesta região, inicialmente de forma geral e posteriormente com detalhe em cada obra costeira.

4.1 HIDRODINÂMICA

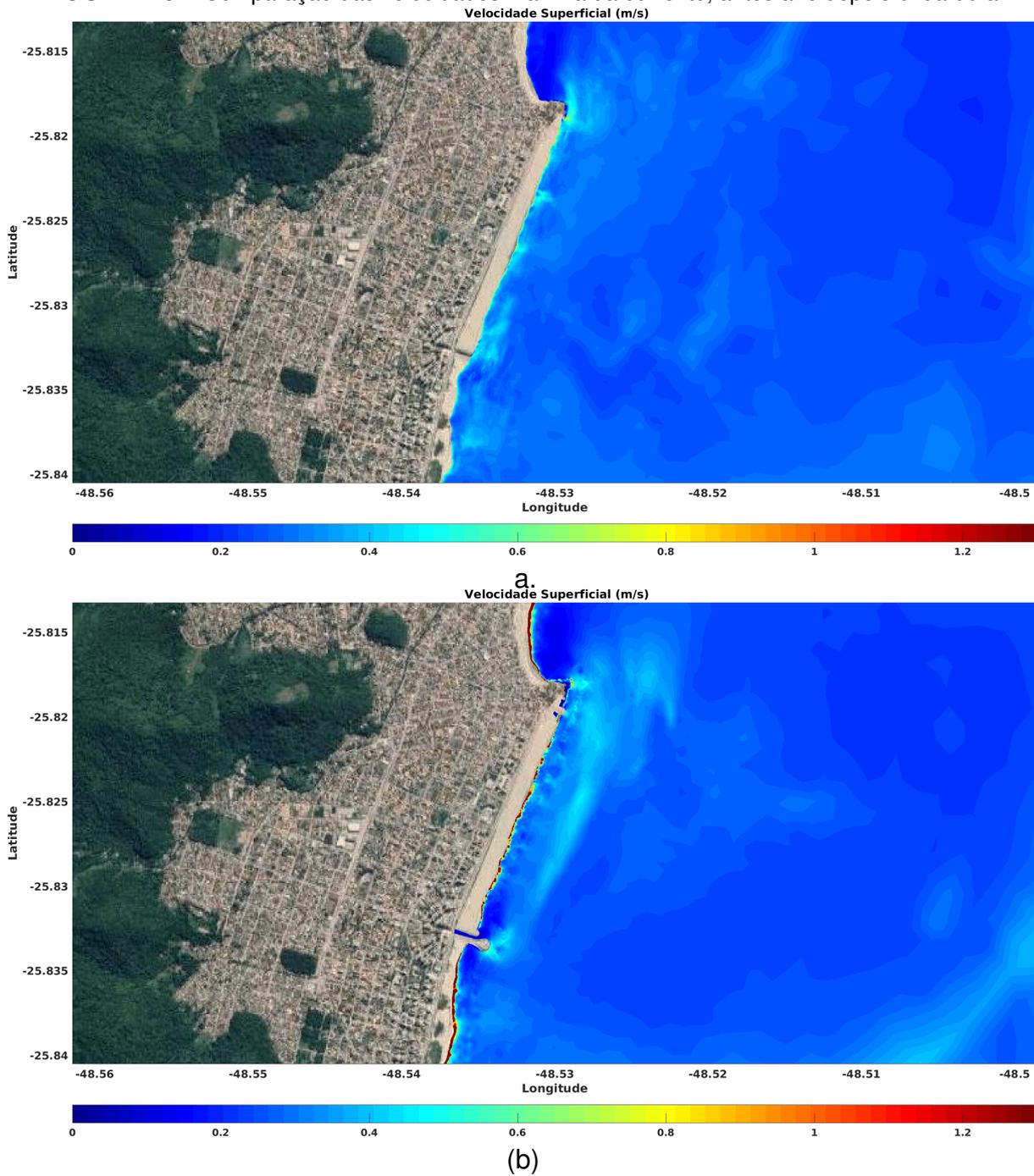
Através das FIGURAS 16 a. e 16 b. vemos que há uma variação na velocidade máxima entre os cenários estudados. Inicialmente é possível observar que a FIGURA 16 b. possuem intensidades superiores de velocidade máxima da corrente do que o cenário anterior a obra (FIGURA 16 a.), esses valores estão localizados na facie praial com intensidades superando $1,5 \text{ m.s}^{-1}$. Adicionalmente, é perceptível o aumento significativo da velocidade máxima da corrente no cabeço das obras costeiras projetadas, além de possuir uma região que "conectando" a guia-corrente, o espigão e o Pico de Matinhos, situada entre as isóbatas de 8 e 10 metros onde há uma corrente paralela à praia Brava contendo velocidades máximas em torno de $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ enquanto no comprimento da obra temos velocidades por volta de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$.

A intensificação da velocidade máxima na facie praial com a adição das obras indica grande tendência à erosão praial, uma vez que os cenários também diferem na inclinação da zona de varrido. Enquanto o cenário anterior está ao nível do mar, o cenário com a obra apresenta uma altura de 4 metros após o engordamento. A presença de uma intensificação próximo à costa demonstra que a obra proposta tem a capacidade de desviar as correntes de deriva da zona da praia para a zona de arrebenção, indicando a possível criação de uma área de intensificação das correntes longitudinais na costa e/ou uma deriva litorânea mais distante da zona de arrebenção.

A seguir temos as FIGURAS 17 a. e 17 b. que apresentam o mesmo resultado anterior (FIGURA 16), entretanto, com detalhes nas regiões de interesse nos dois cenários.

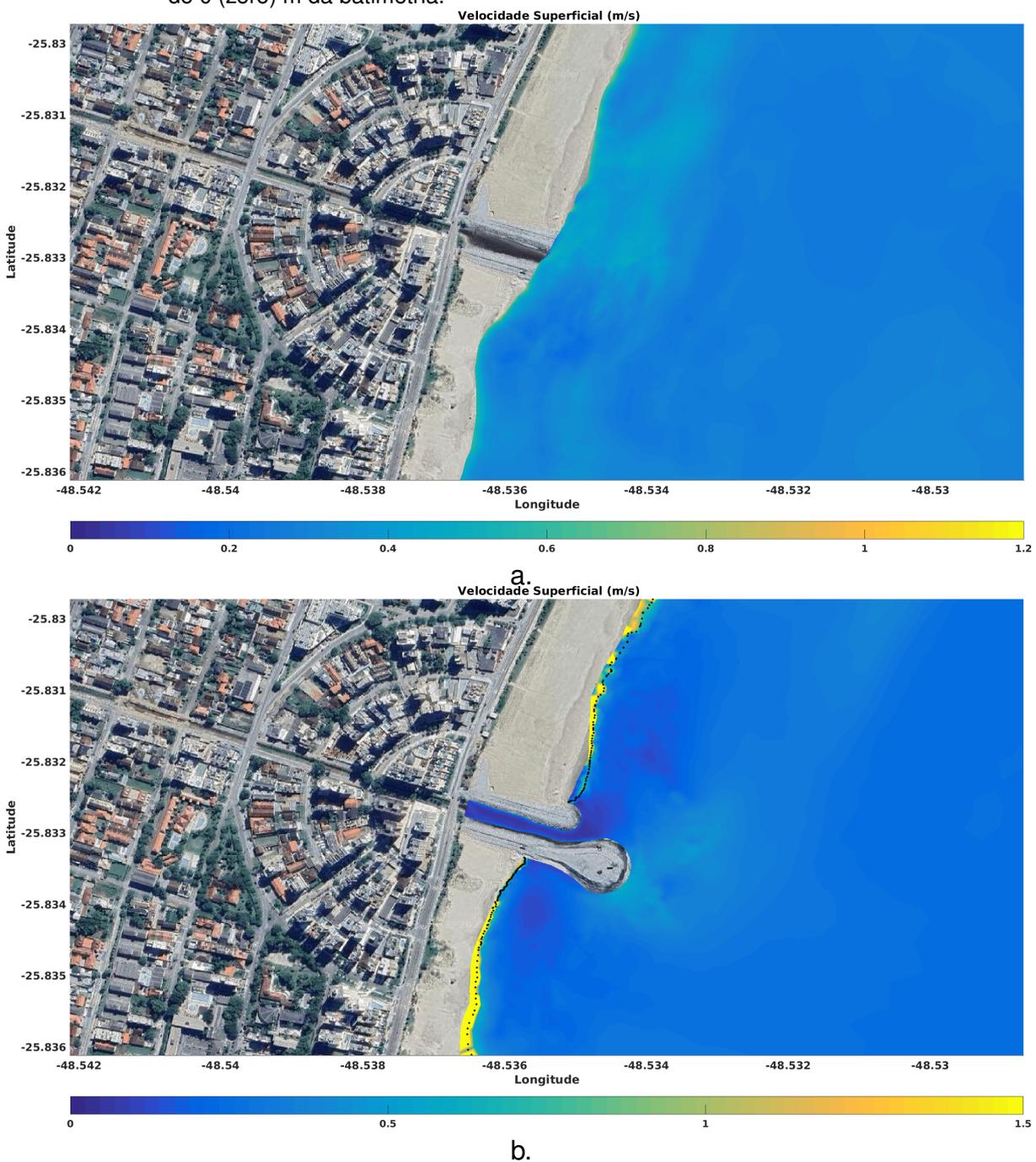
No primeiro cenário (FIGURA 17 a.), podemos observar uma variabilidade baixa na velocidade nessa região, sendo que a leve dispersão da velocidade superficial é influenciada pelo canal que deságua nesse ponto gerando a ocorrência de velocidades

FIGURA 16 – Comparação das velocidades máximas da corrente, antes a. e depois b. da obra.



Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 17 – Comparação das velocidades máxima da corrente antes a. e depois b. da obra. Destaque na região das guias correntes da Avenida Paraná. Os pontos pretos representam o valor de 0 (zero) m da batimetria.



Fonte: A autora, 2023.

de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ próximo a costa e $0,65 \text{ m.s}^{-1}$ na praia. No cenário futuro, é visível que a energia da corrente está mais intensa ao longo da linha da praia atingindo valores de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ (ver FIGURA 16 b.), visto que na FIGURA 17 a. a escala da velocidade foi limitada a $0,8 \text{ m/s}$ para que os processos costeiros possam ser melhor avaliados.

Podemos observar que a guia-corrente atua como um obstáculo que amortece o impacto das correntes costeiras atuantes nas praias. Com esse resultado é possível supor que existe maior tendência da ocorrência de processos erosivos no trecho entre o Morro do Boi e os guias da Avenida Paraná, incluindo na própria obra. Porém, após a implementação da obra costeira, espera-se um processo de assoreamento, principalmente na área onde está localizado a desembocadura do canal da Avenida Paraná, uma vez que a velocidade do canal não será suficiente para contrapor o fluxo das correntes, resultando provavelmente na deposição e acúmulo sedimentar no local, que por conseguinte poderá ser retrabalhado pelo transporte de sedimentos.

Nas FIGURAS 18 a. e 18 b. vemos em detalhe o Pico de Matinhos, onde foi posicionado o espigão, tornando-se relevante ressaltar a linha pontilhada representando a quota de 0 (zero) m de batimetria. Nesse trecho da praia, onde o cenário antigo (FIGURA 18 a.) apresenta entre $0,6$ e $0,8 \text{ m.s}^{-1}$ na praia e no Pico de Matinhos. Por outro lado, com a presença da obra (FIGURA 18 b.), foi possível estimar intensidades máximas da corrente próximas a $1,5 \text{ m.s}^{-1}$, praticamente o dobro.

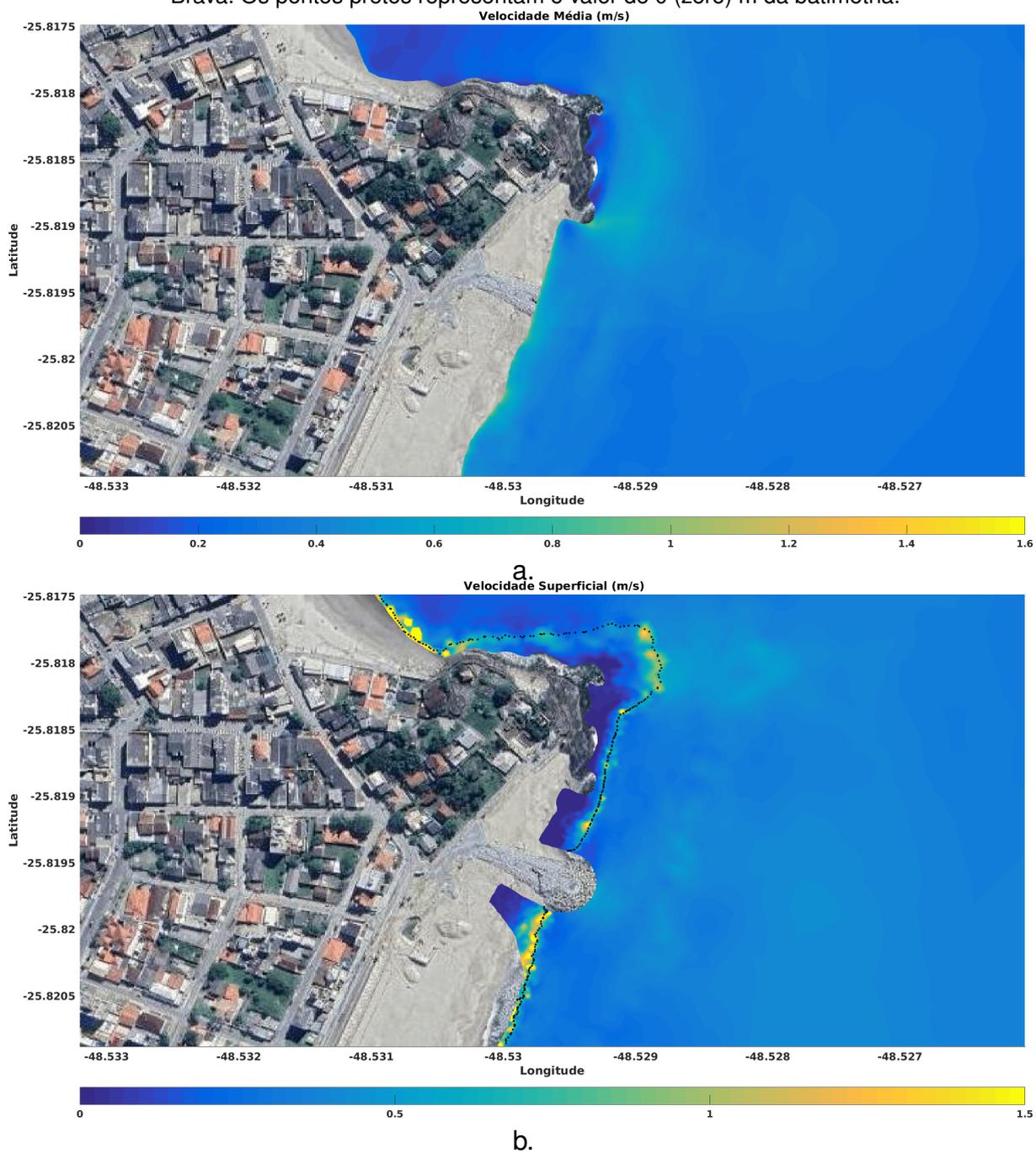
Entre o espigão e o Pico, é possível notar um ponto de elevada velocidade máxima com valores tendendo a zero na zona de varrido, indicando ser uma região com alta capacidade de transporte sedimentar e ao mesmo tempo, grande retenção de sedimentos na zona de varrido. No sentido sul do espigão, percebe-se alguns metros de faixa praias com velocidade elevada e em seguida um decréscimo na velocidade, indicando um deficit sedimentar seguido de processos deposicionais. Adicionalmente, o espigão consegue atenuar o impacto das correntes na zona do sub-aérea da praia, podendo vir a reduzir a capacidade de ocorrência de eventos extremos erosivos.

A velocidade de fundo representa a resultante do decaimento da velocidade superficial em sua camada limite até atingir a camada de fundo (último nível sigma do modelo), transferindo sua energia para os processos de transporte sedimentar.

Sendo assim, podemos observar a velocidade máxima de fundo nas FIGURAS 19 e 20 nas regiões de interesse, guia corrente da Avenida Paraná e o Pico de Matinhos, respectivamente.

Na FIGURA 19, a velocidade de fundo máxima observada foi de $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ localizada na facie praias com regiões próximas aos guias-corrente, atingindo $0,25 \text{ m.s}^{-1}$ nos dois cenários. Entretanto, com a presença da obra (FIGURA 19 b.), percebe-se a intensificação da velocidade de fundo no cabeço do guia-corrente ao sul (guia maior),

FIGURA 18 – Comparação das velocidades máximas da corrente antes a. e depois b. da obra. Destaque na região do Pico de Matinhos onde está localizado atualmente o espigão da Praia Brava. Os pontos pretos representam o valor de 0 (zero) m da batimetria.



Fonte: A autora, 2023.

além da redução da velocidade de fundo no guia ao norte (o menor). Á vista disso, indica uma tendência do guia sul receber maior impacto energético de fundo, enquanto o guia norte apresenta possibilidade de induzir a deposição sedimentar.

Adicionalmente, na FIGURA 19 b., é possível notar a redução da velocidade máxima de fundo a esquerda do cabeço do guia-corrente, indicando uma tendência deposicional neste setor, enquanto mais ao sul existem velocidades próximas a $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ induzindo processos erosivos. Ainda nesta figura, nota-se regiões com baixa velocidade de fundo máxima seguida de aumento de velocidade, que pode estar associado às alterações batimétricas geradas pela presença da obra e seu subsequente transporte sedimentar.

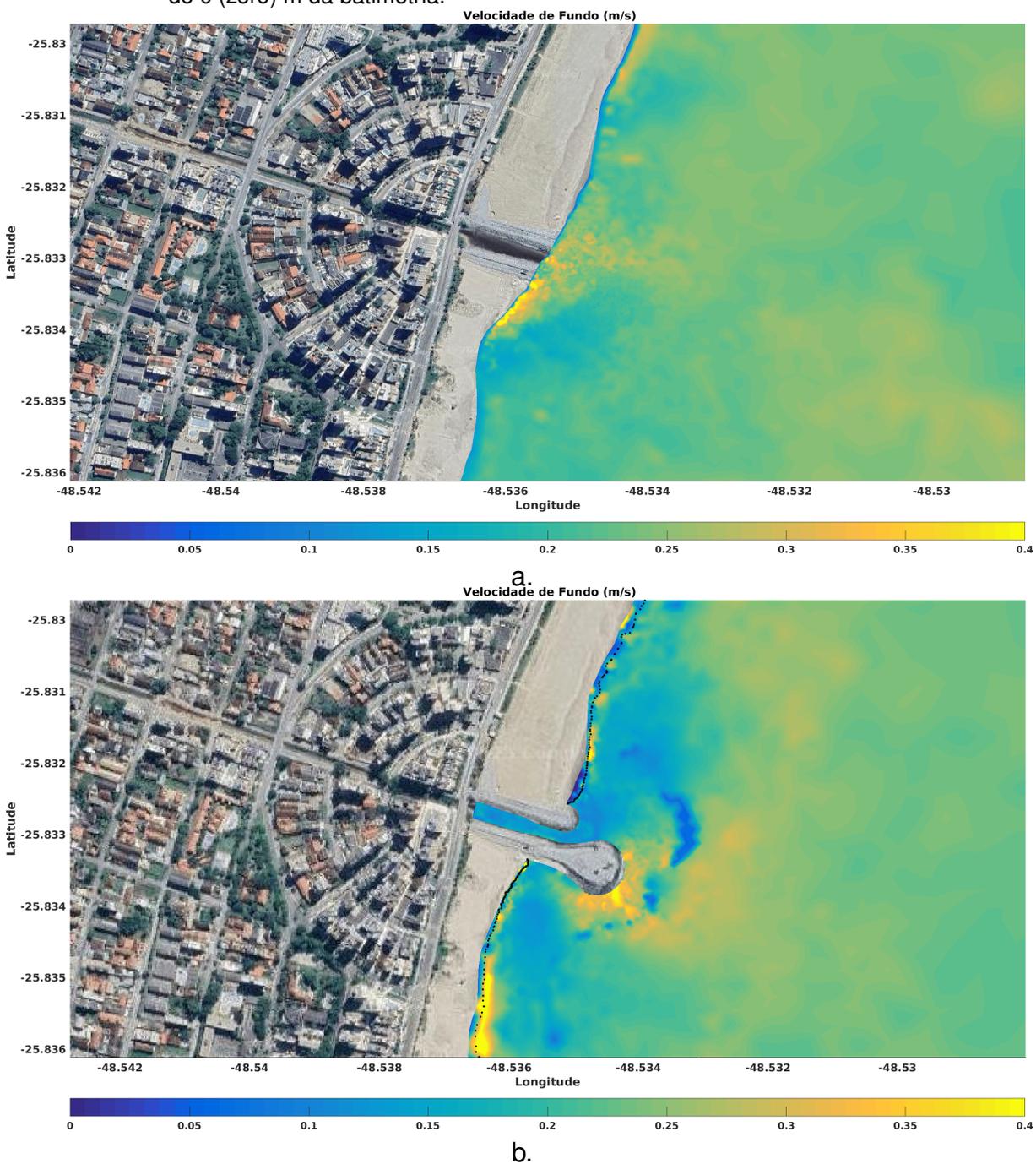
No Pico de Matinhos, a diferença da velocidade máxima de fundo, em ambos os cenários, é perceptível (FIGURA 20). No cenário anterior (FIGURA 20 a.), o Pico de Matinhos, recebe grande parte da intensidade das correntes de fundo advinda de sul, promovendo a intensificação de processos erosivos em sua porção rochosa sul. No entorno do Pico é possível observar a intensificação da corrente de fundo de forma radial devido ao impacto da corrente de fundo com a barreira física do costão rochoso.

Com a adição do espigão ao sul do Pico (FIGURA 20 b.) ocorre uma grande modulação da localização dos máximos de velocidade das correntes de fundo. A praia recebeu altitude de projeto de quatro metros em relação ao cenário anterior, reduzindo a capacidade da velocidade de fundo atingir a facie praial com tanto impacto quanto visto anteriormente. Ainda assim, no cabeço do espigão ocorre a intensificação da velocidade máxima de fundo, e por outro lado, ao redor da estrutura existe a ocorrência de velocidade de fundo atenuada, indicando a possível prevalência de processos deposicionais.

A partir da compreensão do processos de maior intensidade tanto na superfície como fundo durante o período simulado, discutidos anteriormente, podemos agora avaliar as direções predominantes em cada cenário através da variável da velocidade residual. Nas FIGURAS 21 e 22 temos a representação gráfica da velocidade média da corrente superficial e sua direção predominante durante o período simulado, tornando mais clara a visualização da direção da corrente e de qual forma as regiões serão mais afetadas/beneficiadas.

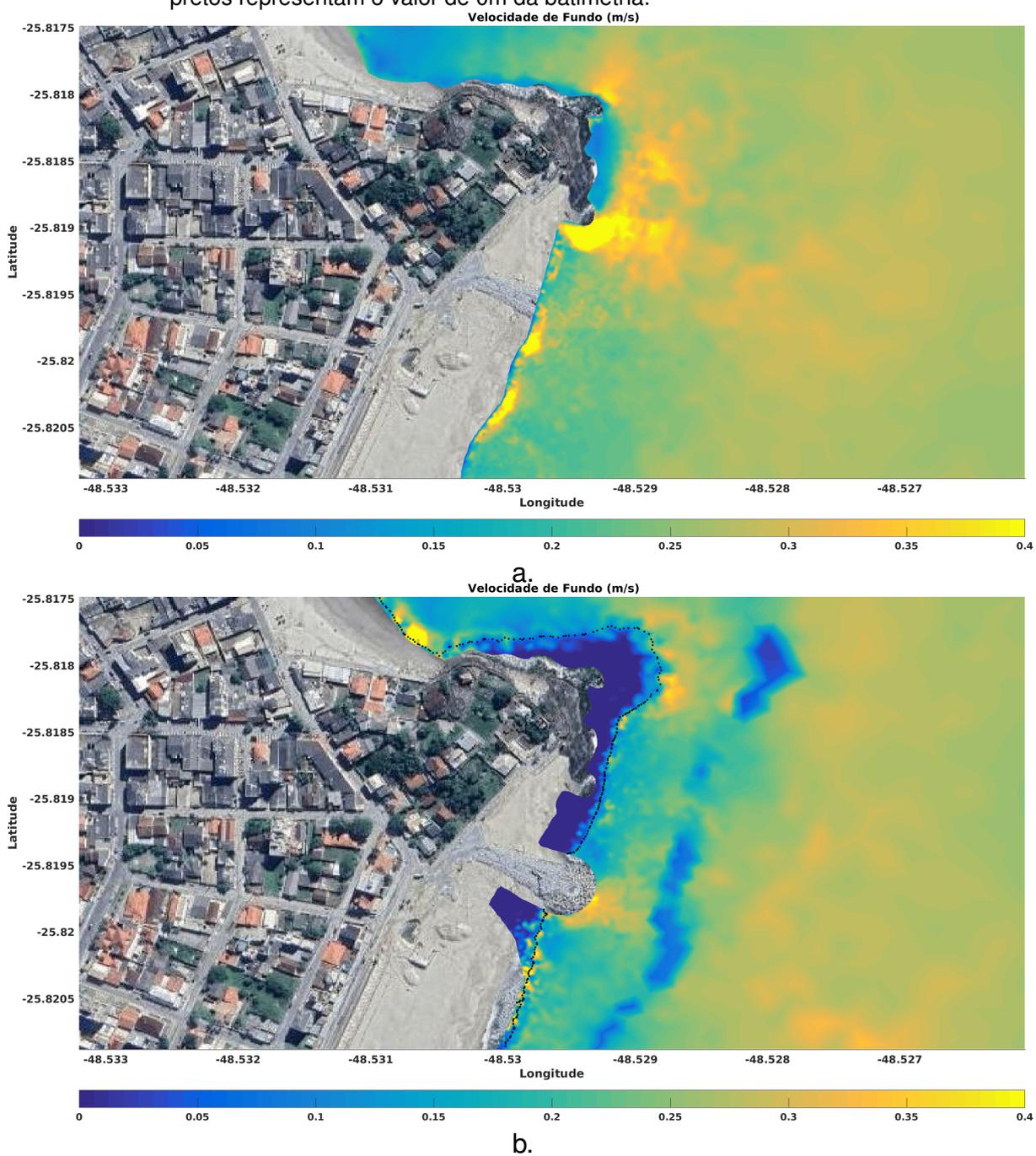
No cenário antigo, o canal da Avenida Paraná (FIGURA 21 a.) contribui para a dinâmica praial local como um foco divergente da hidrodinâmica por gerar uma pluma de pequena extensão, funcionando como um divisor da deriva litorânea que o encontra de forma bidirecional, à esquerda advinda de sul enquanto que à direita de norte. Adicionalmente, apresenta em vários setores da praia velocidades médias em torno de $0,14 \text{ m.s}^{-1}$ corroborando com a hipótese da ocorrência de processos erosivos uniformes neste setor.

FIGURA 19 – Comparação das velocidades máximas de fundo antes a. e depois b. da obra. Destaque na região das guias correntes da Avenida Paraná. Os pontos pretos representam o valor de 0 (zero) m da batimetria.



Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 20 – Comparação das velocidades de fundo antes a. e depois b. Destaque na região do Pico de Matinhos onde está localizado atualmente o espigão da Praia Brava. Os pontos pretos representam o valor de 0m da batimetria.



Fonte: A autora, 2023.

Com a implantação das guias correntes (FIGURA 21 b.) percebemos uma mudança na deriva litorânea de forma geral conduzindo o fluxo costeiro para norte, enquanto que a intensidade média da corrente também reduziu de forma geral. Ainda assim, é possível identificar a intensificação da velocidade média das correntes no cabeço do espigão, promovendo a geração de um vórtice anti-horário na desembocadura do canal que apresenta baixas velocidades médias. O padrão hidrodinâmico observado aponta para a ocorrência, no cabeço, de erosão e/ou transporte de sedimentos, enquanto no canal, tenderá ao assoreamento e deposição.

Avaliando a velocidade residual do Pico de Matinhos (FIGURA 22 a.), nota-se uma ampla região com velocidade de corrente média ao redor do costão rochoso e também no setor norte da Praia Brava. O padrão direcional se demonstra de norte para sul com a ocorrência de diversas estruturas coerentes persistentes (vórtices). Com a presença da obra (FIGURA 22 b.) ocorre a mudança no padrão direcional onde o costão rochoso do Pico direciona a corrente resultante para *offshore*, e ainda ocorre a redução da intensidade média geral.

4.2 MORFODINÂMICA

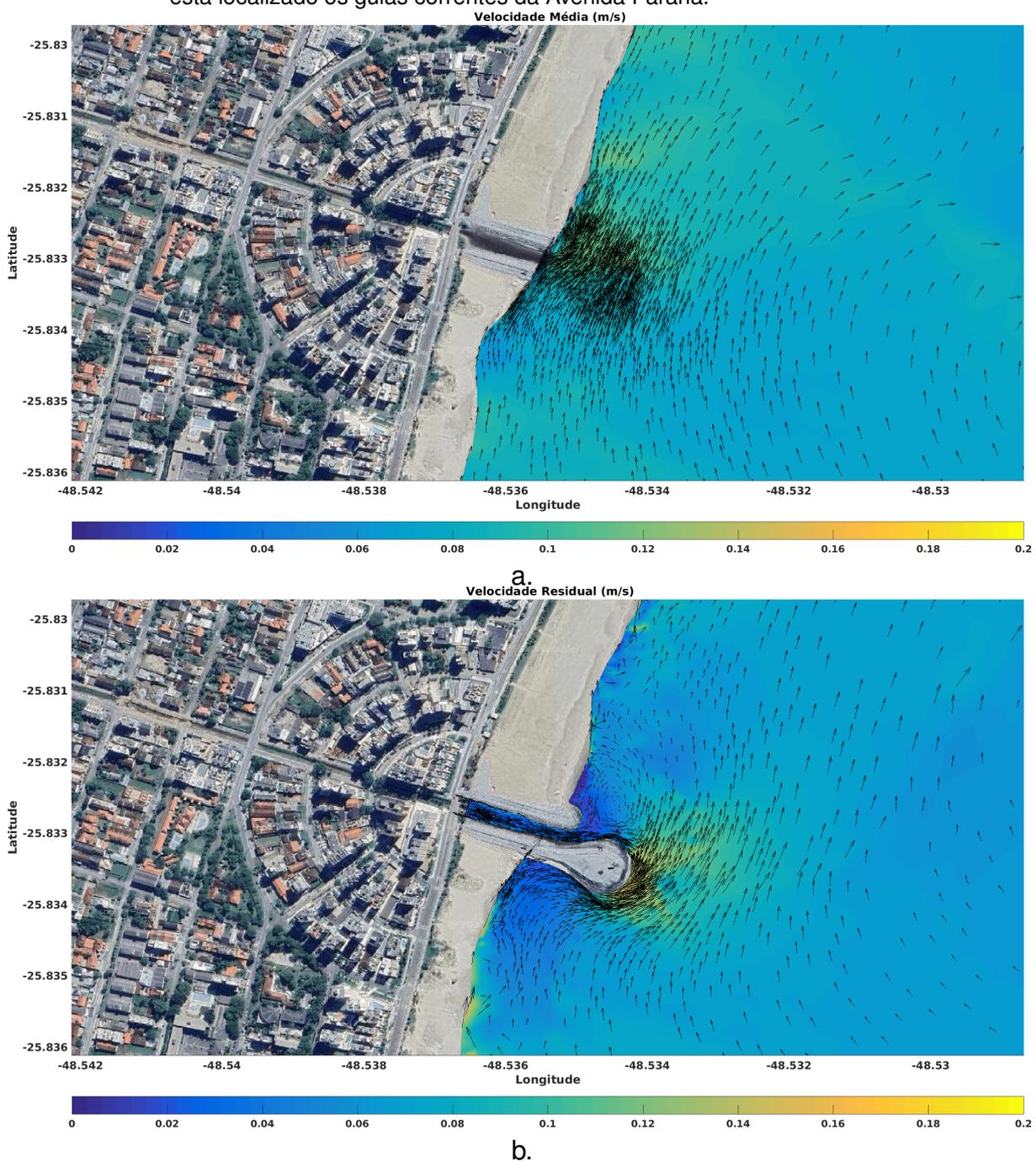
Os parâmetros relevantes para a descrição das modificações do fundo marinho e que serão abordadas nesta seção são a tensão de cisalhamento com o fundo e a evolução do fundo.

A tensão de cisalhamento com o fundo é o resultado da interação da corrente de fundo com o mesmo, provocando a atrito superficial com o fundo, e em condições de elevada velocidade de fundo pode iniciar o transporte sedimentar, gerando posteriormente erosão e deposição.

Para permitir melhor visualização da tensão no litoral, foi determinado escalas diferentes para cada cenário, na FIGURA 23 a. a escala de cores dos gráficos foi limitada de $-0,5$ a $+0,5 \text{ N/m}^2$, enquanto na FIGURA 23 b. foi limitada para 1 N/m^2 . Ambos os cenários apresentam tensões próximas a $0,3 \text{ N/m}^2$ na zona de surf e em determinadas regiões *offshore*, provavelmente relacionadas com células de circulação costeiras. Na facie praial, percebe-se grande diferença entre os cenários, ao passo que no cenário antigo prevalecem baixas tensões devido a ausência de um gradiente vertical na praia, na presença das obras e engorda, por outro lado, é notável o aumento da tensão de cisalhamento de fundo, indicando a ocorrência de transporte sedimentar.

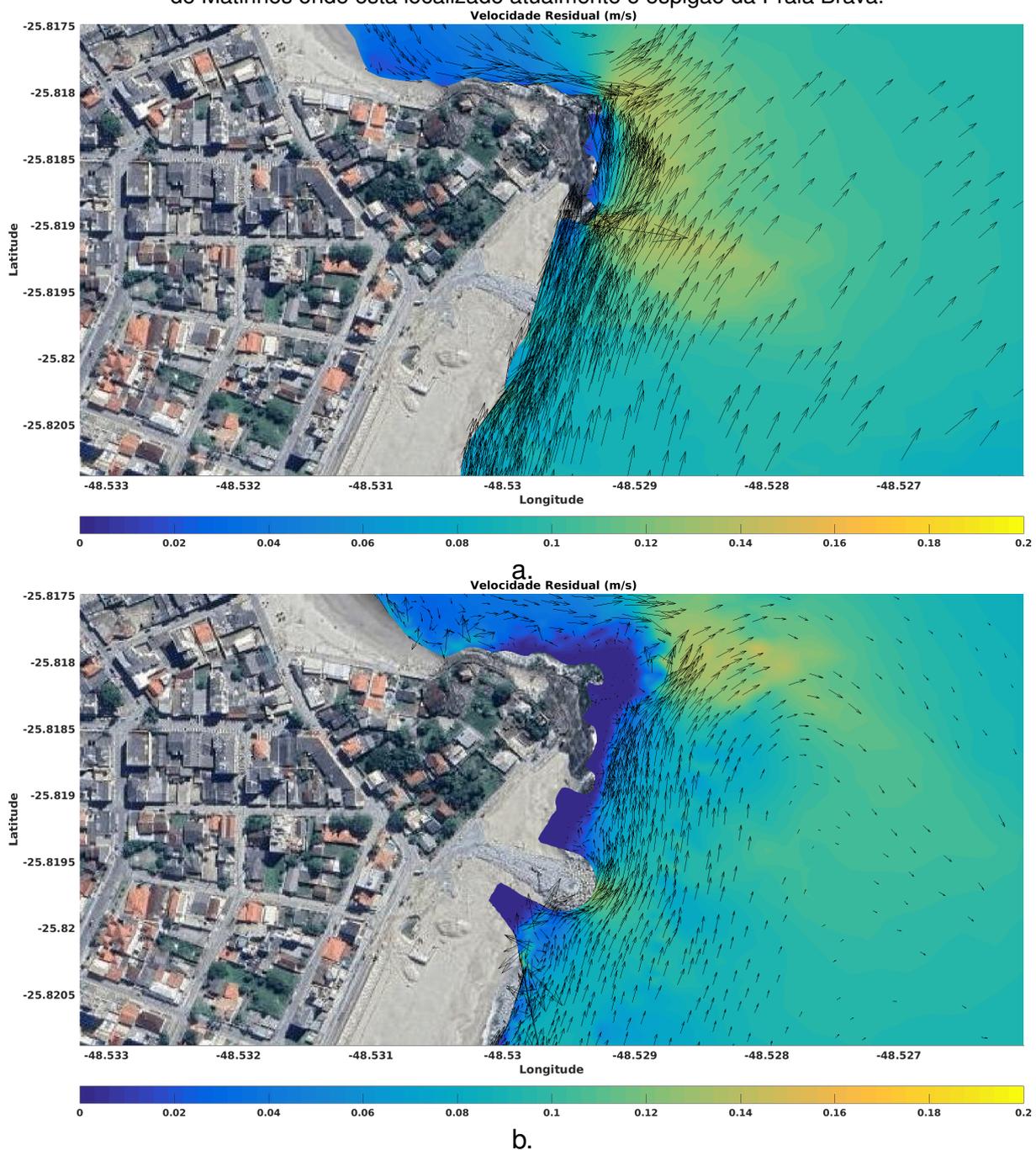
Analisando cada região de interesse frente a esse parâmetro, vemos que no cabeço da guia corrente da Avenida Paraná (FIGURA 24 b.) ocorrem valores médios de $0,6 \text{ N/m}^2$, valores em torno de 2 N/m^2 na praia e dentro do canal valores tendendo a zero. No cenário antigo (FIGURA 24 a.) ocorrem tensões em torno de $0,3 \text{ N/m}^2$.

FIGURA 21 – Comparação das velocidades residuais antes a. e depois b. focando na região onde está localizado os guias correntes da Avenida Paraná.



Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 22 – Comparação das velocidades residuais antes a. e depois b. Destaque na região do Pico de Matinhos onde está localizado atualmente o espigão da Praia Brava.



Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 23 – Comparação das médias das tensões de atrito cisalhante com o fundo antes a. e depois b. da obra.



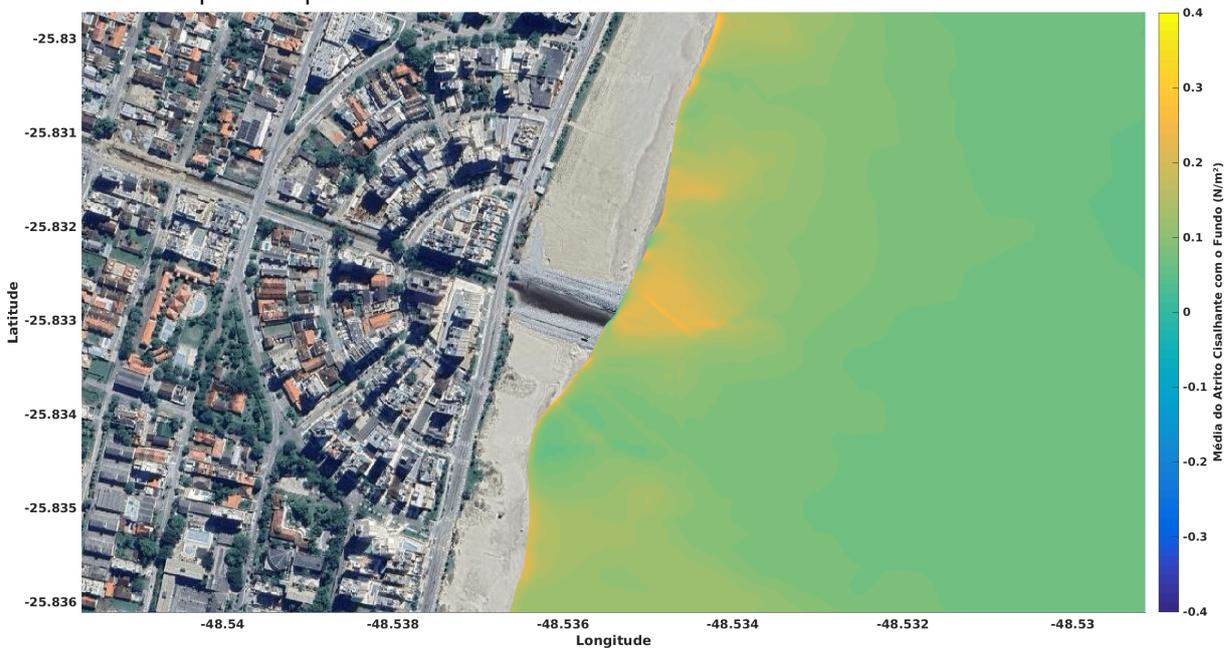
a.



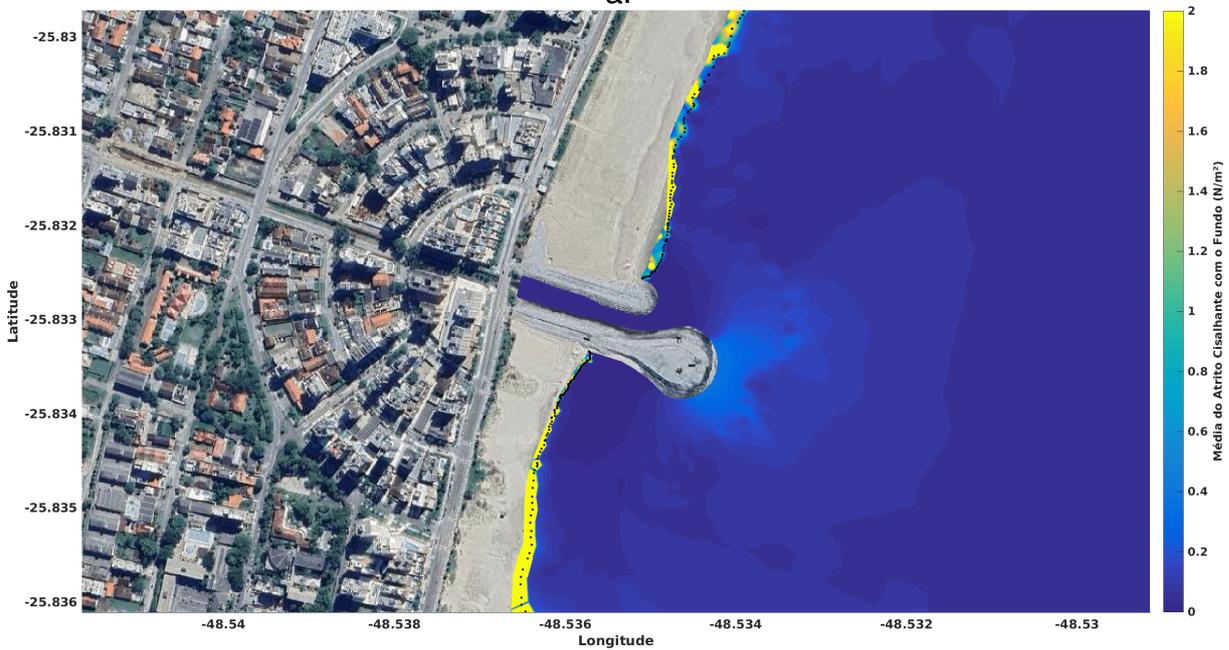
b.

Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 24 – Comparação das médias das tensões de atrito cisalhante com o fundo antes a. e depois b. da obra. Destaque na região das guias correntes da Avenida Paraná. Os pontos pretos representam o valor de 0m da batimetria.



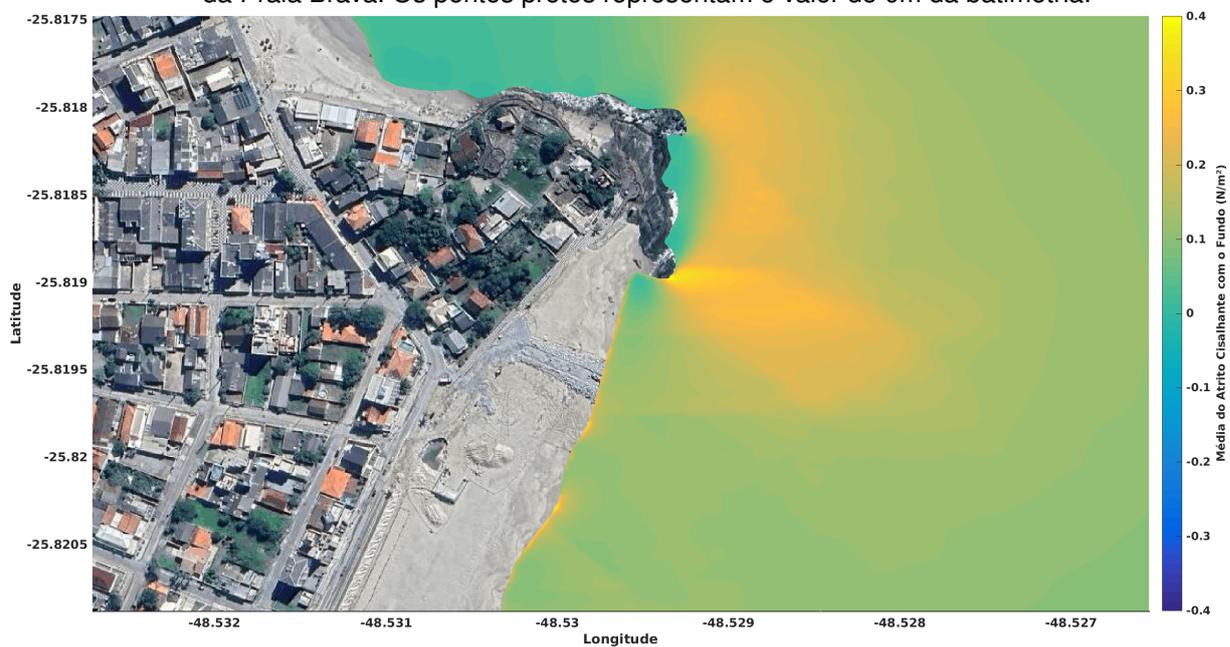
a.



b.

Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 25 – Comparação das médias das tensões de atrito cisalhante com o fundo antes a. e depois b. . Destaque na região do Pico de Matinhos onde está localizado atualmente o espigão da Praia Brava. Os pontos pretos representam o valor de 0m da batimetria.



a.



b.

Fonte: A autora, 2023.

Padrão semelhante pode ser observado no Pico de Matinhos (FIGURA 25), entretanto, com a presença das obras (FIGURA 25 b.) existe maior "ataque" das correntes na isolinha de 0 (zero) metros de batimetria (pontilhado). Essas tensões de cisalhamento elevadas indicam que durante todo o período simulado a tensão foi em torno de $2 N/m^2$, indicando grande chance de ocorrência de erosão nestas regiões.

A evolução do fundo ocorre como um processo acumulativo durante o período simulado, ou seja, é a integração de todos os aumentos e decréscimos batimétricos até o final da simulação.

Na FIGURA 26 a., há variação quase imperceptível, dessa forma, a escala de cores adotada possui valores em torno de +- 10cm para melhor visualização. Na FIGURA 26 b., vemos a diferença de valores atingidos na costa na escala de +- 2 m. Para melhor compreensão da figura, temos que em azul são regiões com perda sedimentar, ou seja, erosão, e regiões amarelas representam zonas de ganho sedimentar, assoreamento.

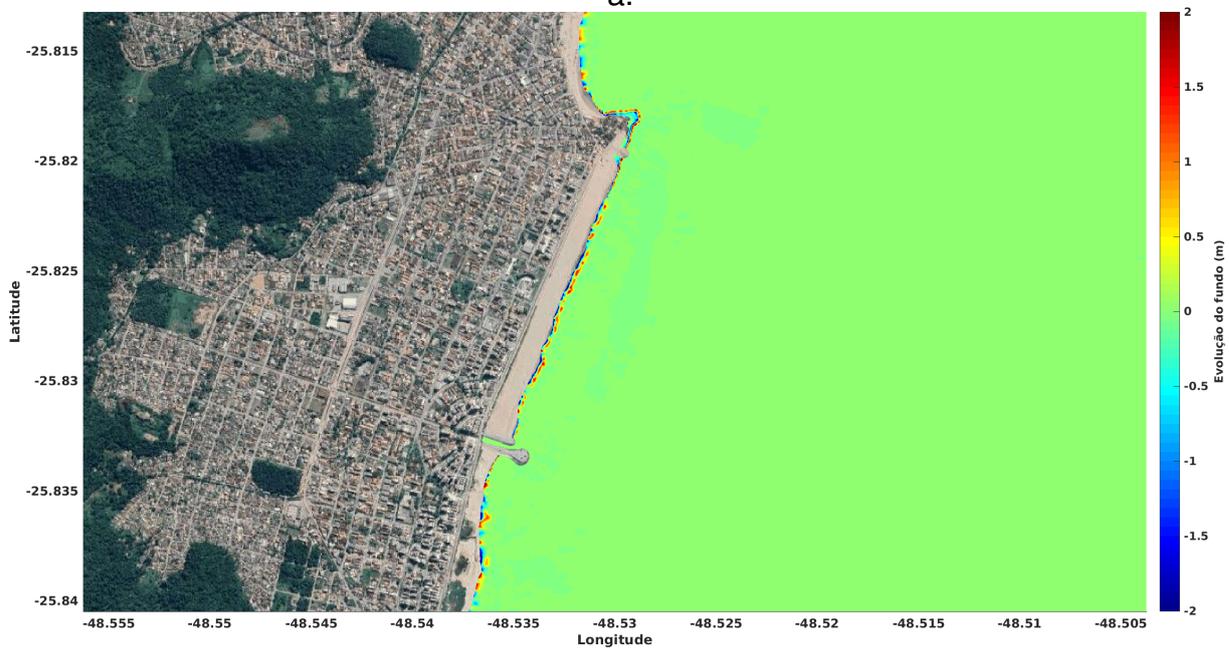
Na região do guia-corrente (FIGURA 27 b.), temos, novamente, a erosão a esquerda do guia sul, com locais de deposição intercalada em seguida, enquanto que a direita, temos pontos com erosão mais intensa. É importante ressaltar que as regiões erodidas apresentam zonas deposicionais no sentido *offshore*, demonstrando que ocorre a erosão da facie praial e, subsequentemente, deposição dos sedimentos. Neste sentido, o modelo conseguiu estimar a erosão da praia e a acumulação desses sedimentos em bancos na zona subaquosa, formando estruturas típicas de sistemas praias cava-banco com a cava possuindo até 2 m de profundidade e o banco recebendo em média 1,5 m de altura com sedimentos, mas em alguns pontos chega a 2 m.

Na FIGURA 28 b. percebemos o mesmo padrão observado para os guias-corrente. Entretanto, no Pico de Matinhos fica mais perceptível as alterações do perfil praial frente a linha tracejada do zero batimétrico. Ou seja, nesta região, o padrão de erosão praial e, subsequente, deposição na zona de surf como cava-banco também ocorre.

FIGURA 26 – Comparação da evolução do fundo antes a. e depois b. da obra.



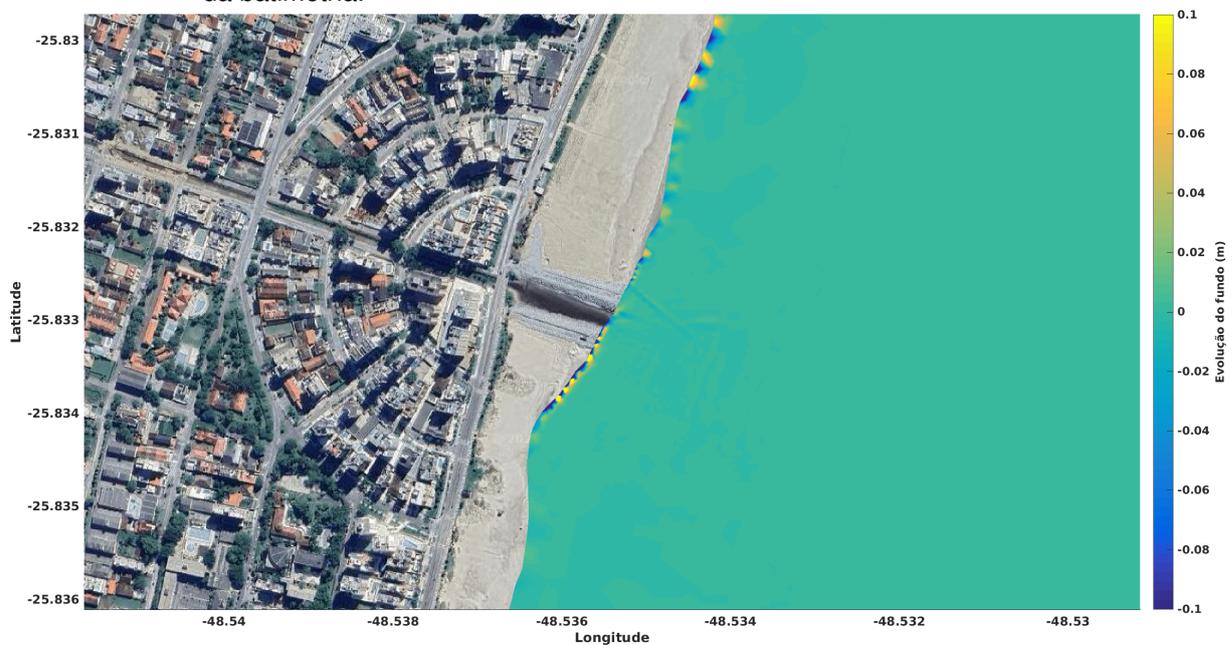
a.



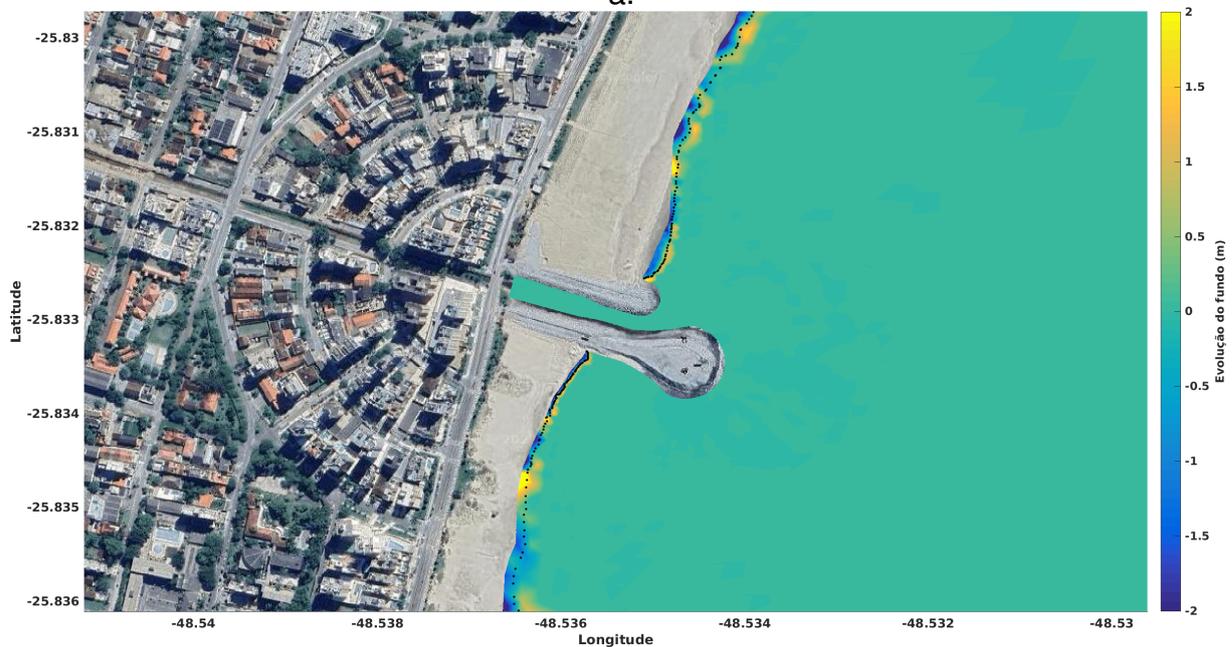
b.

Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 27 – Comparação da evolução do fundo antes a. e depois b. da obra. Destaque na região das guias correntes da Avenida Paraná. Os pontos pretos representam o valor de 0 (zero) m da batimetria.



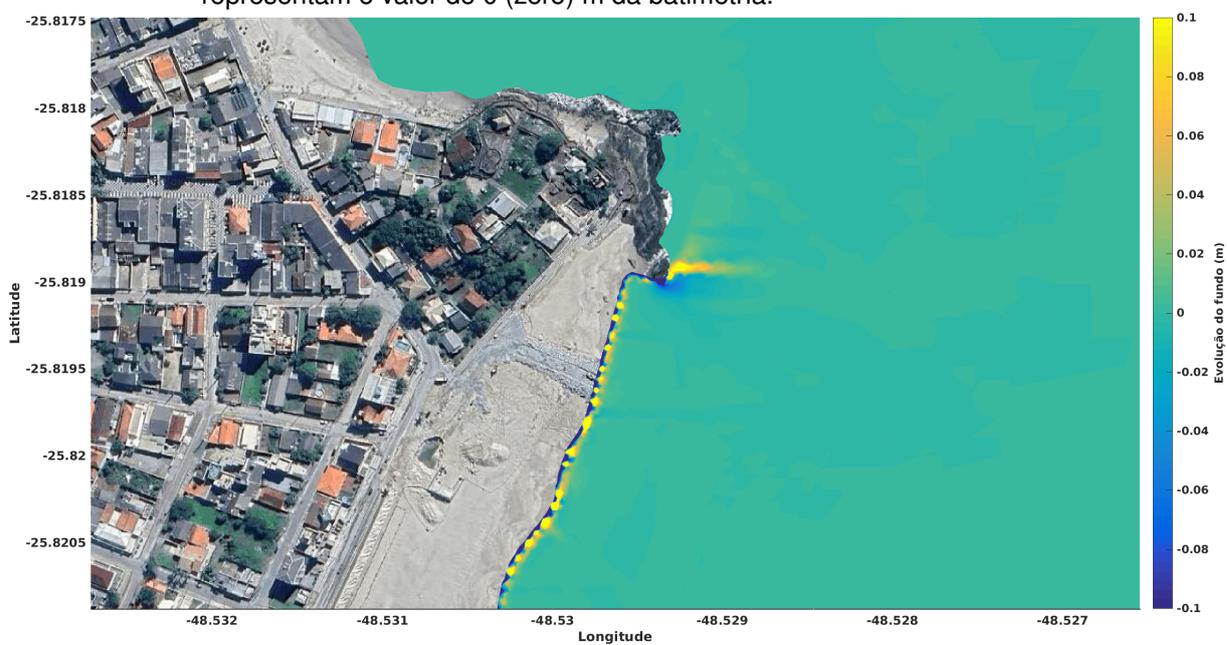
a.



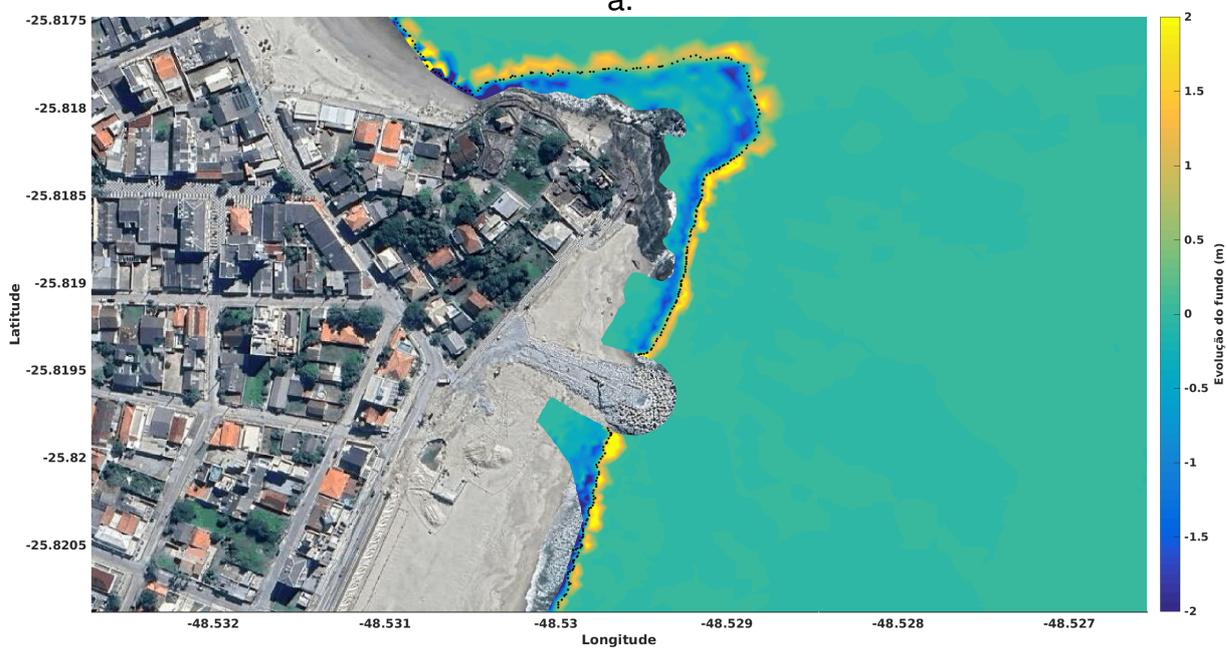
b.

Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 28 – Comparação da evolução do fundo antes a. e depois b. . Destaque na região do Pico de Matinhos onde está localizado atualmente o espigão da Praia Brava. Os pontos pretos representam o valor de 0 (zero) m da batimetria.



a.



b.

Fonte: A autora, 2023.

4.3 SÉRIES TEMPORAIS

Para avaliar a variação dos impactos das obras costeiras no processo hidrodinâmico, foram escolhidos oito pontos para a análise de séries temporais (FIGURA 29). Esses pontos estão localizados no guia-corrente da Avenida Paraná (P1, P2 e P3), no espigão da Praia Brava (P5, P6 e P7), um ponto no centro da Praia Brava, e o último ponto foi selecionado após o Pico de Matinhos, por ser uma área bem dinâmica e com grande importância para erosão (P4 e P8, respectivamente).

A velocidade superficial em cada ponto foi analisada e comparada entre cada cenário. Para o guia-corrente (FIGURA 30), podemos perceber que em P1 e P3 a velocidade no cenário antigo apresentava intensidade superior do que com a presença da obra. Essa diferença ocorre, pois, P1 e P3 estão localizados onde seria a linha de costa de ambos os cenários, ou seja, indicando que a presença da obra contribuiu para o enfraquecimento das correntes costeiras nesses pontos. Isso ocorre, porque a estrutura acaba funcionando com uma barreira, impedindo a passagem das correntes e consequentemente diminuindo a velocidade da mesma quando segue o contorno da obra, por isso P3 - principalmente - tende ao assoreamento.

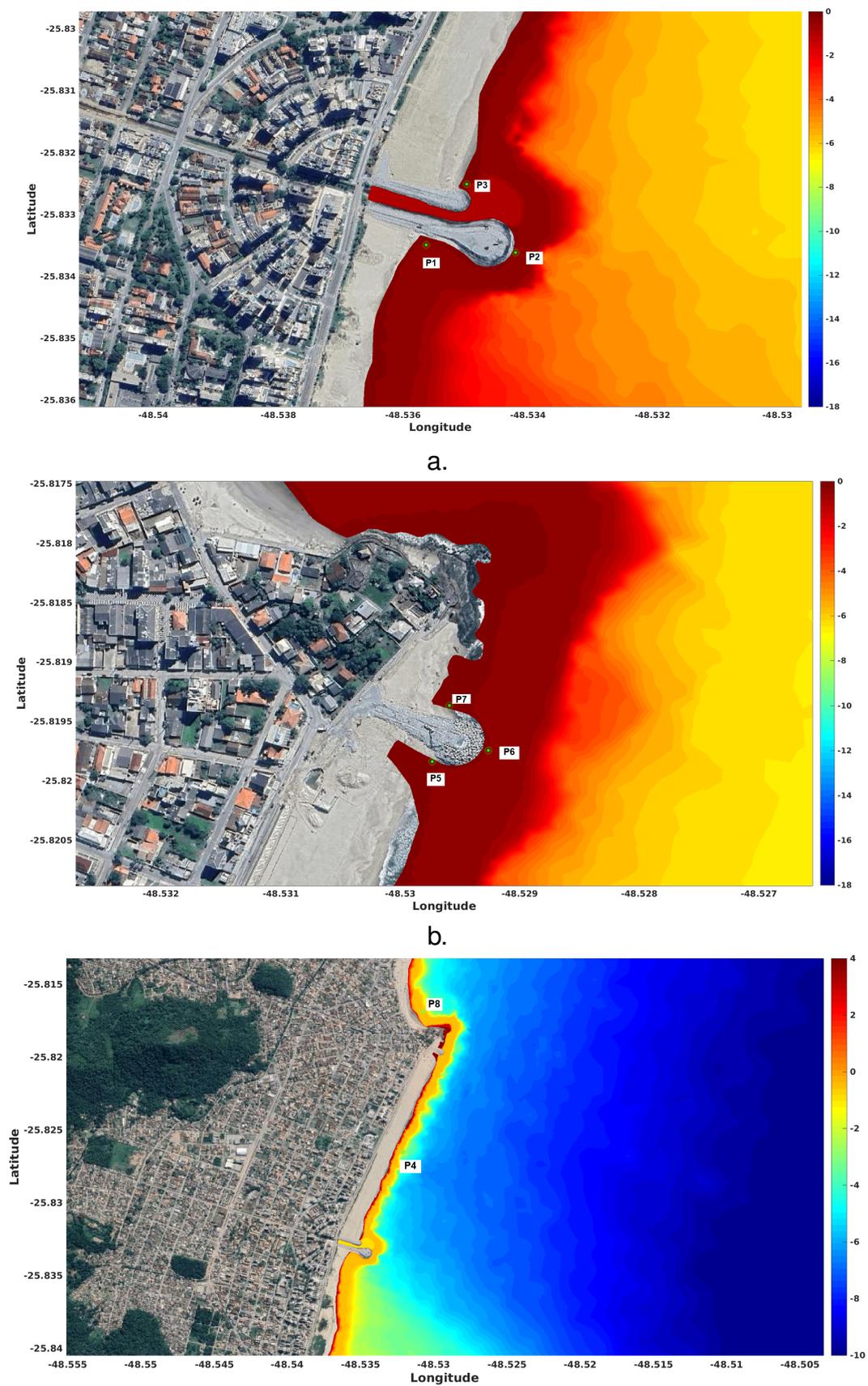
Em P2, localizado no cabeço da guia corrente, vemos o oposto, ou seja a intensificação da velocidade causada pela existência da obra costeira. Esse é um padrão típico de obras costeiras com formato arredondado que acabam potencializando processos de convergência de correntes no cabeço. No centro da Praia Brava (P4) (FIGURA 31), percebe-se a manutenção dos padrões de variação da velocidade das correntes, entretanto, com intensas velocidades no cenário com as obras costeiras. Esse ponto demonstra ser uma área hidrodinamicamente ativa e, consequentemente, de fácil transporte sedimentar.

Partindo para a região do Pico de Matinhos, iniciamos com os pontos P5 e P7, representado pela FIGURA 32. Os pontos trazem uma análise distinta, inicialmente, em P5 observamos que a corrente no cenário antigo é mais intensa do que com a presença da obra, entretanto, após 4 meses de simulação, a velocidade na presença da obra foi reduzida a zero. Em P7 devido a sua falta de velocidade no cenário atual, analisando as simulações, percebemos que estes pontos são protegidos pela estrutura, e estão localizados na faixa de areia engordada da praia, ou seja, durante o período simulado esses pontos em específico foram pouco afetados pelas correntes incidentes.

O ponto P6 (Figura 32 b.), posicionado no cabeço da obra, possui intensa atividade hidrodinâmica, em ambos os cenários, demonstrando que apesar da presença da obra, as tendências de oscilação da velocidade se mantêm nos dois casos, sempre com a obra sendo mais intensa.

Por fim, no ponto P8 (FIGURA 33), a velocidade da corrente com a presença

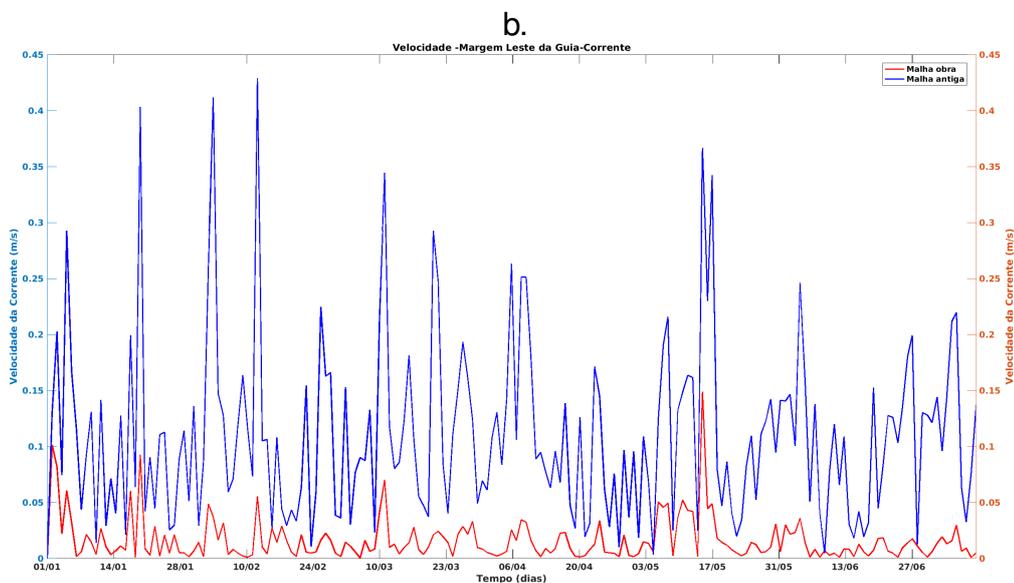
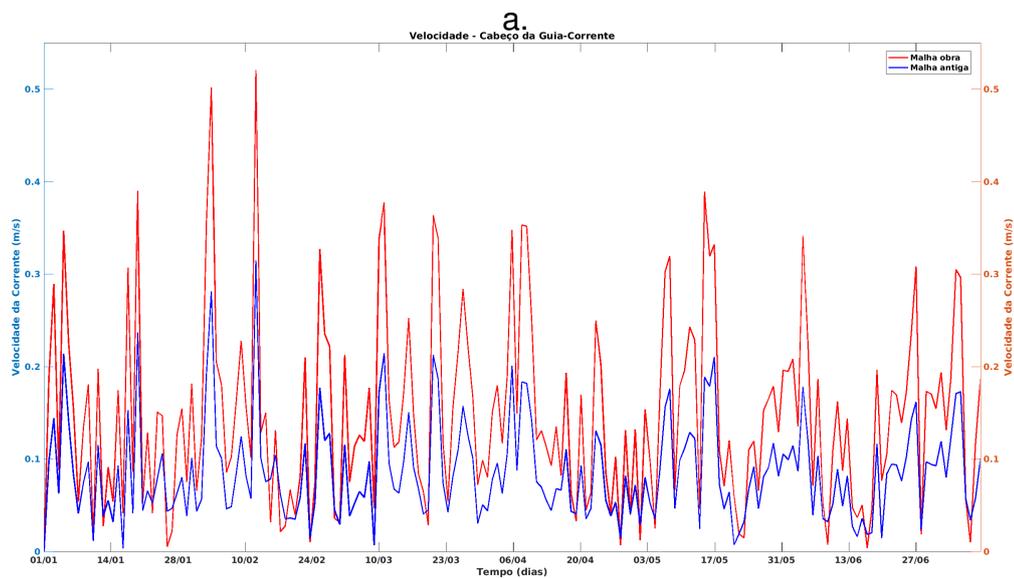
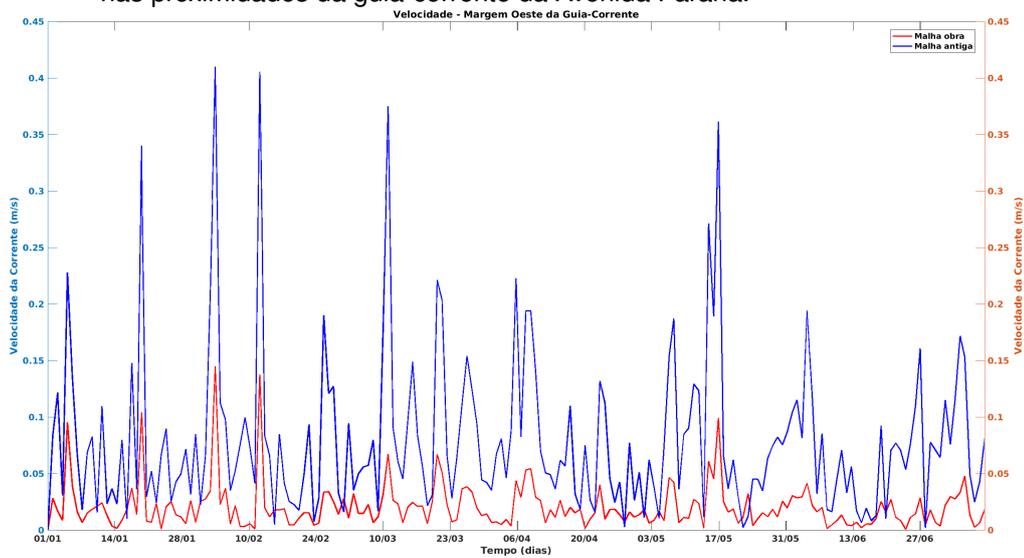
FIGURA 29 – Localização dos pontos seleccionados. a. Guias-corrente; b. Pico de Matinhos; c. Praias.



C.

Fonte: A autora, 2023.

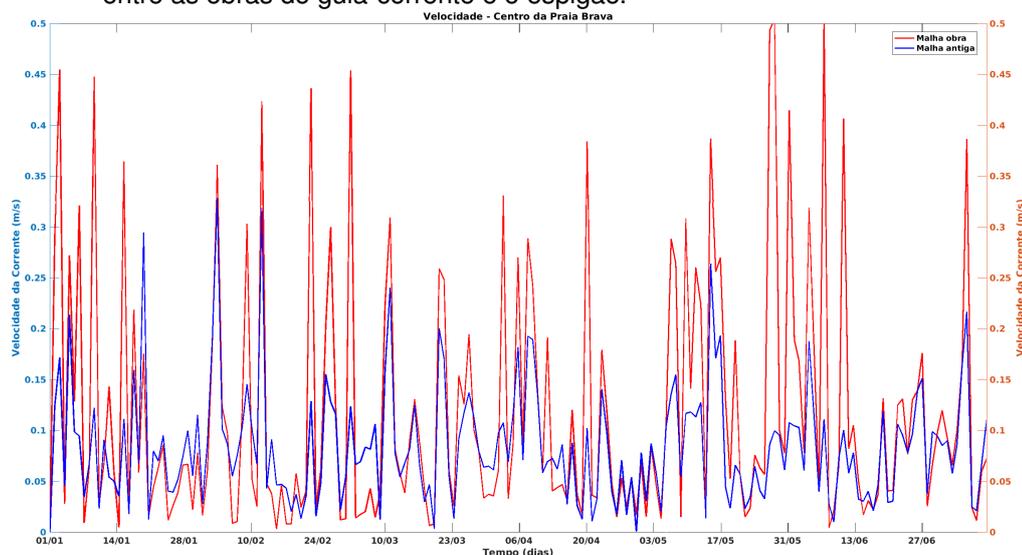
FIGURA 30 – Gráfico de comparação de velocidades superficiais referentes ao P1 a., P2 b. e P3 c., nas proximidades da guia-corrente da Avenida Paraná.



C.

Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 31 – Gráfico de comparação de velocidades superficiais referentes ao P4, no centro da praia entre as obras do guia-corrente e o espigão.



Fonte: A autora, 2023.

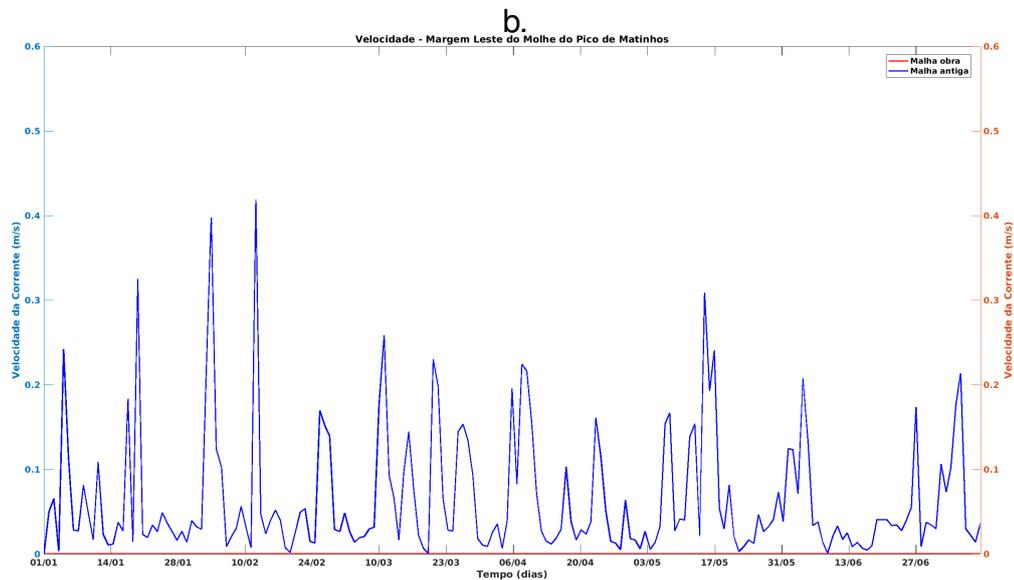
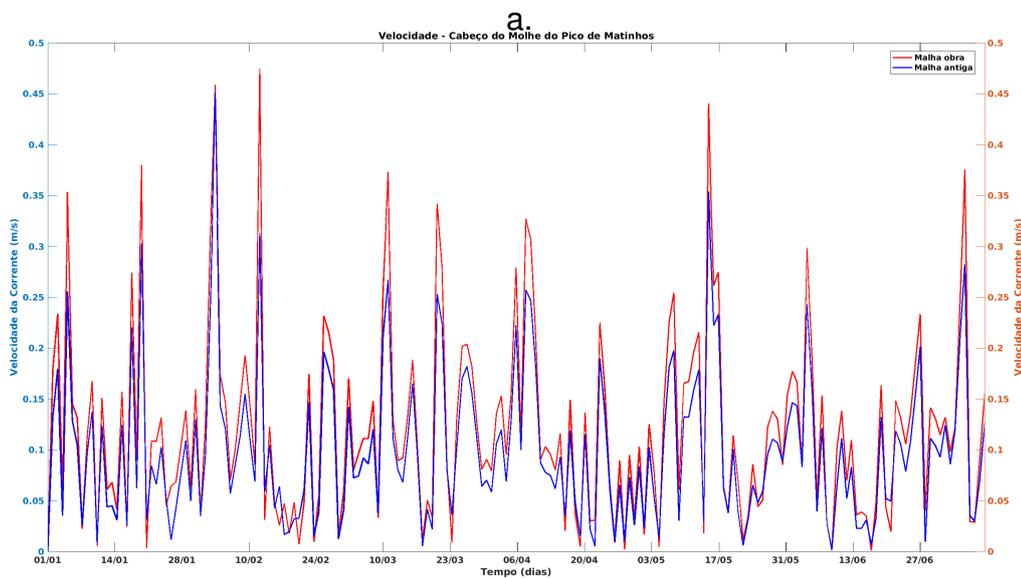
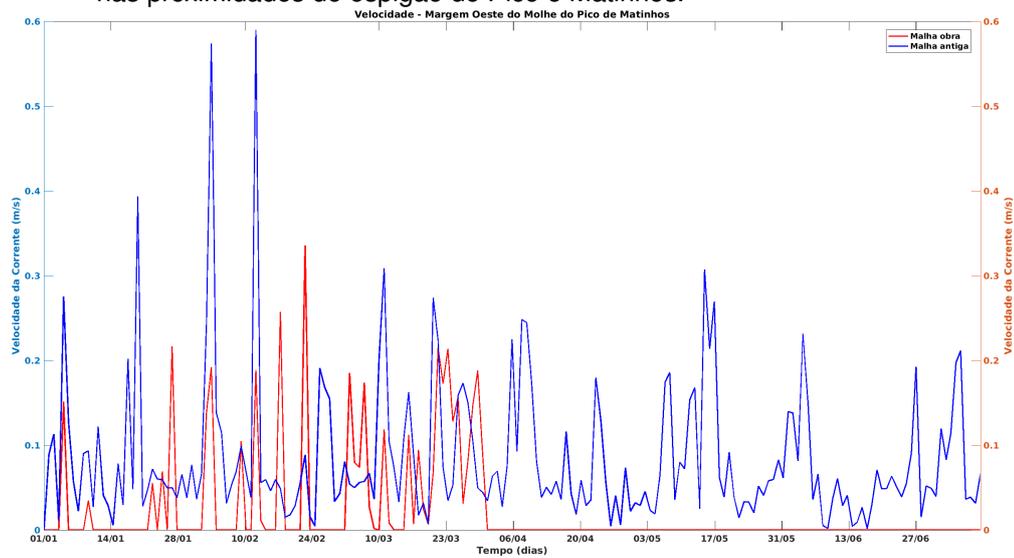
das obras é, em média, $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ superior do que a velocidade antiga durante todo o período simulado. Entretanto, em certos momentos ocorrem eventos de maior intensidade que acabam incidindo na costa.

4.4 REGIÕES CRÍTICAS PARA EROSIÃO

De acordo com os resultados apresentados e as análises temporais nos pontos, percebe-se a possibilidade da ocorrência de erosão em certas localidades, enquanto que em outras regiões, devido as obras semirrigidas, que atuam como uma barreira para as correntes costeiras, fazendo com que os sedimentos transportados tenham sua velocidade reduzida a ponto se depositarem no fundo, assoreando o local.

Na FIGURA 34 os locais com maior tendência a erosão estão em destaque. A região localizada à esquerda do guia corrente da Avenida Paraná, sofrerá grandes impactos das correntes vindas de sul. Outra região que será impactada negativamente com fortes correntes e, provavelmente, erodida, é a facie praias ao norte do Pico de Matinhos, devido ao encontro de corrente costeiras e deriva litorânea neste ponto. A faixa praias entre a Avenida Paraná e Praia Brava terá alguns pontos vermelhos, indicando elevadas taxas erosivas.

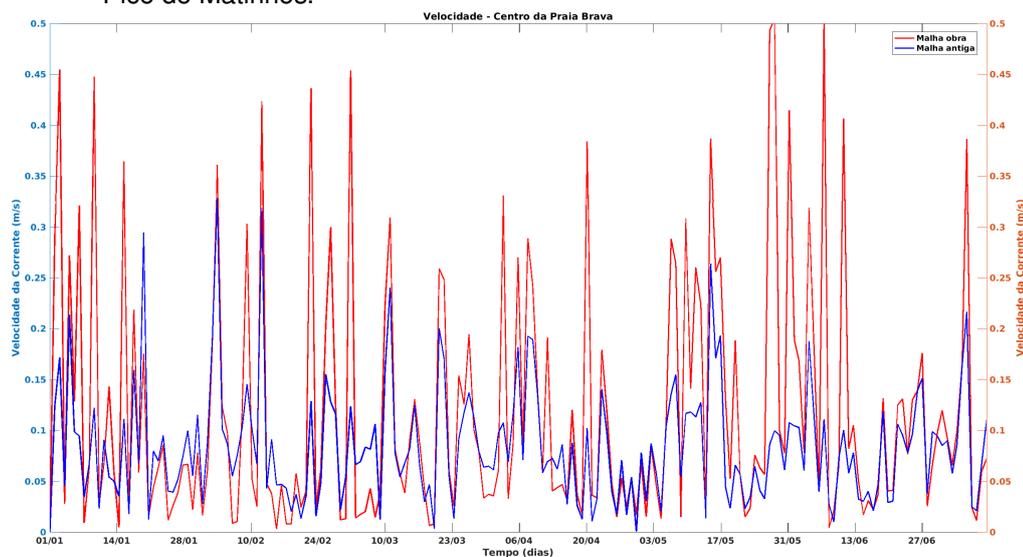
FIGURA 32 – Gráfico de comparação de velocidades superficiais referentes ao P5 a., P6 b. e P7 c., nas proximidades do espigão do Pico e Matinhos.



C.

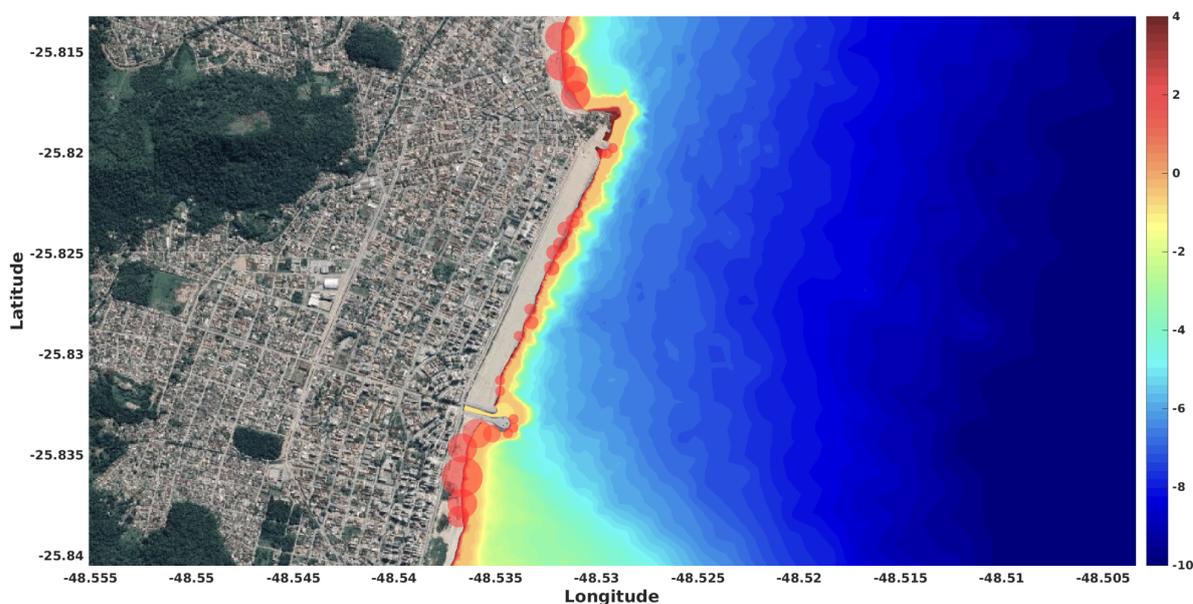
Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 33 – Gráfico de comparação de velocidades superficiais referentes ao P8, na praia após o Pico de Matinhos.



Fonte: A autora, 2023.

FIGURA 34 – Imagem do município salientando pontos que sofrerão mais com a erosão.



Fonte: A autora, 2023.

Da mesma forma que há pontos que serão erodidos, também haverá pontos impactados positivamente, e que serão assoreados, onde haverá o desenvolvimento de bancos de areia na zona subaérea da praia, que é de suma importância para o balanço sedimentar costeiro.

5 CONCLUSÃO

A região costeira sul brasileira é caracterizada por uma intensa atividade hidrodinâmica, e a praia da cidade de Matinhos não foge a esse padrão, apresentando trocas morfodinâmicas significativas. No entanto, devido à intensa urbanização e depreciação da área costeira, os processos erosivos foram intensificados, comprometendo toda a faixa praial da cidade. Diante desse cenário, foi analisado, proposto e iniciado um projeto de construção de interferências para reduzir esses impactos.

Ao construir o cenário pré-obra, pudemos obter uma compreensão da hidrodinâmica pretérita da praia, e com o cenário atual, podemos identificar aspectos e pontos críticos que poderão ser mais afetados ou beneficiados pela revitalização da orla.

Com base nos resultados, observamos que o processo de engordamento da praia sofrerá consideravelmente com a erosão devido às correntes litorâneas. No entanto, as obras, como o guia corrente da Avenida Paraná, atenuarão significativamente o impacto desse movimento, resultando na deposição de sedimentos na costa à direita do guia. No entanto, esse assoreamento acarretará no aumento do nível sedimentar do canal, ocasionando o assoreamento da desembocadura, podendo ser necessário futuramente realizar a dragagem da área.

O Pico de Matinhos é uma região com um forte impacto hidrodinâmico. No cenário anterior à obra, observamos uma intensa erosão nessa região. Ficou evidente que o Pico era afetado por correntes litorâneas provenientes de direções opostas, resultando em uma forte erosão nas praias. A construção do espigão para mitigar o efeito da corrente vinda do sul para o norte mostrou-se eficaz, provavelmente resultando em assoreamento entre o espigão e a ponta do pico.

Outro aspecto importante a ser destacado é que a faixa praial sofrerá erosão, no entanto, o balanço sedimentar decorrente da mudança na inclinação da praia começa a se mostrar mais efetivo em comparação ao passado. Mesmo com a erosão na linha da praia, há a deposição desses sedimentos deslocados, criando bancos de areia. Adicionalmente, é possível perceber a existência de um processo entre as duas obras rígidas, que pode indicar a ocorrência de um *bypass* de sedimentos do sul da praia Brava para o Pico de Matinhos e vice-versa.

A interação entre correntes e sedimentos foi simulada por meio do acoplamento dos modelos TELEMAC-3D e SISYPHE, utilizando uma malha construída com base em mapas e projetos. Além disso, foram incluídos dados adicionais adquiridos para analisar como esse processo pode modificar a costa.

É importante ressaltar que os dados apresentados neste trabalho possuem

limitações, uma vez que o modelo de ondas TOMAWAC, que considera a influencia do comportamento das ondas na costa, não foi utilizado nas simulações, ou seja, o efeito das ondas não foram incluídos neste trabalho. Além disso, os dados das obras baseiam-se nos projetos iniciais e não refletem as modificações realizadas no local durante o percurso da obra que até a conclusão deste trabalho ainda está em execução.

Portanto, esses resultados não devem ser utilizados como referência indicativa da mudança de estado morfodinâmico da região, e sim como referência de que mais estudos são necessários para realizar as análises adequadas para as praias paraenses. Adicionalmente, é necessário ter informações batimétricas atualizadas dos cenários atuais, geração de modelos de elevação digital e simulações de longo período do transporte sedimentar e a influencia das ondas no balanço sedimentar.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J. J. d. et al. Transporte sedimentar longitudinal e morfodinâmica praial: exemplo do litoral Norte de Santa Catarina. Florianópolis, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 11, 21.
- AIROLDI, L.; ABBIATI, M.; BECK, M. W.; HAWKINS, S. J.; JONSSON, P. R.; MARTIN, D.; MOSCHELLA, P. S.; SUNDELÖF, A.; THOMPSON, R. C.; ÅBERG, P. An ecological perspective on the deployment and design of low-crested and other hard coastal defence structures. **Coastal engineering**, Elsevier, v. 52, n. 10-11, p. 1073–1087, 2005. Citado 1 vez na página 15.
- ANGULO, R.; ANDRADE, J. d. Viabilidade de controle de erosão nas praias de Caiobá e Guaratuba. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 2, n. 1982, p. 681–693, 1982. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12, 21.
- ANGULO, R. J. As praias do Paraná: problemas decorrentes de uma ocupação inadequada. **Revista Paranaense de Desenvolvimento-RPD**, n. 99, p. 97–103, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 12, 17.
- AQUAMODELO. **Aquamodelo Consultoria e Engenharia. Memorial descritivo. Projeto Executivo de Proteção da Orla de Matinhos Revisão 2**. [S.l.]: Instituto de Água e Terra - IAT, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 20, 22.
- BRUUN, P. **Design and construction of mounds for breakwaters and coastal protection**. [S.l.]: Elsevier, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 15, 17.
- CALLIARI, L. J.; MUEHC, D.; HOEFEL, F. G.; TOLDO JR, E. Morfodinâmica praial: uma breve revisão. **Revista brasileira de oceanografia**, SciELO Brasil, v. 51, p. 63–78, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 11, 28.
- CARNEIRO, I. A. M. **Estudo hidro e morfodinâmico do impacto de alterações na configuração do Porto de Rio Grande**. 2009. Diss. (Mestrado). Citado 3 vezes nas páginas 30, 31.
- CIRM. **Comissão Interministerial para os Recursos do Mar**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/secirm/pt-br>. Acesso em: 15 agosto 2022. Citado 1 vez na página 15.
- COSTA, M. A. C. Caracterização e quadros de análise comparativa da governança metropolitana no Brasil: arranjos institucionais de gestão metropolitana (Componente 1): região metropolitana de Belém. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Presidência, 2015. Citado 1 vez na página 16.

DHN. **Diretoria Hidrografia e Náutica. Carta náutica 1824. Da Barra de Paranaguá à Antonina. Rio de Janeiro. 1 mapa: color.; 1108,7 x 757 mm. Escala 1:50.000.**

[S.l.: s.n.], 2007. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/bndo>. Acesso em: 05 agosto 2022. Citado 1 vez na página 20.

ENGELUND, F.; HANSEN, E. A monograph on sediment transport in alluvial streams. **Technical University of Denmark Østervoldgade 10, Copenhagen K., TEKNISKFORLAG Skelbreggade 4 Copenhagen V, Denmark., 1967.** Citado 2 vezes nas páginas 29, 30.

GOMES, F. V. Estratégia nacional para a gestão integrada da zona costeira em Portugal. Uma avaliação preliminar. In: II Congresso Ibero Americano de Gestão Integrada de Áreas Litorais. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 1 vez na página 15.

GOOGLE EARTH. **Matinhos - PR.** [S.l.]: Data SIO, NOAA, U.S. Navy. GEBCO, 2023. Citado 1 vez na página 20.

GOUVEIA SOUZA, C. R. de; GRACIELE DA COSTA, L. Unidades quaternárias e vegetação nativa de planície costeira e baixa encosta da Serra do Mar no litoral norte de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico (Descontinuada)**, v. 29, n. 1-2, p. 1–18, 2008. Citado 1 vez na página 11.

HERVOUET, J.-M. **Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. Citado 11 vezes nas páginas 24–29, 31.

IAPAR. **Instituto Agrônomo do Paraná. Cartas Climáticas do Estado do Paraná. Curitiba.** [S.l.: s.n.], 2000. Disponível em: <https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Atlas-Climatico>. Acesso em: 05 agosto 2022. Citado 1 vez na página 20.

IAT. **Memorial descritivo da Obra de Proteção da Orla de Matinhos.** [S.l.]: Instituto de Água e Terra - IAT, 2021. Citado 5 vezes nas páginas 12–14, 20.

KIRINUS, E. P.; TOMAS, G. P. ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS PROCESSOS EROSIVOS NA DESEMBOCADURA DO CANAL DO DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS E SANEAMENTO (DNOS) E ZONAS DE PRAIA PRÓXIMAS NO MUNICÍPIO PONTAL DO PARANÁ-PR. **X TOMO REDE BRASPOR**, Rede BRASPOR, v. 5, p. 83–101, 2021. Citado 1 vez na página 18.

KIRINUS, E. d. P. Estudo Numérico de Conversão da Energia Cinética das Correntes Marinhas em Energia Elétrica na Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 26, 29.

KLEIN, A. d. F.; SILVA, G. M. d.; FERREIRA, O.; DIAS, J. A. Beach sediment distribution for a headland bay coast. **Journal of Coastal Research**, JSTOR, p. 285–293, 2005. Citado 1 vez na página 13.

KOERNER, K.; OLIVEIRA, U.; GONÇALVES, G. Efeito de estruturas de contenção à erosão costeira sobre a linha de costa: Balneário Hermenegildo, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management**, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, v. 13, n. 4, p. 457–471, 2013. Citado 1 vez na página 16.

LOUREIRO FILHO, L. d. S. **A competência do município na zona costeira urbana**. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Citado 1 vez na página 16.

MARONE, E.; GUIMARÃES, M.; PRATA JR, V.; KLINGENFUSS, M.; CAMARGO, R. Caracterização física das condições oceanográficas, meteorológicas e costeiras das zonas estuarinas da Baía de Paranaguá, PR. In: ANALES del VI Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar. Mar del Plata, Argentina. [S.l.: s.n.], 1995. Citado 2 vezes nas páginas 20, 21.

METZGER, E. J.; HURLBURT, H. E.; WALLCRAFT, A. J.; CUMMINGS, J. A.; CHASSIGNET, E. P.; SMEDSTAD, O. M. Global ocean prediction using HYCOM. In: IEEE. 2006 HPCMP Users Group Conference (HPCMP-UGC'06). [S.l.: s.n.], 2006. P. 271–274. Citado 1 vez na página 35.

MOREIRA, D. L. DA HIDRODIÂMICA, OBSERVAÇÕES E MODELAGEM NUMÉRICA and DE SEDIMENTOS, EM MATINHOS PR, 2019. Citado 1 vez na página 18.

NABI, M. Computational modelling of three-dimensional bedform evolution. **River Flow 2010**, Karlsruhe, p. 905–912, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 30, 31.

NETTO, L. R.; BULHÕES, E. M. R. Distribuição e tipologia das obras costeiras no litoral Fluminense. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 2986–2991, 2017. Citado 1 vez na página 17.

NOERNBERG, M. A. Processos, orfodinâmicos no complexo estuarino de Paranaguá-Pr, Brasil: Um Estudo a Partir De Dados “in Situ” E Landsat-Tm. **Universidade Federal do Paraná**, 2001. Citado 1 vez na página 20.

NORDSTROM, K. F.; LAMPE, R.; JACKSON, N. L. Increasing the dynamism of coastal landforms by modifying shore protection methods: examples from the eastern German Baltic Sea Coast. **Environmental Conservation**, Cambridge University Press, v. 34, n. 3, p. 205–214, 2007. Citado 1 vez na página 15.

NOVAK, L. P.; LAMOUR, M. R. Avaliação do risco à erosão costeira em praias urbanizadas do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 22, n. 1, 2021. Citado 1 vez na página 13.

PAULA, D. P. de. EROSÃO COSTEIRA E ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO NO LITORAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA (CEARÁ, BRASIL): UM CONTRIBUTO PARA ARTIFICIALIZAÇÃO DO LITORAL. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 9, n. 1, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 13, 16.

RIJN, L. C. van. **Principles of coastal morphology**. [S.l.: s.n.], 1998. Citado 1 vez na página 11.

VILLARET, C.; HERVOUET, J.-M.; KOPMANN, R.; MERKEL, U.; DAVIES, A. G. Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system. **Computers & Geosciences**, Elsevier, v. 53, p. 105–113, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 28, 29.

ANEXOS

.1 PARAMETRIZAÇÃO

.1.1 TELEMACH3D

PARAMETER FILE FOR TELEMACH3D

FORTRAN FILE : fortran_hidro_2010.f95

GEOMETRY FILE :V6_utm.slf

BOUNDARY CONDITIONS FILE : v6.cli

BINARY DATABASE 1 FOR TIDE : './DATA_TPXO/h_tpxo7.2'

BINARY DATABASE 2 FOR TIDE : './DATA_TPXO/u_tpxo7.2'

3D RESULT FILE : c4_3d_pt1.slf

2D RESULT FILE : c4_2d_pt1.slf

COMPUTATION CONTINUED : NO

PARALLEL SIMULATION

PARALLEL PROCESSORS = 8

OPTIONS TO COUPLING WITH SISYPHE

COUPLING WITH = SISYPHE

SISYPHE STEERING FILE = sisyphe_teste_v6p3.str

GEOGRAPHIC SYSTEM

GEOGRAPHIC SYSTEM = 3

ZONE NUMBER IN GEOGRAPHIC SYSTEM = 22

OPTIONS TO THE TIME SIMULATION

ORIGINAL DATE OF TIME = 2019;1;1

ORIGINAL HOUR OF TIME = 0;0;0

NUMBER OF TIME STEPS = 10512000 TIME STEP = 3

GRAPHIC PRINTOUT PERIOD = 7200 LISTING PRINTOUT PERIOD = 1200

NUMBER OF HORIZONTAL LEVELS = 6

NUMBER OF TRACERS = 2

VARIABLES FOR 2D GRAPHIC PRINTOUTS = S,U,V,B,X,Y,W

VARIABLES FOR 3D GRAPHIC PRINTOUTS = H,Z,U,V,W,TA1,TA2

INITIAL AND LIQUID BOUNDARY CONDITIONS

INITIAL CONDITIONS : 'SPECIAL'

INITIAL ELEVATION = 0

INITIAL VALUES OF TRACERS : 35;20

PRESCRIBED FLOWRATES= 0;1

PRESCRIBED ELEVATIONS = 0.2;0.2

PRESCRIBED VELOCITIES= 0.15;0.2

PRESCRIBED TRACERS VALUES = 35;20;25;20

WATER DENSITY

AVERAGE WATER DENSITY = 1025

BETA EXPANSION COEFFICIENT FOR TRACERS = 0

DENSITY LAW : 3

NAMES OF TRACERS : 'SALINITY' ;'TEMPERATURE'

ATMOSPHERIC OPTIONS

AIR PRESSURE = YES

WIND = YES

WIND VELOCITY ALONG X = 5.D0

WIND VELOCITY ALONG Y = -5.D0

THRESHOLD DEPTH FOR WIND = 1

COEFFICIENT OF WIND INFLUENCE = 5.E-5

RAIN OR EVAPORATION IN MM PER DAY = 0

CORIOLIS AND GRAVITY OPTIONS

CORIOLIS = YES

CORIOLIS COEFFICIENT = -6.39320 E-5

GRAVITY ACCELERATION = 9.80665 D0

OPTION FOR TIDES

OPTIONS TO TURBULENCE

HORIZONTAL TURBULENCE MODEL = 3

COEFFICIENT FOR HORIZONTAL DIFFUSION OF VELOCITIES = 1.E-6

COEFFICIENT FOR HORIZONTAL DIFFUSION OF TRACERS = 1.E-6

VERTICAL TURBULENCE MODEL = 3

COEFFICIENT FOR VERTICAL DIFFUSION OF VELOCITIES = 1.E-6

COEFFICIENT FOR VERTICAL DIFFUSION OF TRACERS = 1.E-6

TURBULENCE MODEL FOR THE BOTTOM = 2

OPTIONS TO TREATMENT ON TIDAL FLATS

TIDAL FLATS : YES

OPTION FOR THE TREATMENT OF TIDAL FLATS = 1

TREATMENT ON TIDAL FLATS FOR VELOCITIES = 1

TREATMENT ON TIDAL FLATS FOR K-EPSILON = 1

TREATMENT ON TIDAL FLATS FOR TRACERS = 1

OPTIONS TO HYDROSTATIC INCONSISTENCY

HYDROSTATIC INCONSISTENCY FILTER : YES

OPTIONS TO DIFFUSION

DIFFUSION STEP = YES

SCHEME FOR DIFFUSION OF VELOCITIES = 1

SCHEME FOR DIFFUSION OF K-EPSILON = 1

SCHEME FOR DIFFUSION OF TRACERS = 1

OPTIONS TO PRECONDITIONINGS

PRECONDITIONING FOR DIFFUSION OF VELOCITIES = 34

PRECONDITIONING FOR DIFFUSION OF K-EPSILON = 34

PRECONDITIONING FOR DIFFUSION OF TRACERS = 34

PRECONDITIONING FOR VERTICAL VELOCITY = 34

PRECONDITIONING FOR PROPAGATION = 2

PRECONDITIONING FOR PROJECTION = 34

PRECONDITIONING FOR PPE = 34

OPTIONS TO SOLVERS

SOLVER FOR DIFFUSION OF VELOCITIES = 1

SOLVER FOR DIFFUSION OF K-EPSILON = 1

SOLVER FOR DIFFUSION OF TRACERS = 1

SOLVER FOR VERTICAL VELOCITY = 1

SOLVER FOR PROPAGATION = 1

SOLVER FOR PROJECTION = 1

SOLVER FOR PPE = 1

OPTIONS TO ADVECTION

ADVECTION STEP = YES

SCHEME FOR ADVECTION OF VELOCITIES = =1 / EPK 13 - leo postma
(14-murd) - 5 PSI

SCHEME FOR ADVECTION OF K-EPSILON = 1

SCHEME FOR ADVECTION OF TRACERS = 13

SCHEME FOR ADVECTION OF DEPTH = 5

TREATMENT OF NEGATIVE DEPTHS = 2

MASS-LUMPING FOR DEPTH = 1

TREATMENT OF FLUXES AT THE BOUNDARIES = 2;2;2

DYNAMIC BOUNDARY CONDITION = NO

OBS: TRATMENT TO TRACERS FLUX THROUGH THE BOUNDARIES

GENERAL SCREEN INFORMATIONS

MASS - BALANCE = YES

INFORMATION ABOUT MASS-BALANCE FOR EACH LISTING PRINTOUT =
=YES

BOTTOM FRICTION

LAW OF BOTTOM FRICTION = 4

FRICTION COEFFICIENT FOR THE BOTTOM = 0.04D0

LAW OF FRICTION ON LATERAL BOUNDARIES = 0

FRICTION COEFFICIENT FOR LATERAL SOLID BOUNDARIES = 0.D0

NUMBER OF ITERATIONS AND ACCURACY

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR PPE = 150000

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR PROJECTION = 150000

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR PROPAGATION = = 150000

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR VERTICAL VELOCITY = = 150000

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR DIFFUSION OF TRACERS = =
150000

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR DIFFUSION OF K-EPSILON = =
150000

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR DIFFUSION OF VELOCITIES = =
150000

ACCURACY FOR PPE = 1.E-6

ACCURACY FOR PROJECTION = 1.E-6

ACCURACY FOR PROPAGATION = 1.E-6

ACCURACY FOR VERTICAL VELOCITY = 1.E-6

ACCURACY FOR DIFFUSION OF TRACERS = 1.E-6

ACCURACY FOR DIFFUSION OF K-EPSILON = 1.E-6

ACCURACY FOR DIFFUSION OF VELOCITIES = 1.E-6

OTHERS

MATRIX STORAGE = 3

IMPLICITATION FOR DEPTH = 1.D0

IMPLICITATION FOR VELOCITIES = 1.D0
FREE SURFACE GRADIENT COMPATIBILITY = 0.9D0
TELEMAC-2D OPTIONS : 2;2
&ETA
&FIN

.1.2 SISYPHE

SISYPHE PARAMETERS FILE

INPUTS AND OUTPUTS

GEOMETRY FILE : V6_utm.slf
BOUNDARY CONDITIONS FILE : v6.cli
RESULTS FILE = sis_pt1.slf

PARALLEL PROCESSORS

PARALLEL PROCESSORS = 8

TIME DECLARATIONS

NUMBER OF TIME STEPS = 10512000 TIME STEP = 3
GRAPHIC PRINTOUT PERIOD = 7200
LISTING PRINTOUT PERIOD = 1200

OUTPUT VARIABLES

VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS ='U,V,H,S,B,E,KS,TOB,QSBL'

MASS BALANCE

MASS-BALANCE = YES
MASS CONCENTRATION = YES

NUMERICAL PARAMETERS

TIDAL FLATS = YES

OPTION FOR THE TREATMENT OF TIDAL FLATS = 1

PHYSICAL PARAMETERS

BED LOAD = YES

SUSPENSION = NO

SKIN FRICTION CORRECTION = 1

CORRECTION ON CONVECTION VELOCITY = YES

MASS-LUMPING = YES

REFERENCE CONCENTRATION FORMULA = 1

NUMBER OF LAYERS OF THE CONSOLIDATION MODEL = 9

MINIMAL VALUE OF THE WATER HEIGHT = 0

NUMBER OF SIZE-CLASSES OF BED MATERIAL = 1

LAW OF BOTTOM FRICTION = 1

BED-LOAD TRANSPORT FORMULA = 1

SEDIMENT DIAMETERS = 0.000160

INITIAL FRACTION FOR PARTICULAR SIZE CLASS = 1

ACTIVE LAYER THICKNESS = 10000

NON COHESIVE BED POROSITY = 0.4

OPTION FOR THE TREATMENT OF NON ERODABLE BEDS = 0

CRITICAL EVOLUTION RATIO = 1

FORMULA FOR DEVIATION = 1

PARAMETER FOR DEVIATION = 0.85

FORMULA FOR SLOPE EFFECT = 1

FRICTION ANGLE OF THE SEDIMENT = 40.

COHESIVE SEDIMENTS = NO

SEDIMENT DENSITY = 2650

NUMBER OF BED LOAD MODEL LAYERS = 2

MASS TRANSFER PER LAYER = 5.D-05

SYSTEM PARAMETERS

TYPE OF ADVECTION = 13

SOLVER = 3

SOLVER OPTION = 2

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR SOLVER = 150000

&ETA

&FIN