

Capítulo V

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





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

Eduardo de Paula Kirinus; Gustavo Pacheco Tomas

Universidade Federal do Paraná, Campus Pontal do Paraná, Centro de Estudos do Mar. Laboratório de Infraestrutura de Transportes e Obras Portuária. Endereço: Av. Beira-mar, s/n. Caixa Postal: 61. CEP: 83255-976. Pontal do Sul, Pontal do Paraná, Paraná, Brasil. ekirinus@ufpr.br (autor correspondente); gustavotomas@ufpr.br

RESUMO

No litoral do Paraná (Brasil), as praias do balneário Pontal do Paraná estão sofrendo graves processos erosivos. Frente a isto, o objetivo deste trabalho é avaliar opções de obras rígidas para mitigar a erosão. Sendo assim, 5 cenários de construção de molhes na região de estudo foram simulados com modelo tridimensional TELEMAC-3D acoplado ao modelo morfodinâmico SISYPHE. Os resultados foram avaliados frente as variações da hidrodinâmica local e adjacente, além das alterações no fundo. Como conclusão deste trabalho, o cenário Molhe5 é recomendado para reduzir os efeitos erosivos observados; entretanto, estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental devem ser realizados e também avaliada a transferência do contexto erosivo para barlamar da deriva litoral.

Palavras-chave: Modelagem hidrodinâmica; Modelagem morfodinâmica; Obras de Engenharia Costeira; TELEMAC-3D

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF EROSIVE PROCESSES IN THE MOUTH OF THE NATIONAL DEPARTMENT OF SANITARY CONSTRUCTION (DNOS) CHANNEL AND NEAR BEACH AREAS IN THE PONTAL DO PARANÁ-PR MUNICIPALITY

ABSTRACT

On the Paraná coast(Brazil), the beaches of the Pontal do Paraná are undergoing severe erosion processes. In view of this, this work aims to evaluate options for rigid measures to mitigate erosion. Thus, 5 jets designed scenarios in the study region were simulated with the three-dimensional TELEMAC-3D model coupled to the SISYPHE morphodynamic model. The results were evaluated against changes in local and adjacent hydrodynamics, in addition to changes in the bottom. As a conclusion of this work, the Molhe5 scenario is recommended to reduce the observed local erosive effects; however, technical, economic and environmental feasibility studies must be carried out and also evaluated the possible transfer of the erosion to the coastal adjacent areas located along the littoral drift.

Keywords: Hydrodynamic Modelling; Morfodynamic Modelling; Coastal Engineering projects; TELEMAC-3D

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, processos de erosão/sedimentação marinha têm sido observados nas praias do estado do Paraná, na região Sul do Brasil. Na região do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), a carga sedimentar é proveniente dos diversos cursos de água que desembocam no estuário. Outra condição existente ocorre em função das variações das marés, transportando sedimentos de dentro do estuário para a costa e vice-versa, com a alternância de fluxos de enchente e vazante.

As regiões de desembocaduras e baías têm como características uma morfodinâmica sedimentar intensa, podendo apresentar grandes variações da linha de costa nas praias próximas. Na área de estudo, o sedimento predominante é a área fina (LAMOUR, 2002); esse tipo de sedimento é normalmente transportado pelas correntes locais, sendo depositado nos pontos com menor velocidade formando bancos de areia na entrada da desembocadura.

O município de Pontal do Paraná possui aproximadamente 22,7 km de praias, sendo dividido em 8 balneários e tendo como uma das suas principais vocações o turismo de verão. O balneário localizado mais ao norte do município, chamado de Pontal do Sul, é conhecido como um dos principais pontos de partida para a Ilha do Mel, tendo seu embarque, localizado principalmente, junto ao rio Perequê e ao Canal do Departamento Nacional De Obras e Saneamento (DNOS), bem como apresentando uma série de marinas.

O Canal do DNOS (Figura 1) apresenta um comprimento de 20,11 km, considerando todos os canais afluentes, totalizando uma bacia hidrográfica de 27 km². O canal é responsável pelo escoamento da drenagem de diferentes balneários como

Shangri-lá, Atami e Pontal do Sul, além de receber as vazões do Rio Perequê e do Rio Perequê Mirim. O Canal do DNOS desemboca no Complexo Estuarino de Paranaguá, sendo suscetível à dinâmica de sedimentos do CEP. A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo, contendo o canal do DNOS que divide as praias de Pontal I à leste, e Pontal II que se estende até o terminal portuário do grupo Techint Engenharia e Construção.

O canal apresenta um trecho navegável próximo à sua desembocadura, permitindo o tráfego de embarcações, na desembocadura do canal existem 2 estruturas, sendo a maior estrutura um molhe, posicionado no lado leste (saindo do canal), em Pontal I. A construção está posicionada retilínea a 45° em relação ao norte, tendo cerca de 100 m de comprimento e formada por enrocamentos e núcleo de areia. O molhe foi construído há mais de 30 anos e tem sofrido com os efeitos de erosão ao longo do tempo. Sem a manutenção necessária, atualmente, a construção apresenta desgastes expressivos, com parte da sua composição (principalmente de finos) retirada pela ação das correntes e maré. Além disso, parte da crista da estrutura fica submersa com a variação da maré. A Figura 2 ilustra a atual condição do molhe.

O molhe de enrocamento construído na desembocadura do Canal do DNOS foi implementado para alinhar a direção das correntes e facilitar a navegabilidade no terminal de embarque para a Ilha do Mel. Como consequência, a implementação da obra permanente resultou na alteração das condições de dinâmica de sedimentos nas praias próximas. De acordo com o Atlas de Erosão Costeira do Estado do Paraná (ANGULO et al, 2004), após a construção do canal e do molhe, as zonas de praia próximas apresentaram sucessivos recuos, como descritos em Angulo (1993), Kruger et al. (1996) e APPA/CEM (2002).

Considerando a importância da estabilidade da desembocadura do Canal do DNOS para as condições socioeconômicas da região e os efeitos erosivos apresentados nas zonas de praia próximas, este estudo tem o objetivo de analisar os processos hidrossedimentológicos na desembocadura do

Canal do DNOS e nas zonas de praia próximas, com o intuito de verificar a estabilidade da desembocadura e mitigar os processos de erosão costeira. Adicionalmente, propor e avaliar obras costeiras visando reduzir os efeitos erosivos locais.

O molhe é um local bastante visitado por turistas e por pescadores. A atual infraestrutura da construção não apresenta nenhuma passarela nivelada ou condições de segurança para que pessoas transitem ao longo do molhe. Além disso, a obra é responsável pela manutenção da estabilidade da desembocadura do canal do DNOS, sendo importante para a navegação local, principalmente por conta do transporte de passageiros e cargas para a Ilha do Mel.

No lado esquerdo do canal, na área chamada de Pontal II, existe uma estrutura de menor porte, um guia de corrente. Diferente do molhe, o guia é constituído de pedras e pneus e não apresenta passarela para o trânsito de pessoas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo utiliza modelagem numérica tridimensional com a aplicação do sistema open TELEMAC-MASCARET. Neste trabalho foi utilizada a versão v6p2 do sistema TELEMAC. O sistema de modelagem utiliza uma abordagem modular, adotando-se o módulo hidrodinâmico tridimensional TELEMAC-3D acoplado internamente com o módulo morfodinâmico SISYPHE.

Módulo Hidrodinâmico - TELEMAC-3D

O sistema TELEMAC é formado por um conjunto de módulos, em duas ou três dimensões, que podem ser utilizados para o estudo de aspectos relacionados à hidrodinâmica, transporte de sedimentos e ondas geradas pelo vento em regiões costeiras e oceânicas. O TELEMAC-3D é o módulo do sistema TELEMAC que resolve as equações de Navier-Stokes assumindo ou não condições de pressão hidrostática. O modelo considera a evolução da superfície livre como função do tempo e utiliza equações de advecção e difusão para solucionar o sistema de equações.

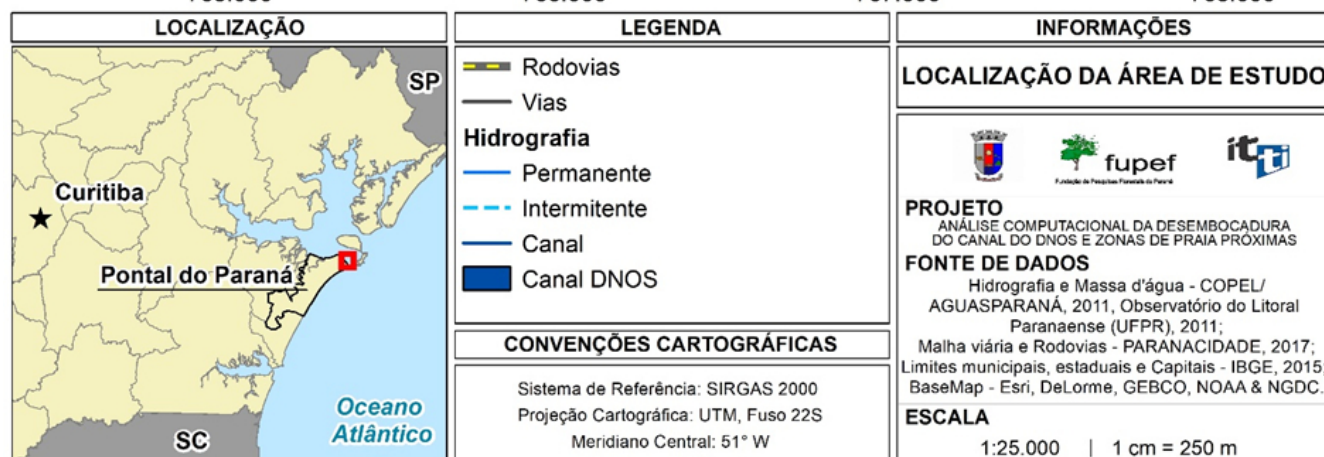


Figura 1. Posição do Canal do DNOS ao longo do balneário de Pontal do Sul, localizado na desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá. Fonte: Os Autores.



Figura 2. (A) Estruturas presentes na desembocadura do Canal do DNOS, sendo o molhe à direita do canal (Pontal I) com 107 m e o guia corrente ao lado esquerdo (Pontal II) com 170 m. (B) Atual condição do molhe na margem direita da desembocadura do canal do DNOS (2020), com perda do material fino e galgamento em parte da estrutura devido à alteração de maré.

Este módulo é utilizado para o estudo de aspectos relacionados à hidrodinâmica tridimensional de fluxos com superfície livre em rios, estuários, regiões costeiras e oceânicas. O modelo resolve as equações hidrodinâmicas tridimensionais considerando as suposições da conservação de massa e da quantidade de movimento, além da distribuição hidrostática e aproximação de Boussinesq. O TELEMAC-3D resolve as equações diferenciais utilizando o método de elementos finitos para a discretização espacial e discretização vertical em coordenadas sigma, de forma a acompanhar os limites superficiais e de fundo.

O Método dos Elementos Finitos (HERVOUET, 2007) é considerado o mais adequado para estudar sistemas compostos por diferentes compartimentos, como o Complexo Estuarino de Paranaguá e a região costeira adjacente. Este método permite uma melhor representação dos acentuados gradientes batimétricos, da discretização detalhada da linha de costa, além da aplicação de refinamentos diferenciados dentro da grade numérica, fato que, por consequência, otimiza o tempo computacional. Desta forma, é possível calcular a elevação do nível do mar, as componentes das velocidades de corrente e as concentrações dos traçadores em cada ponto do domínio computacional.

Todo o equacionamento do modelo TELEMAC-3D foi elaborado por Jean-Michel Hervouet e seus colaboradores que desenvolveram o sistema de modelagem em 1987 no Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia Elétrica Francesa (R&D-EDF). As equações são baseadas nas formulações de Navier-Stokes, um dos pilares da mecânica de fluidos, e informações mais detalhadas do seu equacionamento podem ser encontradas no livro “*Free surface flows: Modelling with the finite element methods*” (HERVOUET, 2007) e no manual do modelo (PHAM E JOLY, 2016).

Módulo Morfodinâmico - SISYPHE

O SISYPHE é um módulo de simulação de transporte de sedimentos e morfodinâmica que faz parte do sistema de modelagem numérica *open*

TELEMAC-MASCARET. Neste módulo, 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 função de vários fluxos (velocidade da água, profundidade da água, altura da onda, etc.), além de parâmetros do sedimento (diâmetro do grão, densidade relativa, velocidade de sedimentação, etc.).

A carga de material transportada junto ao fundo é calculada utilizando fórmulas clássicas de transporte de sedimentos provenientes da literatura. A carga em suspensão é determinada resolvendo uma equação de transporte adicional para a concentração de sedimentos em suspensão integrada na vertical. A equação de evolução do fundo (equação de Exner) pode ser resolvida usando elementos finitos ou através da formulação de volumes finitos, atualizando a batimetria a cada passo de tempo.

Neste trabalho, foi utilizada a opção de transporte sedimentar por carga de material transportada junto ao fundo, considerando as equações proposta por Meyer-Peter e Müller (MPM) (1948). Onde a tensão de cisalhamento do leito, decomposta em fricção superficial e arrasto de forma, pode ser calculada através da imposição de um coeficiente de atrito. 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; JIA et al., 2015). Informações mais detalhadas sobre o equacionamento do SISYPHE ou diferentes opções de configuração podem ser encontradas no manual técnico do SISYPHE (TASSI e VILLARET, 2014).

Modelo macro – litoral do Paraná

A malha de elementos finitos gerada para o Modelo Macro engloba a área de estudo em mesoescala, contendo a região costeira do Paraná e estados próximos, com profundidade máxima de aproximadamente 160 m (Figura 3). A malha contém 70.151 nós, transmitindo a informação da costa para dentro do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP). A grade possui uma maior

resolução próxima da linha de costa, o que permite uma análise mais refinada na região do estuário, chegando a 100m de distância entre cada ponto na região de estudo.

Os dados batimétricos oceânicos utilizados na malha provêm das cartas náuticas 23200 e 23300, fornecidas pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). Também foram adicionados os dados batimétricos do *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) para a região de estudo.

Os dados de velocidade das correntes foram utilizados para a calibração do modelo e são provenientes do banco de dados gratuito e de livre acesso do Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta). Adicionalmente, o ano de 2014 foi escolhido para conduzir a calibração do modelo por haver disponibilidade de dados por aproximadamente 4 meses de duração (Maio até Agosto).

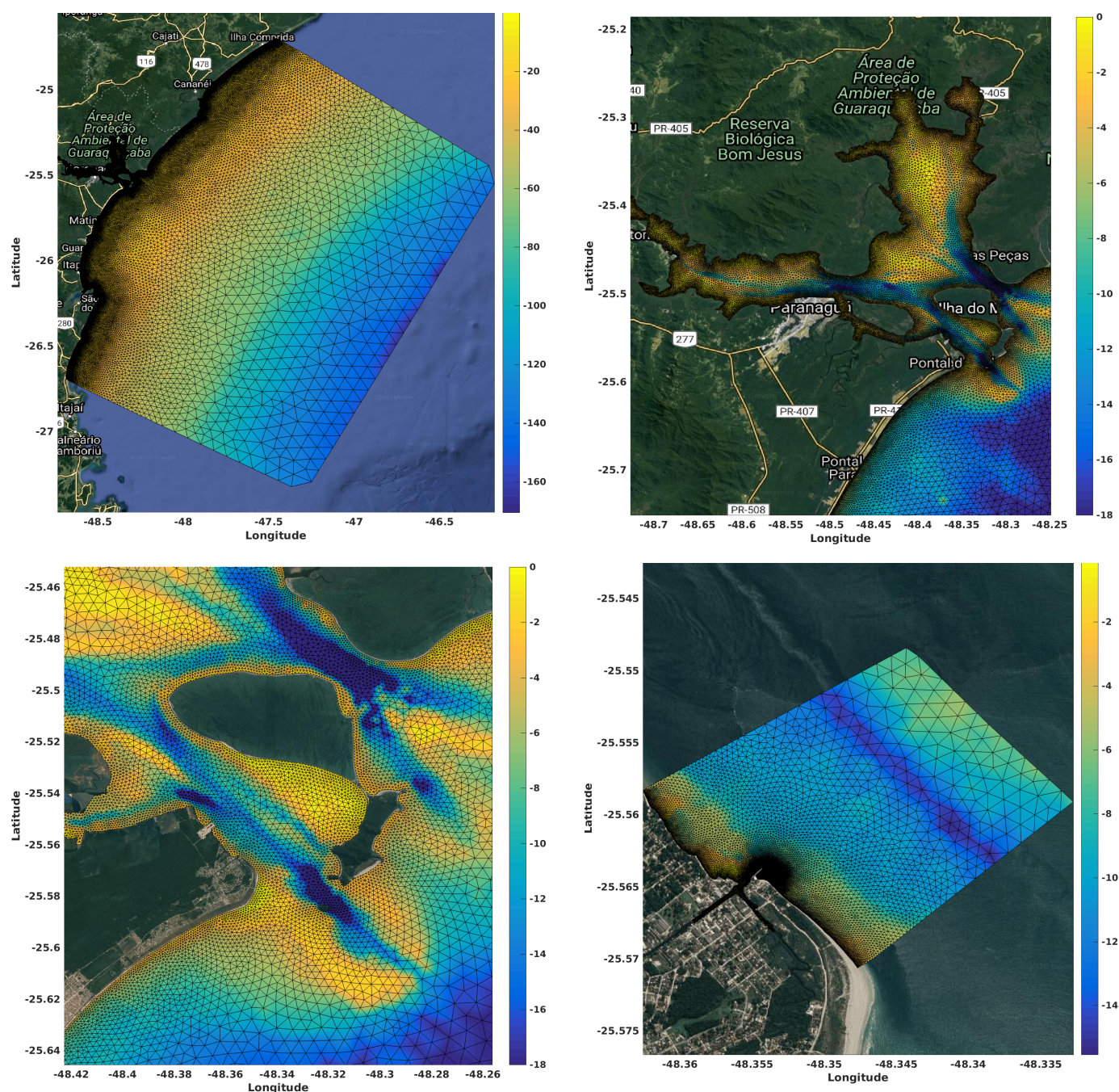


Figura 3. Malha computacional do modelo macro e a batimetria implementada (superior esquerdo); Detalhe da malha computacional do modelo macro na região do CEP com a batimetria implementada (superior direito); Detalhe da malha computacional do modelo macro na região de interesse (inferior esquerdo); Malha computacional do Modelo Local, com a batimetria implementada (inferior direito).

Modelo local – desembocadura do canal do DNOS

Mais refinada que o modelo macro, a malha de elementos finitos localiza-se na desembocadura do canal do DNOS, ao longo de uma área de aproximadamente 2 km² (Figura 3), com células com cerca de 1 m na região de interesse. Ao todo a malha contém 33.383 nós, permitindo a implementação de vazão de saída do canal e condições oceânicas e atmosféricas advindas do modelo macro.

Entretanto, para que esta malha numérica local esteja em condições de prescrever corretamente os processos observados em campo, se faz necessário um detalhamento batimétrico maior para atualização da malha local. Espacialmente, a malha do modelo está vinculada a coordenadas geográficas (latitude e longitude), sendo que no eixo vertical, a altitude está vinculada ao zero da régua da carta náutica da Marinha, que corresponde ao valor de -0,9 m em relação ao zero do IBGE.

Calibração do modelo

Para avaliar a implementação do Modelo Macro, foram realizadas uma série de verificações. Essas análises buscam identificar as inconsistências numéricas do modelo e sua performance. São avaliados a qualidade e precisão dos resultados hidrodinâmicos, através de uma comparação entre os dados observados em campo e os simulados pelo TELEMAR-3D. Para a concluir a calibração, foram tomados como base metodológica os trabalhos de Marques et al. (2017) e Kirinus et al. (2018).

Para avaliar as comparações executadas, foram utilizados indicadores de performance, assim como descritos em Sutherland et al. (2004), Marques et al. (2017) e Kirinus et al. (2018). A simulação realizada com o Modelo Macro foi comparada com os indicadores de performance, onde dados de velocidade da corrente foram comparados com os resultados do modelo numérico. O RMSE apresentou valor de 0,07 m/s enquanto que o MAE resultou em 0,05 m/s, ou seja, ambos os parâmetros se aproximam de zero indicando alta concordância entre os conjuntos de

dados analisados. Adicionalmente, o índice de concordância de Willmott resultou em 0,92, indicando excelente concordância entre modelo e observação.

Avaliação de zonas de risco de erosão acentuada

A vulnerabilidade pode ser definida como a susceptibilidade ou a pré-disposição intrínseca de um elemento ou sistema exposto a um efeito (KUMAR et al., 2010). As Zonas de erosão acentuada (ZEA) correspondem a regiões que apresentam desequilíbrio negativo no balanço sedimentar, ou seja, experimentam um transporte potencial de sedimentos sem ter um suprimento (aporte) adequado. São regiões que erodem mais rapidamente que as áreas adjacentes, ou mais rápido que o esperado. Diferentes indicadores podem ser utilizados para a estimativa das zonas de erosão acentuada, compondo um conjunto de observações considerando parâmetros qualitativos e quantitativos (BRIDGES, 1995).

Benedet et al. (2007) definem as ZEA como áreas que apresentam taxas erosivas pelo menos duas vezes maiores que a média geral da área avaliada, e que podem ser quantificadas comparando-se as perdas de volume (m³/m). Um critério semelhante foi utilizado por Araujo et al. (2010), onde as zonas de erosão acentuada foram determinadas como as regiões ou segmentos que apresentam taxas de variação negativas do volume local, em m³/m/ano, iguais ou maiores a 50% acima da média geral.

Neste estudo as zonas de erosão acentuada foram definidas como as que apresentam taxas de variação negativas do volume local, tendo sua intensidade classificada como baixa, moderada e alta, conforme o percentual do valor máximo de erosão da faixa referente ao valor da média geral, conforme apresentado no Quadro 1.

Cenários de modelagem

A utilização de modelos numéricos permite a simulação computacional da obra já finalizada, reduzindo as incertezas e ampliando o conceito da melhor configuração da obra prevista. As alterações dos fenômenos locais podem ser analisadas por

Quadro1 – Critério de risco de erosão acentuada

Risco de erosão acentuada	% da variação média geral do volume local
Baixa	Inferiores a 15%
Moderada	Entre 15% e 30%
Alta	Acima de 30%

meio da comparação de diferentes cenários.

O presente estudo considera a análise de 6 cenários para o Modelo Local, resumidos conforme o Tabela 1. O cenário base, também chamado de Cenário Natural (CN), corresponde à atual condição local, sem modificação do molhe. Todos os outros cenários apresentam diferentes configurações das estruturas da desembocadura, sendo simulados para o período de um ano. A Figura 16 ilustra a diferença entre os cenários.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo realizou as simulações abordando diferentes variáveis e cenários. O capítulo apresenta um resumo dos principais resultados obtidos em cada simulação, sendo apresentados por variáveis e gerando uma análise comparativa entre os diferentes cenários simulados. As variáveis abordadas são a velocidade da água próxima ao

leito, o atrito cisalhante atuante no leito e a evolução batimétrica do leito. Posteriormente, é apresentando o mapa de risco de erosão das praias adjacentes para condição natural.

A análise de velocidade da água no leito permite interpretar a origem das principais correntes que podem gerar efeitos erosivos. Os resultados de velocidade média compreendem a intensidade e a direção ao longo do período simulado, sendo apresentados na Figura 5 para os diferentes cenários. A intensidade máxima da velocidade, que pode ser gerada em tempestades, por exemplo, também deve ser verificada em busca de identificar os principais pontos suscetíveis à erosão no local de estudo, assim como o desvio padrão da velocidade.

Ao analisar a intensidade média das correntes em todos os cenários, percebemos a presença do padrão associado à variabilidade dos ventos em curto e médio prazo, responsáveis por

Tabela 1 - Cenários de implementação do modelo

Cenário	Característica das infraestruturas propostas
Natural	Sem alteração da condição atual das estruturas presentes
Molhe1	Revitalização do molhe atual, nova cota de coroamento para evitar galgamentos, manutenção da largura de passagem na crista, ajuste dos taludes e sem alteração no comprimento. Estrutura no lado esquerdo da desembocadura na condição natural.
Molhe2	Modernização do molhe atual, nova cota de coroamento para evitar galgamentos, ampliação da largura para passagem de maquinário, ajuste dos taludes, alteração no comprimento (adição de 6 metros) e implementação do <i>headland</i> . Estrutura no lado esquerdo da desembocadura na condição natural.
Molhe3	Modernização do molhe atual, nova cota de coroamento para evitar galgamentos, ampliação da largura para passagem de maquinário, ajuste dos taludes, alteração no comprimento (total de 230 metros), direcionamento curvo e implementação do <i>headland</i> . Estrutura no lado esquerdo da desembocadura na condição natural.
Molhe4	Mesmas condições do cenário Molhe2, adicionando a revitalização da estrutura no lado esquerdo da desembocadura, sem alteração de comprimento.
Molhe5	Mesmas condições do cenário Molhe3, adicionando a revitalização da estrutura no lado esquerdo da desembocadura, sem alteração de comprimento.

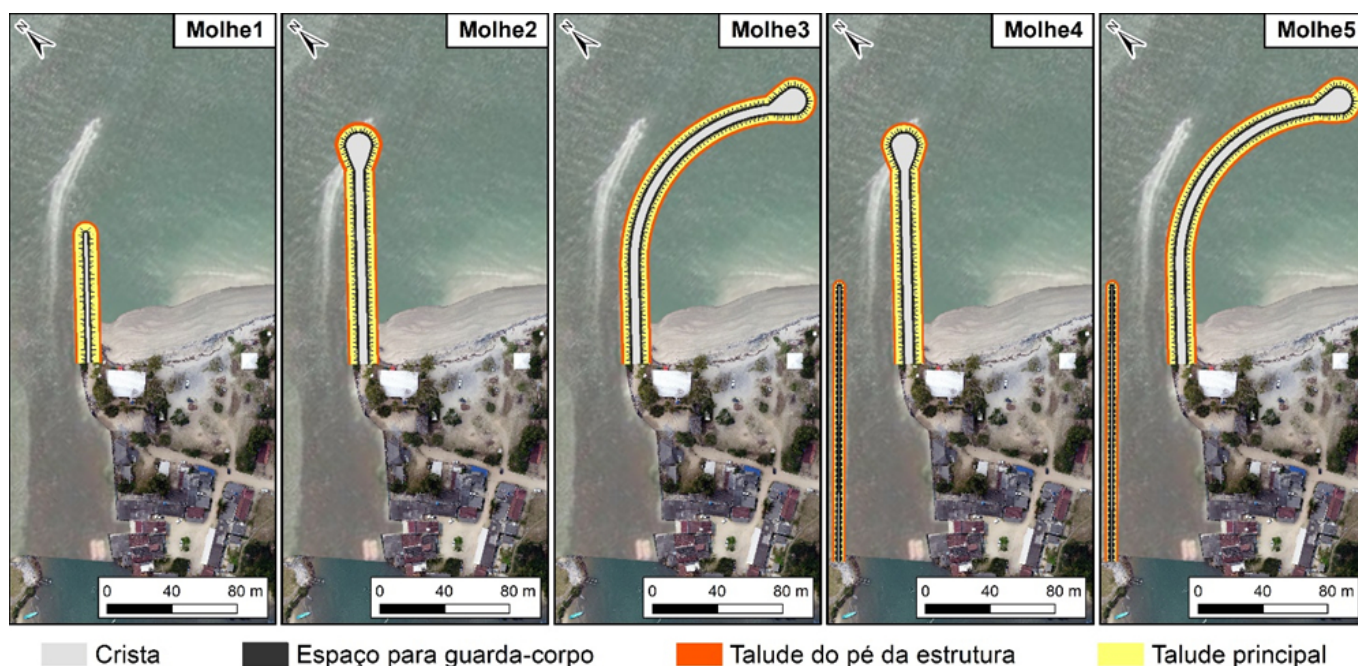


Figura 4. Cenários propostos para a desembocadura.

promover eventos de enchente e vazante neste setor do estuário. Pode-se observar que os valores de corrente médios superiores a 0,3 m/s ocorrem na zona de surf e espraçamento da praia de Pontal I, dentro do canal do DNOS, e na proximidade da estrutura rígida idealizada em cada cenário. A direção dominante das correntes, nestas escalas médias de variabilidade anual, ocorre no sentido Noroeste, seguindo a orientação da linha de costa, ou seja, no sentido de enchente ao estuário. Além disso, a região da desembocadura favorece a formação de padrões hidrodinâmicos particulares para cada caso, como células de circulação e vórtices nas regiões adjacentes.

Todos os cenários apresentam um padrão de deriva litorânea semelhantes, com correntes mais intensas próximas à desembocadura do estuário e Pontal I, enquanto que correntes fracas persistem na região de Pontal II. No caso do cenário natural (Figura 5), podemos observar que o molhe atual, com sua estrutura degradada, possui baixa eficácia em reter correntes longitudinais, mantendo um padrão de fluxo quase unidirecional de enchente. Na desembocadura, o molhe submerso apresenta também baixa eficácia em promover um fluxo unidirecional para a saída do canal, promovendo a dispersão do fluxo advindo do DNOS de forma difusa no sentido Norte-Noroeste.

A proposta de modernização do molhe em Pontal I (cenário Molhe 1, Figura 5b.), apresenta

uma leve melhora na resposta hidrodinâmica da deriva litorânea, ao afastar da costa o centro de alta velocidade presente na zona de surf, adicionalmente, criando uma breve extensão de regiões de baixa velocidade em ambos os lados do molhe, podendo promover uma sedimentação pontual nestas regiões.

No cenário Molhe 2 (Figura 5c.), percebe-se uma mudança evidente na dinâmica local devido à extensão do molhe e à proposta de uma ponta circular (headland). O núcleo da corrente de deriva litorânea sofre mudanças em sua direção, sendo agora direcionado para Norte-Noroeste, enquanto os cenários anteriores apontavam para Noroeste. Esta mudança sutil no direcionamento da corrente torna-se positiva pela proximidade com o canal de navegação portuário, além de reduzir a dinâmica na região de Pontal II, podendo promover processos de sedimentação na região.

O cenário com o molhe curvado (Molhe3, Figura 5d.), resultou em diferenças semelhantes às abordadas no cenário anterior, como na ponta da curva, onde ocorre a alteração da direção da corrente litorânea. Entretanto, a existência da curva promove uma zona de “sombra” na parte côncava do molhe, gerando a intensificação da sedimentação na região sombreada. Na região convexa do molhe curvo (*offshore*), ocorre uma zona com baixa velocidade, que deve gerar um aumento da sedimentação nesta região. A sedimentação nesse

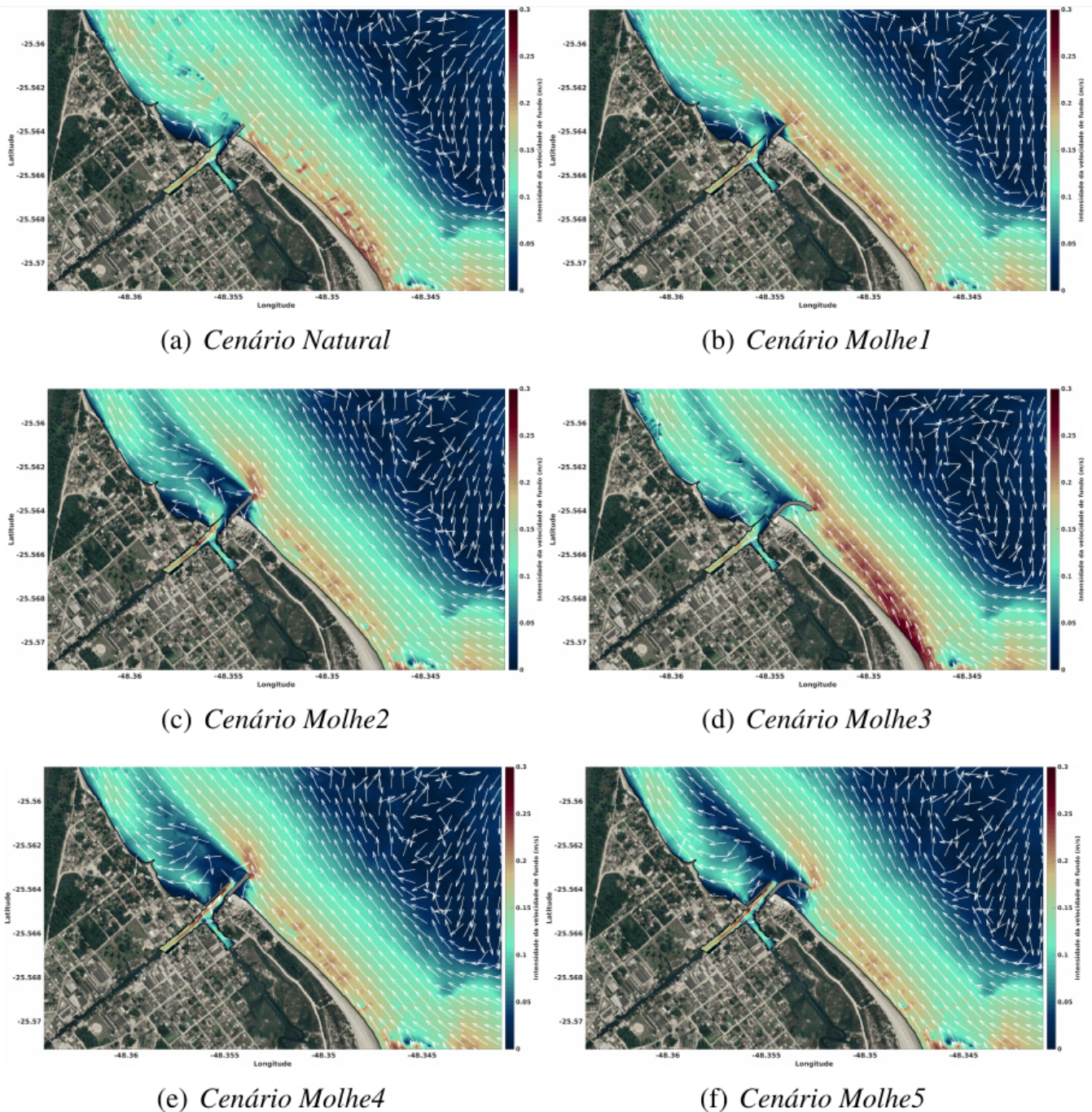


Figura 5. Média da velocidade de fundo (m/s) nos diferentes cenários.

ponto deve ser analisada podendo futuramente afetar a entrada do canal de navegação.

Nos cenários Molhe4 e Molhe5 (Figuras 5e. e 5f.), ocorrem poucas diferenças em relação aos cenários Molhe2 e Molhe3 do ponto de vista do molhe em Pontal I. Entretanto, ao analisar a região de Pontal II podemos observar a continuidade do escoamento do canal do DNOS até o final do molhe oeste, evitando que parte do fluxo entre diretamente na região sul de Pontal II, atenuando a intensidade das correntes.

A análise englobou o desvio padrão das

velocidades, que é um parâmetro estatístico que relaciona o quanto a intensidade da velocidade varia no período simulado (1 ano) em cada local. O resultado busca promover uma melhor abordagem para as obras costeiras definidas. Nesta variável em específico, é possível compreender as áreas de influência de cada cenário em função do escoamento hidrodinâmico local. O resultado visa mapear regiões de baixo desvio padrão, ou seja, regiões em que o escoamento variou pouco durante o período analisado.

Neste caso, um baixo desvio padrão indicará

que as velocidades variam pouco. Com a implementação das obras costeiras, as regiões de baixo desvio padrão indicam que as obras conseguem atuar em conformidade para diferentes condições atuantes ao longo do tempo. Em regiões de elevado desvio padrão da velocidade, o contrário será observado, verificando uma baixa atuação das estruturas propostas nesses locais. Os resultados das análises de desvio padrão da velocidade no local de estudo estão apresentadas na Figuras 6. Como resultado mais expressivo, o detalhe do resultado próximo da região da desembocadura para o

cenário Molhe5 está apresentado na Figura 7.

O desvio padrão das correntes de fundo (Figura 6) visa fornecer subsídios sobre a estabilidade do fluxo hidrodinâmico no assoalho marinho frente à existência das obras costeiras projetadas. Para região de Pontal I, para todos os cenários propostos observa-se a manutenção de um padrão similar do desvio de velocidade. Entretanto, em Pontal II os cenários com a presença do molhe esquerdo (Molhe4 e Molhe5) apresentam uma diferença entre os demais. Nestes casos, a presença de uma estrutura rígida na face oeste do canal,

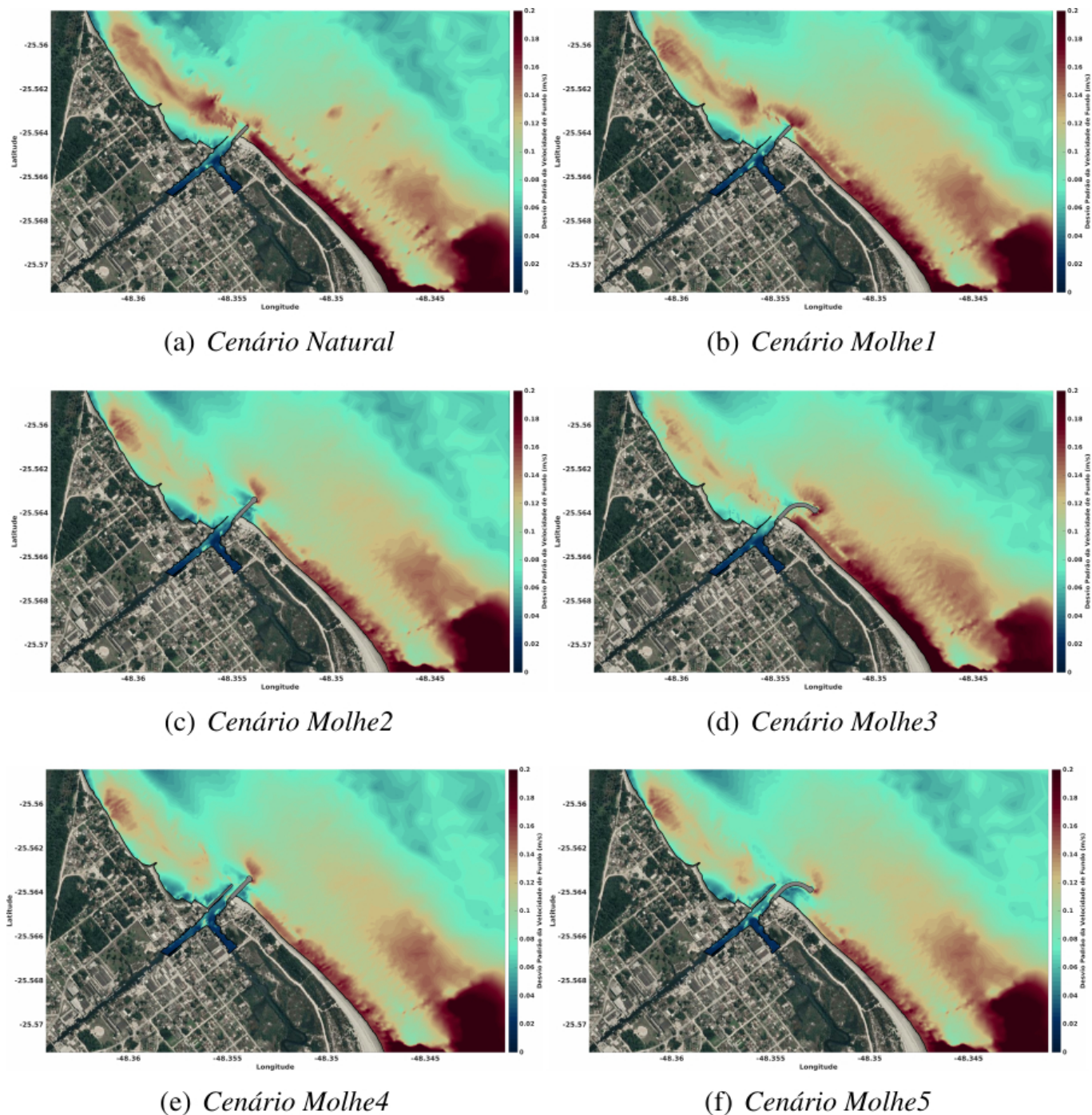


Figura 6. Desvio padrão da velocidade média do fundo (m/s) para os diferentes cenários.

fortalece o escoamento de saída natural do canal, promovendo a redução das correntes costeiras de fundo ao redor da estrutura. A implementação do molhe esquerdo deve intensificar processos de sedimentação nesta região promovendo assoreamento local e ampliação da praia.

Adicionalmente, analisando o molhe proposto em Pontal I, o desvio padrão da corrente de fundo demonstra a ocorrência de locais de baixo desvio padrão, ou seja, que mantém alta estabilidade durante o período estudado. Na Figura 7 é possível visualizar que nas regiões internas ao molhe curvo há uma zona de baixo desvio em relação aos outros cenários. Considerando os resultados de velocidade máxima, se prevê que neste local ocorrerá o aumento de processos de

sedimentação, ampliando a área de praia. Nos outros cenários este efeito é observado, mas em menor escala.

Para avaliar as alterações morfodinâmicas e os padrões do transporte sedimentar na região estudada, foi acoplado junto ao modelo hidrodinâmico um módulo morfodinâmico. Sendo o local de estudo localizado dentro do estuário e protegido da ação direta das ondas oceânicas, os padrões de evolução sedimentar no modelo consideraram apenas a influência da maré e correntes simuladas.

A figura 8 apresenta os resultados obtidos para o cenário natural e o cenário Molhe 5, sendo os valores positivos correspondentes ao efeito de sedimentação e os valores negativos à erosão do

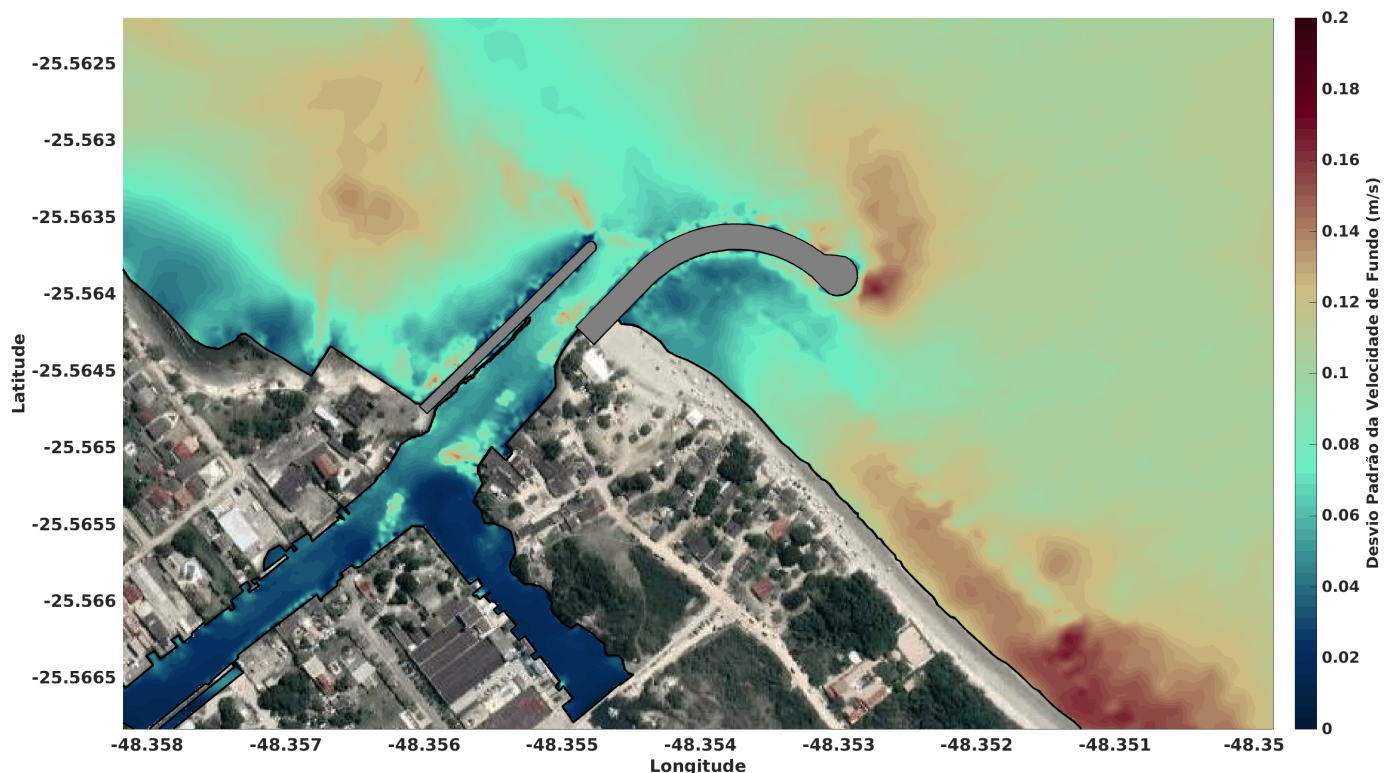


Figura 7. Desvio padrão da velocidade média do fundo para o cenário Molhe5 na região da desembocadura.

leito. A evolução morfodinâmica do leito apresenta as mudanças após o período de simulação. Em todos os cenários percebem-se padrões semelhantes, intercalando regiões de erosão e sedimentação, que configuram a formação de dunas, principalmente na região costeira mais afastada (em direção ao canal de navegação).

A erosão na zona de surf é distintamente ressaltada em todos os cenários, principalmente em

Pontal I. O cenário natural demonstrou que na atual condição, a região de Pontal I deve continuar a apresentar elevados níveis de erosão, superiores a 40 cm. O cenário Molhe1 demonstra que mesmo com a revitalização do molhe atual as condições do cenário natural devem se manter. O cenário Molhe2, mostra que a ampliação do molhe e a implantação do *headland* apresenta uma redução da erosão local próximo à área da obra, contudo

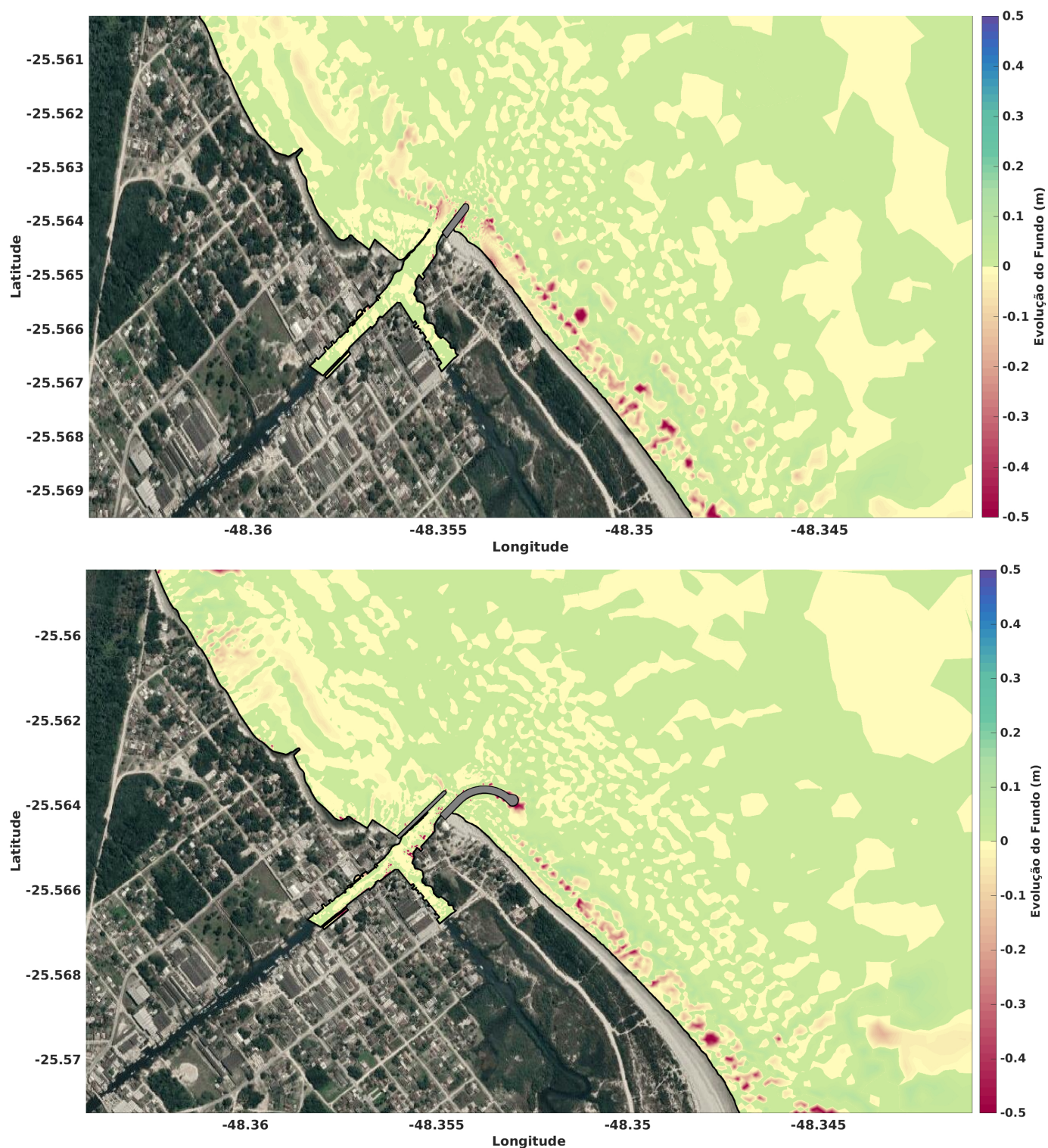


Figura 8. Evolução morfológica do leito – Cenário Natural (superior) e Cenário Molhe 5 (inferior).

muitas áreas da praia ficaram fora da condição de atuação do molhe. Com a implementação do molhe curvo, do cenário Molhe3, essa área de atuação foi ampliada, chegando próximo à região com a última edificação presente na frente de praia. Além disso, o efeito de sedimentação na região côncava do molhe foi ampliado, reduzindo a condição profunda (buraco) existente nesta região atualmente.

Analisando os resultados para região de

Pontal II, os efeitos de erosão são inferiores se comparados aos de Pontal I, apresentando valores entre 10 a 20 cm próximo ao molhe para os cenários natural e Molhe1. A implantação das estruturas em Pontal I, presentes nos cenários Molhe2 e Molhe3, apresentaram efeitos de atuação muito pequenos em Pontal II.

Com a implementação do molhe no lado oeste da desembocadura (em Pontal II), presente

nos cenários Molhe4 e Molhe5, o efeito de erosão da região próxima ao molhe foi reduzido para menos de 10 cm. Destaca-se que para a região mais afastada da desembocadura em Pontal II (próximo ao terminal da TECHINT), todos os cenários demonstraram que a região está propensa a processos erosivos. A zona de surf apresenta a maior erosão no local, podendo ter erosões superiores a 20 cm.

Utilizando os resultados da variação morfodinâmica no cenário natural e cada cenário idealizado, foi elaborado o mapa de risco de erosões acentuadas para o local de estudo. A Figura 9 mostra os pontos mais suscetíveis à erosão na faixa mais próxima a linha de costa na atual condição. Seguindo o mesmo critério foi avaliado a condição para o cenário Molhe5, permitindo a verificação das alterações provocadas pela

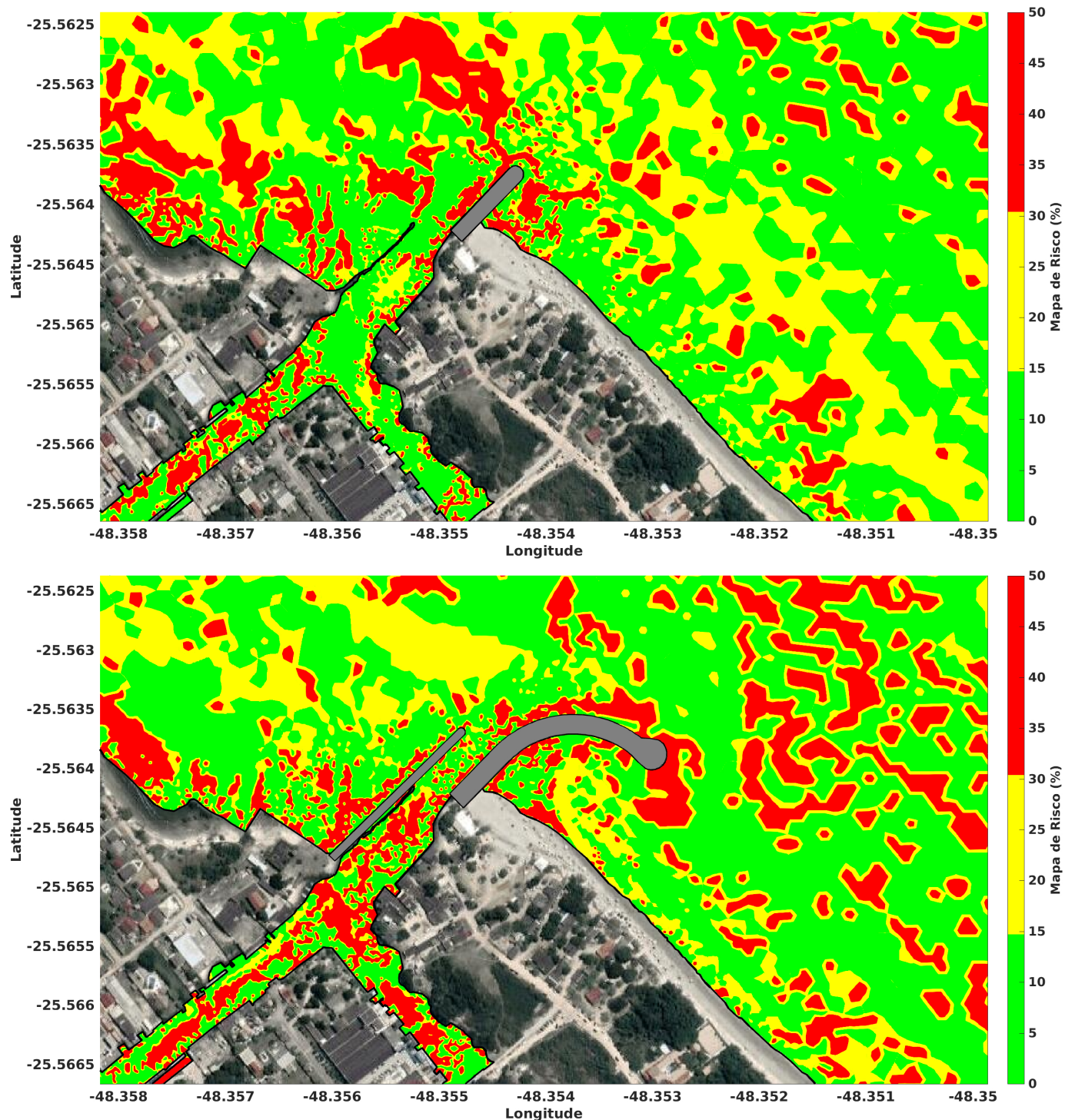


Figura 9. Zoom no local da desembocadura do mapa de risco de erosão – Cenário Natural (superior) e Cenário Molhe5 (inferior).

implementação das estruturas.

Comparando a Figura 9 pode-se verificar a redução da intensidade das zonas de risco. A implementação do molhe curvo em Pontal I (Figura 9, inferior) dissipou a condição elevada existente junto ao atual molhe e nas áreas mais próximas, orientando a formação de pontos de erosão acentuados fora da zona de surf local. Além disso, a implementação não apresentou alterações significativas as zonas mais distantes, reduzindo possíveis impactos ambientais. O molhe em Pontal II produziu um efeito semelhante, reduzindo a área de elevado risco próxima ao canal de navegação. Dentro do canal de navegação, com o direcionamento do escoamento, a intensidade foi ampliada, gerando um aumento da erosão local e reduzindo a necessidade de dragagens.

Observando a região da desembocadura, podemos observar a redução do risco à erosão no interior do Molhe 5 (Figura 9 inferior), em relação ao cenário Natural (Figura 9 superior). A diferença entre estes dois cenários foi calculada objetivando ressaltar padrões entre os cenários. Na figura 10, podemos observar a porcentagem de risco de erosão entre os dois cenários, resultando em zonas reduzidas de alto risco erosivo, ou seja, dentre estes cenários, a proposta do Molhe 5 resultará em zonas de risco reduzido a erosão em relação ao cenário

atual existente. Sendo assim, a coloração vermelha representa predomínio de processos erosivos no cenário natural sobre o cenário Molhe5. Adicionalmente, haverá redução de risco erosivo na região de Pontal II.

Adicionalmente, a coloração verde indica predomínio de processos erosivos no cenário Molhe 5 sobre o cenário natural. Em regiões de interesse este processo erosivo pode ser útil, como dentro do canal do DNOS, onde o sedimento pode ser mais facilmente transportado devido à obra idealizada. Em frente ao molhe curvo, prevalece processos erosivos intensos devido a presença do molhe. Por outro lado, na região côncava da curva, a erosão é mais acentuada no cenário natural do que no molhe 5.

CONCLUSÕES

O presente estudo abordou a elaboração de um modelo numérico para verificação da dinâmica hidromorfológica da desembocadura do Canal do DNOS e das praias adjacentes. A modelagem desenvolvida utilizou parâmetros medidos em campo e dados secundários, representando as principais forçantes presentes ao longo da área de estudo. Foram implementados 6 cenários distintos, sendo o primeiro com a condição atual da área de

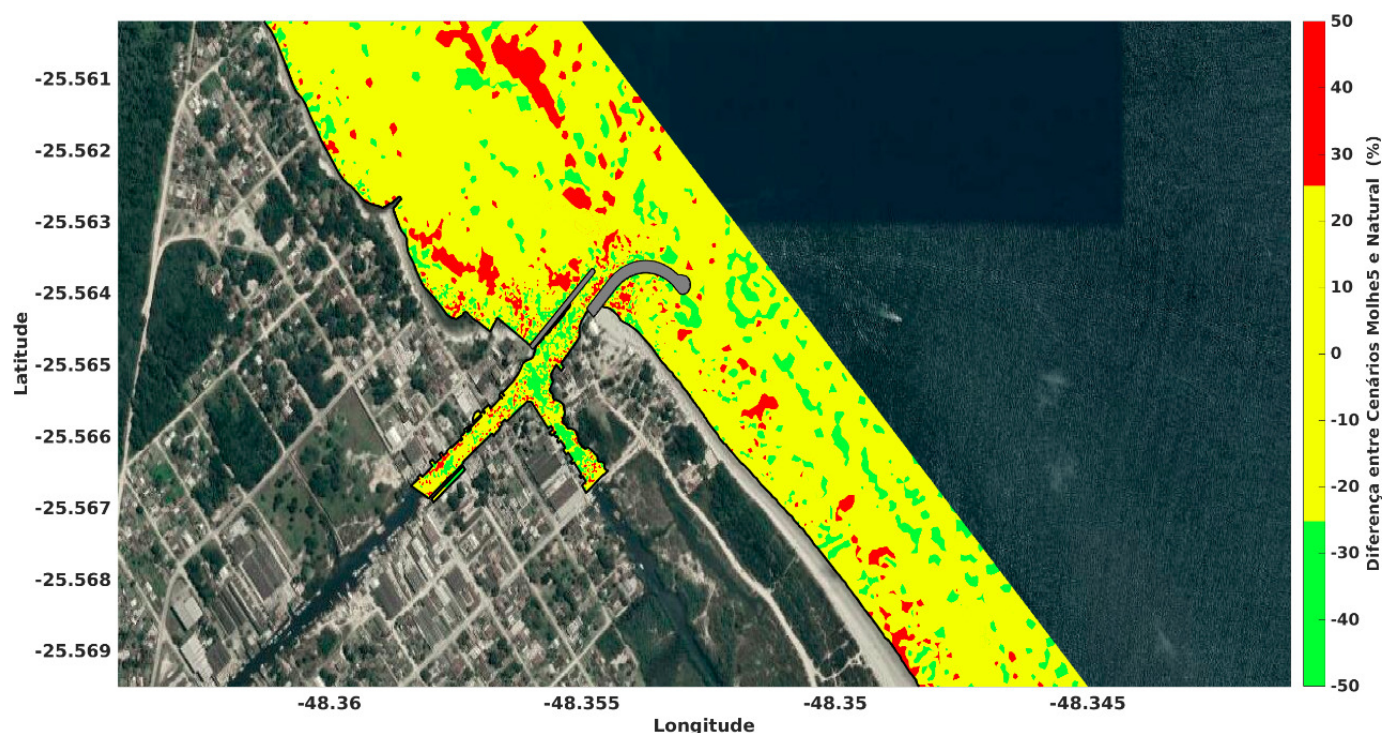


Figura 10. Diferença do risco de erosão entre o cenário Natural e o cenário Molhe 5.

estudo (Cenário Natural) e os demais com a implementação de obras costeiras.

Os resultados provenientes do Cenário Natural permitem avaliar a necessidade da realização de ações que alterem a dinâmica hidromorfológica local. A atual condição promove erosões na área de Pontal I e II, comprometendo a estabilidade da linha de costa e, conseqüentemente, das estruturas mais próximas. A avaliação das zonas de erosão acentuadas reforça a necessidade de mudanças na dinâmica de sedimentos local. Verifica-se que as tensões de cisalhamento mais intensas ocorrem na região próxima ao atual molhe, sendo um dos fatores predominantes para atual condição de desgaste da estrutura.

Vistos os resultados de todas as alternativas, recomenda-se para o local a implementação de 2 estruturas junto à desembocadura. A estrutura localizada em Pontal I deve avançar longitudinalmente junto a linha de costa para ampliar o trecho de atuação ao longo da zona de praia, a configuração pode ser curva, como proposto no estudo, ou com outra configuração que mantenha o mesmo efeito. A estrutura em Pontal II deve ser elevada, evitando seu galgamento e concentrando a vazão do canal do DNOS dentro do canal, evitando acelerações dentro da área de Pontal II.

Salienta-se que as estruturas propostas não foram detalhadas, sendo necessários estudos específicos para analisar sua viabilidade técnica, econômica e ambiental. Além disso, deve-se implementar um plano de sinalização para a navegação, durante as obras e permanentemente, garantindo a segurança da navegação na desembocadura e do trânsito de pessoas ao longo da estrutura.

REFERÊNCIAS

ANGULO R. J. (1993). A ocupação Urbana do Litoral Paranaense e As Variações da Linha de Costa. *Boletim Paranaense de Geociências*, Curitiba.

ANGULO, R. J. ; SOARES, C. R. ; MARONE, E. ; SOUZA, M. C. ; ODRESKY, L. L. ;

NOERNBERG, M. A. . Atlas de erosão costeira do Estado do Paraná. In: Dieter Muehe. (Org.). *Atlas de erosão e progradação do litoral do Brasil*. 1ed. Rio de Janeiro: , 2004, v. 1, p. 1-45.

APPA/CEM. (2002). Atualização da posição da linha de costa na desembocadura da Baía de Paranaguá. Pontal do Paraná, *Relatório Técnico* 30/02.

ARAUJO, R.S.; SPROVIEIRI, F.C.; FREITAS, D. & KLEIN, A.H.F. (2010). Variation in Beach Morphology and Identification of an Erosional Hot Spot at Itapocorói Bay, SC. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.* 14(1): 29-38. ISSN 1808-7035

BENEDET, L.; FINKL, C.W.; HARTOG, W.M. 2007. Processes Controlling Development of Erosional Hot Spots on a Beach Nourishment Project. *Journal of Coastal Research*, v.23, n.1, p. 33-48.

BRIDGES, M.H. (1995). Analysis of the Processes Creating Erosional Hot Spots in Beach Nourishment Projects. Coastal & Oceanographic Engineering Program. University of Florida, Gainesville, FL. 135p.

HERVOUET, J.-M. (2007). Hydrodynamics of Free Surface FLOws. Modelling with the Finite Element Method.

JIA, M., TASSI, P., & HUYBRECHTS, N. (2015). Numerical study of the influence of waves and tidal currents on the sediment dynamics in the vicinity of the Somme Bay area (France). In Moulinec, C. e Emerson, D. R., editors, *XXIIth TELEMAR-MASCARET User Conference*, pages 28–35, Warrington, UK. STFC Daresbury Laboratory.

KIRINUS, E. D. P., OLEINIK, P. H., COSTI, J., & MARQUES, W. C. (2018). Long-term simulations for ocean energy off the Brazilian coast. *Energy*, 163:364–382.

KRUEGER C. P., SOARES C. R., MARONE E., RIESEMBERG C. E., PILATI F. P., KRUGER M. M., PRADO A., MASUKO H. A. (1996). Levantamento com GPS da linha de costa na área erosiva da Ponta do Poço (PR). In. *Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário*, 2, Florianópolis (SC).

KUMAR, T. SRINIVASA, MAHENDRA, R.S.; NAYAK, SHAILESH, RADHAKRISHNAN, K., & SAHU, K.C. (2010). Coastal Vulnerability

Assessment for Orissa State, East Coast of India.
Journal of Coastal Research 26. doi: 10.2112/09-1186.1

LAMOUR, M. R. (2002). Dinâmica Sedimentar do Canal da Galheta Via de Acesso ao Porto de Paranaguá, Estado do Paraná. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Paraná.

MARQUES, W., STRINGARI, C., KIRINUS, E., MÖLLER, O., TOLDO, E., ANDRADE, M. (2017). Numerical modeling of the Tramandaí beach oil spill, Brazil—Case study for January 2012 event. *Applied Ocean Research*, 65:178–191.

PHAM, C.-T. & JOLY, A. (2016). TELEMAC MODELLING SYSTEM: TELEMAC-3D Software - OPERATING MANUAL. Technical report, EDF, Chateau, France.

SUTHERLAND, J., PEET, A. H., & SOULSBY, R. L. (2004). Evaluating the performance of morphological models. *Coastal Engineering*, 51(8-9):917–939.

TASSI, P. & VILLARET, C. (2014). Sisyphe v6.3 User's Manual. Technical report, EDF, Chateau, France.

VILLARET, C., HERVOUET, J.-M., KOPMANN, R., MERKEL, U., & DAVIES, A. G. (2013). Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system. *Computers & Geosciences*, 53:105– 113.