

## Digital Twin Porto do Rio Grande (DT – PORTO): Construindo Prevenção e Resiliência

### Resumo

As regiões costeiras estão entre as áreas mais vulneráveis às alterações climáticas globais e aos eventos extremos. As metodologias convencionais de monitoramento e previsão destas regiões, entretanto, geralmente não estão disponíveis aos gestores, tomadores de decisão e autoridades portuárias com a urgência necessária. Este trabalho apresenta o Digital Twin Porto do Rio Grande (DT – PORTO) como uma importante ferramenta de prevenção e resiliência para gestores, formuladores de políticas públicas e autoridades portuárias encarregadas de gerenciar áreas portuárias complexas sob condições de eventos extremos, contribuindo para a definição de estratégias de mitigação das mudanças climáticas e de adaptação/preparação para desastres naturais. O estudo de caso do DT – PORTO foi o evento de inundação de maio de 2024 e suas implicações para o Porto Organizado do Rio Grande, que foi promovido a um porto inteligente que utiliza sistemas de monitoramento e previsão de última geração para garantir uma operação segura e resiliente durante eventos extremos, contribuindo para a segurança da sociedade, do meio ambiente e da economia da região. Além disso, os resultados indicam o potencial de expansão do conceito DT – PORTO para outros portos no Brasil, o que contribuirá sobremaneira para a resiliência e sustentabilidade do País frente aos eventos extremos.

**Palavras-chave:** gêmeos digitais, modelos numéricos, inteligência artificial, modelos de inundação, portos.

### Abstract

Coastal regions are among the most vulnerable areas to global climate change and extreme events. Conventional monitoring and forecasting methodologies in these regions, however, are generally not available to managers, decision makers and port authorities with the necessary urgency. This work presents the Digital Twin Porto do Rio Grande (DT – PORTO) as an important prevention and resilience tool for managers, public policy makers and port authorities in charge of managing complex port areas under conditions of extreme events, contributing to the definition of strategies for mitigating climate change and adapting/preparing for natural disasters. The DT – PORTO case study was the May 2024 flood event and its implications for the Rio Grande Organized Port, which has been promoted to a smart port that uses state-of-the-art monitoring and forecasting systems to ensure safe operation and resilience during extreme events, contributing to the security of the society, the environment and the region's economy. Furthermore, results indicated the potential for expanding the DT – PORTO concept to other ports in Brazil, which will greatly contribute to the country's resilience and sustainability in the face of extreme events.

**Keywords:** digital twins; numerical models; artificial intelligence; flood models; ports

## 1. Introdução

As regiões costeiras estão entre as áreas mais vulneráveis às alterações climáticas globais e aos eventos extremos (IPCC, 2023). As metodologias convencionais de monitoramento e previsão destas regiões que geram alertas de desastres naturais com precisão e rapidez, entretanto, geralmente não estão disponíveis aos gestores, tomadores de decisão e autoridades portuárias com a urgência necessária.

Neste contexto, foi proposta uma estrutura virtual qualificada e inovadora para a avaliação, prognóstico e mitigação de riscos de eventos extremos em regiões portuárias, garantindo a segurança da população e das infraestruturas, e possibilitando seu desenvolvimento sustentável e resiliente. O *Digital Twin* Porto do Rio Grande (DT – PORTO) oferece para a região a geração de dados e previsões a respeito das condições hidrodinâmicas e do potencial de inundação com alta resolução espacial e temporal com base em uma estrutura computacional inovadora que combina dados meteorológicos, oceanográficos e geodésicos com modelos numéricos e computacionais que fornecem uma réplica virtual do ambiente natural, a Lagoa dos Patos e o Porto do Rio Grande.

O estudo de caso que deu origem a esta proposta inovadora foi o evento extremo de inundação que ocorreu na região sul do Brasil em maio de 2024. Nesta ocasião, a cidade de Rio Grande se beneficiou de dados de nível, previsões numéricas do comportamento hidrodinâmico da Lagoa dos Patos e de resultados de um modelo computacional de inundação para avaliar as melhores alternativas para a segurança da população e infraestrutura da cidade, garantindo mobilidade e segurança durante a maior catástrofe natural dos últimos séculos (Fernandes et al., submetido) e aproximando o paradigma do risco de inundações aos gestores e defesas civis da região.

O sucesso desta solução inovadora nos levou a aplicar esta ferramenta na área do Porto Organizado do Rio Grande, visando definir potenciais áreas de inundação, cotas de segurança para a operação dos diferentes terminais, áreas de livre ou restrito acesso, o tipo de veículo que poderia ser utilizado em cada uma destas áreas e medidas de segurança em relação à drenagem e bacias de contenção em áreas que recebem produtos tóxicos, promovendo o Porto do Rio Grande a um porto inteligente que utiliza sistemas de monitoramento e previsão para garantir uma operação segura e resiliente durante eventos extremos.

Atualmente, o conceito do DT – PORTO funcionando em tempo real e de forma prognóstica está sendo consolidado no Centro Interinstitucional de Observação e Previsão de Eventos Extremos (CIEEX). A operação em tempo real e a aplicação de processos informacionais e comunicativos garantirá que a autoridade portuária do Porto do Rio Grande e demais empresas e instituições localizadas às margens do estuário da Lagoa dos Patos, possam fazer uso deste conhecimento no planejamento de suas atividades diárias, bem como estar melhor preparados para enfrentar futuros eventos extremos. Além disso, a capacidade prognóstica do DT - PORTO permitirá

investigar o impacto de obras estruturais que estão sendo consideradas para reduzir os riscos de inundação sobre importantes aspectos econômicos, ambientais e sociais na Lagoa dos Patos e na área do Porto Organizado do Rio Grande antes que qualquer intervenção seja efetivamente implementada no ambiente.

## 2. Referencial teórico

As regiões costeiras (e as regiões portuárias nelas inseridas) estão entre as áreas mais vulneráveis aos impactos das alterações climáticas globais, com suscetibilidade direta a eventos climáticos extremos (IPCC, 2023). Estes eventos afetam vários problemas de segurança para as populações costeiras devido à ocorrência de ondas mais altas e ao aumento do nível do mar na costa, fortes precipitações e inundações, e condições de ventos severos. Portanto, regiões costeiras sujeitas a forte vulnerabilidade ambiental e socioeconômica requerem estudo científico dedicado e focado no desenvolvimento de ferramentas que apoiem a emissão de alertas de risco, visando mitigar os efeitos dos desastres naturais, minimizar os danos à sociedade e promover a resiliência e a sustentabilidade das regiões atingidas.

As metodologias convencionais de monitoramento da dinâmica das regiões costeiras que geram alertas de desastres naturais com precisão e rapidez, no entanto, normalmente utilizam abordagens somente baseadas em dados de campo e fornecem informações geralmente limitadas no espaço e no tempo. Além disso, essas informações valiosas muitas vezes não estão prontamente disponíveis para gestores municipais e portuários e para as forças de segurança da região. Outro limitante é a escassez de produtos cartográficos adequados para representar os territórios onde os processos produzem impactos. Estas limitações tornam-se particularmente importantes nos países em desenvolvimento, resultando numa compreensão insuficiente da variabilidade espaço-temporal da dinâmica costeira e suas regiões portuárias, o que torna difícil prever como estas áreas responderão a eventos meteorológicos e hidrológicos extremos, e como os seus efeitos podem ser mitigados.

O conceito de Modelos *Digital Twin* é um protótipo de modelo de uma entidade real, o gêmeo físico, que utiliza dados existentes e previsões computacionais ao longo do tempo (Barbie et al., 2021), fornecendo uma réplica virtual do ambiente natural (Pillai et al., 2022), e resultando em informações valiosas para a intervenção aplicada. A aplicação de *Digital Twin's* expandiu-se consideravelmente na última década devido ao rápido crescimento de técnicas relacionadas à computação de bancos de dados, inteligência artificial e Internet das Coisas (IoT) (Voosen, 2020), e a principal justificativa para seu uso é que experimentar cenários no ambiente virtual é muito mais vantajoso econômica e ambientalmente do que realizar testes no mundo real.

Atualmente, estão sendo implementados Modelos *Digital Twin* em escala relativamente grande para cidades, oceanos e até mesmo toda a Terra (Voosen, 2020; Pias et al. 2024). No contexto do *Digital Twin Ocean* (DITTO, 2024; European Commission, 2022), a replicação das propriedades e comportamentos dos sistemas marinhos permite simular cenários alternativos e fornece subsídios para a tomada de

decisões. [Barbie et al., \(2021\)](#) propuseram uma abordagem de protótipo *Digital Twin* para o Mar Báltico avaliada em diferentes cenários no ambiente subaquático extremo. Os autores concluíram que o protótipo representa uma abordagem viável para operar redes *ad-hoc* para observação oceânica e costeira. Um *Digital Twin* da Terra foi proposto por [Duque & Brovelli \(2022\)](#) considerando modelos digitais de alta precisão da Terra para monitorar e simular fenômenos naturais e atividades humanas relacionadas, sendo capaz de explorar o passado, compreender o presente e construir modelos preditivos do futuro. [Jeong & Lee \(2023\)](#) propuseram um *Digital Twin* baseado em uma modelagem de circulação rio-costa-oceano do Mar da Ilha de Seto para realizar simulações eficientes em escalas variadas. Uma rede híbrida profunda para estimativa da altura significativa das ondas usando informações espaciais e temporais sobre o campo de vento na área de interesse, a fim de superar deficiências de dados de campo ausentes, foi proposta por [Patanè et al. \(2024\)](#). Da mesma forma, um método para melhorar o reconhecimento do risco costeiro através da avaliação de veículos aéreos não tripulados (UAVs) para monitorar a precisão e a implementação de uma estrutura de *Digital Twin* foi proposto por [Yuan et al. \(2024\)](#). Os seus resultados melhoraram a acessibilidade, promovendo o envolvimento e a sensibilização da comunidade e a capacidade de prever e simular riscos potenciais em tempo real, e oferecendo uma estratégia inovadora para mitigar as ameaças costeiras. Não é de conhecimento, entretanto, a aplicação do conceito *Digital Twin* para garantir a operação segura de portos e nem promover a resiliência destes ambientes durante eventos extremos.

Assim, uma solução inovadora associada a recursos tecnológicos integrados e de livre acesso como um *Digital Twin* pode ser valiosa para a (re)construção de portos inteligentes, contribuindo para a avaliação, prognóstico e definição de estratégias de mitigação do impacto de eventos extremos, e tornando o Porto do Rio Grande uma referência no contexto nacional e internacional. Neste trabalho, apresentamos uma estrutura inovadora para avaliar riscos de eventos extremos em zonas costeiras e áreas portuárias baseada em um conjunto de dados meteorológicos, oceanográficos e geodésicos combinados com modelos numéricos e métodos de Inteligência Artificial (IA) que fornecem uma réplica virtual do ambiente natural, o *Digital Twin* Porto do Rio Grande (DT – PORTO).

Esta metodologia foi concebida e amplamente testada durante o evento extremo de inundação que ocorreu no sul do Brasil em maio de 2024, que está sendo considerado o maior evento de inundação em 125 anos de dados ([Collischonn et al., 2024](#)), e deve servir como um aviso à sociedade de que, apesar do ceticismo ou negação a respeito das alterações climáticas, a mitigação e a adaptação para lidar com a crise climática em curso são urgentemente necessárias. O número de mortos ou desaparecidos foi de 213 pessoas, com 2,4 milhões de pessoas afetadas, incluindo 600 mil deslocadas e perdas sem precedentes em infraestruturas urbanas e rurais, incluindo a pecuária ([Valério & Overbeck, 2024](#)), e produzindo inundações severas em todas as cidades às margens da Lagoa dos Patos.

Durante o evento, chuvas extremamente fortes resultaram numa precipitação acumulada de 652 mm (até 900 mm em algumas áreas) durante 35 dias, com 444 mm

caindo apenas nos 8 dias anteriores ao pico da cheia, quantidades normalmente esperadas ao longo de cerca de meio ano, em todos os 8,4 milhões de hectares de bacias hidrográficas que formam o delta do rio Jacuí e o lago Guaíba, onde fica a região metropolitana de Porto Alegre (Valério & Overbeck, 2024).

A consolidação dos métodos aplicados e validados durante o evento de enchente de maio de 2024 no ambiente virtual do DT - PORTO fornece uma solução inovadora inédita para uma tomada de decisão mais abrangente e precisa na área do Porto Organizado do Rio Grande durante eventos extremos, contribuindo para a segurança da sociedade, da economia e do meio ambiente. Logo, o DT – PORTO se apresenta como uma importante ferramenta de prevenção e resiliência para gestores, formuladores de políticas públicas e autoridades portuárias encarregadas de gerenciar áreas portuárias complexas sob condições de eventos extremos, contribuindo para a definição de estratégias de mitigação das mudanças climáticas e de adaptação/preparação para desastres naturais. Por outro lado, o funcionamento em tempo real do DT - PORTO consolida uma capacidade de simular não somente o impacto de eventos futuros de enchente sobre a estrutura portuária, mas também os impactos de projetos estruturais em consideração para a região através da simulação de cenários. Além disso, a expansão do conceito de portos inteligentes para outros portos no Brasil contribuirá sobremaneira para a resiliência e sustentabilidade do País.

Em consonância com as demandas relacionadas aos eventos extremos, está sendo criado o Centro Interinstitucional de Observação e Previsão de Eventos Extremos (CIEEX), onde o DT – PORTO funcionará em tempo real e de forma prognóstica, tornando-se uma referência no Estado do RS e no País na temática dos eventos extremos e seus impactos em regiões portuárias. O CIEEX atuará de forma integrada às Salas de Situação Regional e Estadual, e funcionará em conexão com o 3º Batalhão de Bombeiros Militar – Região Sul, sediado em Rio Grande, e com a Marinha do Brasil, fornecendo avisos e alertas para as defesas civis, prefeituras dos municípios às margens da Lagoa dos Patos e autoridade portuária.

### 3. Metodologia

A aplicação do DT - PORTO para o Porto Organizado do Rio Grande, localizado na região estuarina da Lagoa dos Patos, durante o evento de enchente de maio de 2024 esteve baseada na integração de dados da Rede de Monitoramento dos Níveis da Lagoa dos Patos com resultados de um modelo hidrodinâmico que calcula o nível e as correntes no corpo hídrico, um modelo digital de elevação de terreno e um modelo de inundação desenvolvido com base em métodos de Inteligência Artificial.

A **Figura 1** apresenta o conceito do DT – PORTO e a sequência metodológica do método aplicado ao Porto Organizado do Rio Grande durante o evento de inundação de maio de 2024. O modelo digital de elevação do terreno obtido através de levantamento Laser Scanner (**Fig. 1A**) recebe as previsões de nível calculadas pelo modelo hidrodinâmico para o canal de acesso nas áreas delimitadas (**Figs. 1B e 1C**), que foram validadas através da comparação entre resultados do modelo e dados de nível medidos na estação CCMAR (**Fig. 1D**). Posteriormente, o modelo computacional

de segmentação gera as condições de inundação que definem as Plantas de Segurança de cada região do Porto Organizado de Rio Grande (Fig. 1E).

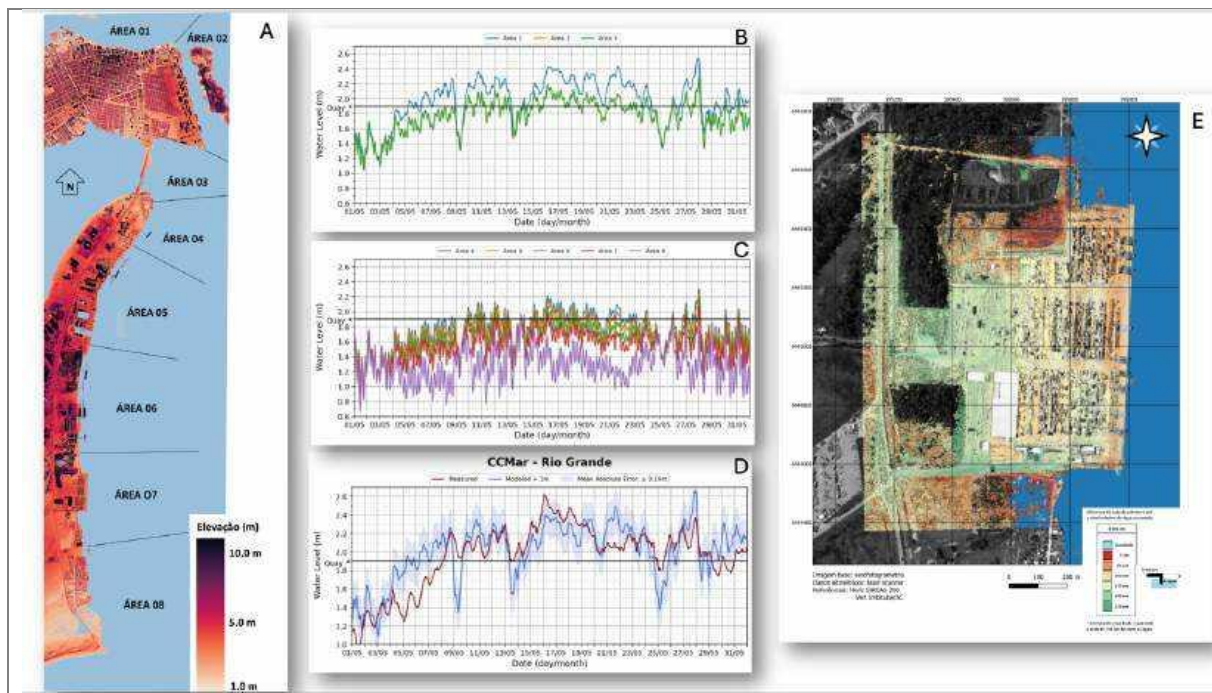


Figura 1 – O conceito do DT – PORTO aplicado à enchente de maio de 2024 no Porto do Rio Grande. A) Modelo Digital de Elevação de Terreno para a área do Porto Organizado do Rio Grande ilustrando a divisão de áreas de onde foram coletadas as previsões de nível calculadas pelo Modelo Hidrodinâmico para o canal de navegação no (B) Porto Novo e (C) Super Porto, validadas através da comparação com dados medidos na estação CCMAR (D), que resultaram em Plantas de Segurança para os diferentes Terminais. E) Ilustra a Planta de Segurança do TECON no dia 16 de maio, quando foram registrados no canal os níveis mais altos do evento de inundação de maio de 2024 na estação CCMAR.

### 3.1. Rede de Monitoramento de Nível da Lagoa dos Patos

A Rede de Monitoramento de Nível da Lagoa dos Patos será composta por 12 dispositivos de baixo custo conceituados como linígrafos automatizados utilizando visão computacional, que estão sendo instalados nas margens da Lagoa dos Patos (Fig. 2).

O equipamento é composto por uma régua linimétrica rigidamente fixada, que é observada continuamente por uma câmera digital cujo sensor opera na faixa do infravermelho próximo. Uma unidade de processamento detecta a superfície da água em sua intersecção com o plano da régua e utiliza uma relação previamente calibrada entre a coordenada do pixel no espaço da imagem e a escala da régua. O sistema também armazena arquivos fotográficos em períodos programados para permitir a verificação dos valores registrados a qualquer momento. Os dados do dispositivo de Rio Grande (estação CCMAR) já fazem parte do Portal Hidro, integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH (<https://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/serieHistorica.aspx>), e foram amplamente utilizados durante a inundação de maio de 2024, e as demais estações estão em fase

de implementação. A instalação da Rede de Nível da Lagoa dos Patos é financiada pela Portos RS através do Programa de Monitoramento Ambiental Continuado da Biota Aquática e Modelagem Hidro-Sedimentar da Hidrovia da Lagoa dos Patos.

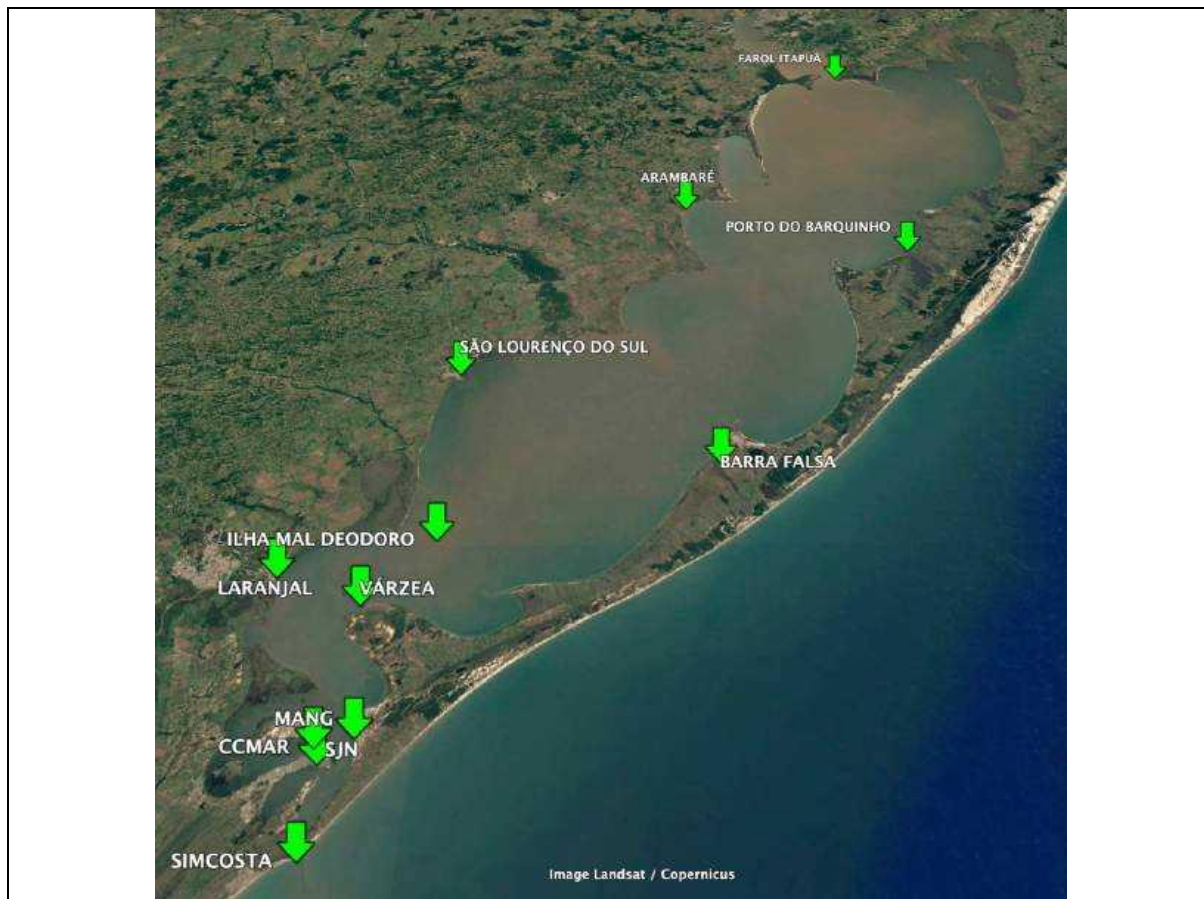


Figura 2 - Estações da Rede de Monitoramento do Nível da Lagoa dos Patos.

### 3.2. O modelo numérico hidrodinâmico

O sistema Open TELEMAC-MASCARET ([www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)) é um conjunto integrado de modelos numéricos para o estudo de fluxos de superfície livre. O TELEMAC-3D resolve as equações promediadas de Navier-Stokes e considera as aproximações de Boussinesq e Hidrostática (Hervouet, 2007; Villaret et al., 2013). O modelo é baseado no método dos elementos finitos, permitindo um alto refinamento da grade numérica em locais de interesse do domínio. As coordenadas Sigma são usadas para discretização vertical, permitindo uma representação precisa de gradientes batimétricos complexos e morfologia. Portanto, o modelo numérico TELEMAC-3D é adequado para aplicação em áreas complexas, como áreas costeiras, estuários e lagoas.

Embora o Modelo TELEMAC-3D venha sendo aplicado no Sul do Brasil nos últimos 20 anos, a enchente de maio-junho de 2024 foi a primeira vez que este modelo foi aplicado na forma prognóstica para prever a hidrodinâmica da Lagoa dos Patos. O domínio numérico deste estudo abrangeu a região entre 29,5° – 35,5°S e 48° – 54°W,

incluindo a Lagoa dos Patos, seu estuário e uma área oceânica até 2300 m de profundidade (Fig. 3A). Este grande domínio computacional faz-se necessário para que condições de contorno de modelos de maior escala possam ser utilizadas. O domínio foi discretizado com uma grade computacional não-estruturada que utiliza elementos finitos triangulares de tamanho variável (Fig. 3B), utilizando o software BlueKenue ([//www.nrcnrc.gc.ca/eng/solutions/advisory/blue\\_kenue\\_index.html](http://www.nrcnrc.gc.ca/eng/solutions/advisory/blue_kenue_index.html)). A grade numérica utilizada para o evento de enchente de maio-junho de 2024 era composta por 52.098 pontos e 7 níveis Sigma.

As condições iniciais e de contorno do modelo hidrodinâmico abrangem: (a) dados do nível do mar e campos de velocidade obtidos pelo Sistema de Inversão de Marés OSU, que é implementado internamente no modelo TELEMAC-3D, fornecendo 33 componentes harmônicos de maré; (b) campos de salinidade e temperatura do Projeto Global HYCOM + NCODA (Modelo Híbrido de Coordenadas Oceânicas, <https://hycom.org>), com resolução temporal e espacial de 3 h e 0,08°, respectivamente; c) dados de vento do ECMWF (Centro Europeu de Previsão Meteorológica de Médio Prazo, <http://www.ecmwf.int>) ERA-Interim, com resolução temporal e espacial de 1 h e 11 km, respectivamente; d) dados de vazão dos principais afluentes (rios Guaíba e Camaquã, Fig. 3A), fornecidos por modelo hidrológico de grandes bacias (Pontes et al., 2017) para realizar modelagem de vazão em toda a bacia hidrográfica (Lopes et al., 2018; Giacomelli et al., 2019). Para o Canal São Gonçalo (Fig. 3A) os dados foram fornecidos pela Agência Lagoa Mirim (<https://wp.ufpel.edu.br/alm/agencia>).

O modelo TELEMAC-3D foi amplamente aplicado e extensivamente calibrado e validado para a Lagoa dos Patos e plataforma continental adjacente (Antônio et al., 2020; Bitencourt et al., 2020; Fernandes et al., 2002, 2021; Franzen et al., 2023; Lisboa et al., 2022; Marques et al., 2009). Especificamente durante o evento de enchente de maio-junho de 2024, a validação do modelo forneceu resultados excelentes (Fernandes et al., submetido) e foi realizada com dados de nível nas estações CCMAR (*Mean Absolute Error* MAE  $\pm$  0,19 m), Laranjal (MAE  $\pm$  0,13 m) e São Lourenço do Sul (MAE  $\pm$  0,09 m) (Fig. 2).

### 3.3. O modelo computacional de inundação

A base de dados fundamental para o modelo de inundação é um Modelo Digital de Elevação. Para a cidade de Rio Grande, o Modelo Digital de Elevação foi obtido por tecnologia Laser Scanner em sistemas aéreos tripulados (Fig. 4A), onde um emissor de luz propaga feixes a partir da plataforma aérea em direção ao solo e a interação deste sinal com os objetos na superfície da Terra determina uma parcela de reflexão que será medida por um receptor altamente sensível (Fig. 4B). As propriedades deste sistema permitem a determinação com alta precisão das coordenadas dos pontos impressionados pelo feixe nos dois pulsos (emitido e refletido), além da intensidade do sinal recebido e de sua fase, que são indicadores do tipo de superfície no qual incidiu.

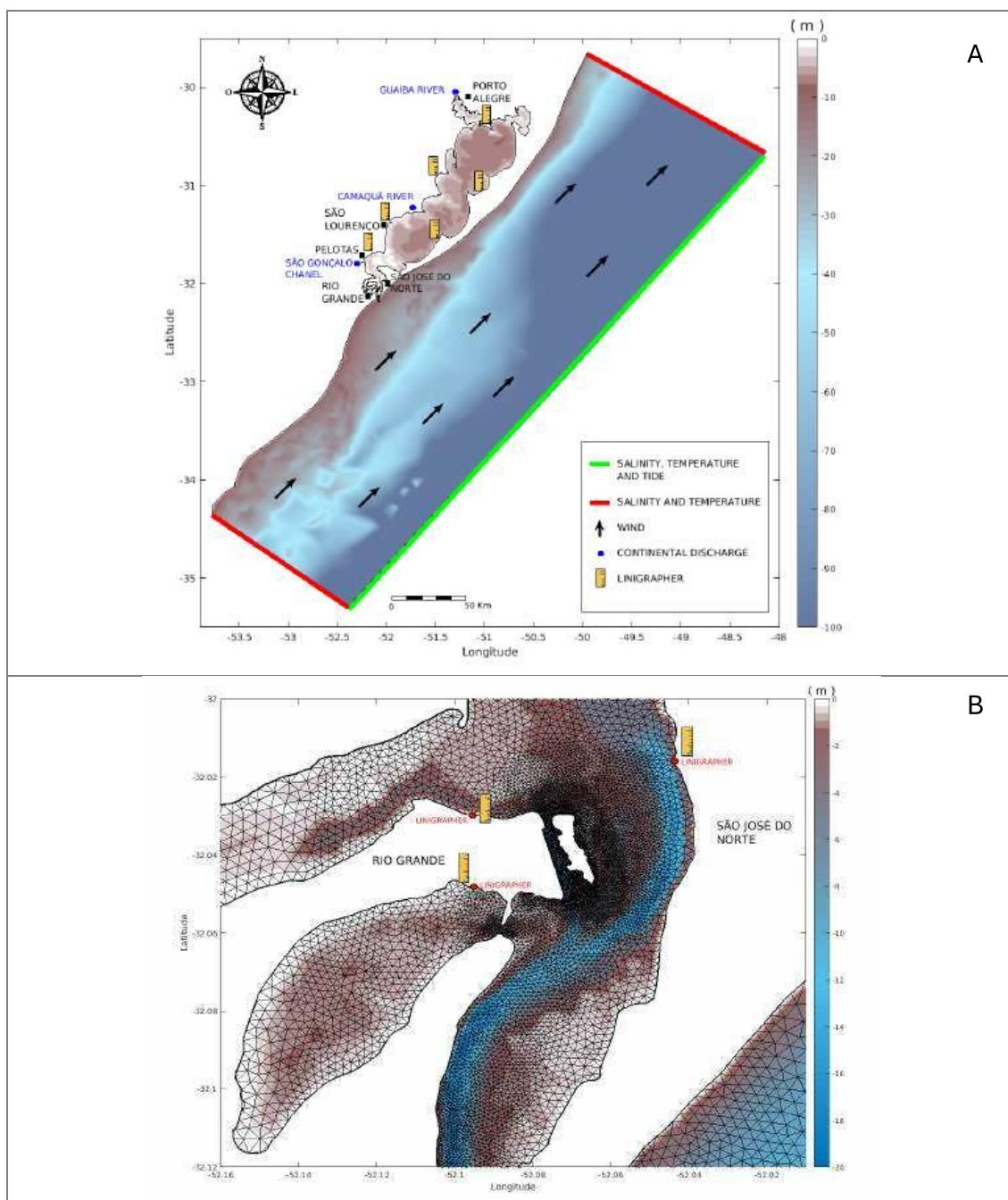


Figura 3 - A) Lagoa dos Patos e o domínio computacional identificando o tipo e localização das condições de contorno prescritas para o Modelo TELEMAC – 3D. B) Zoom da área ao redor do município de Rio Grande acompanhado de ilustração da grade computacional de elementos finitos do modelo numérico. A escala de cores representa a batimetria da área. As régua representam as estações da Rede de Monitoramento do Nível da Lagoa dos Patos.

Os dados foram registrados em arquivos específicos padronizados, conhecidos como arquivos LAS (LASSpecification 1.4- R15, ASPRS, 2011, [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS\\_1\\_4\\_r15.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS_1_4_r15.pdf)), transformados em versão *raster* (grade regular) e validados por métodos geodésicos de alta precisão que utilizam refletores prismáticos fixados ao solo imediatamente antes do voo de varredura a laser.

A precisão dos dados está diretamente relacionada a redução das medidas da plataforma LIDAR (Laser Scanner) para o referencial ortométrico, ou seja, o referencial de medida associado ao geóide terrestre, e efetivamente aquele que determina a ação da aceleração da gravidade sobre as massas d'água. No experimento realizado em Rio Grande, refletores foram projetados, construídos e dispostos sobre o terreno imediatamente antes do voo ser executado (Fig. 4C). Quando recebem a incidência do feixe laser, esses refletores garantem um retorno de muito alta intensidade, evidentemente, muito maior do que a superfície natural. Isso permite sua fácil identificação na nuvem de pontos dispostas nos arquivos LAS. Como as posições desses refletores são conhecidas (Fig. 4D) tanto em suas coordenadas horizontais, quanto especialmente em relação as suas cotas, o ajustamento da nuvem pode ser feito em altíssima precisão.

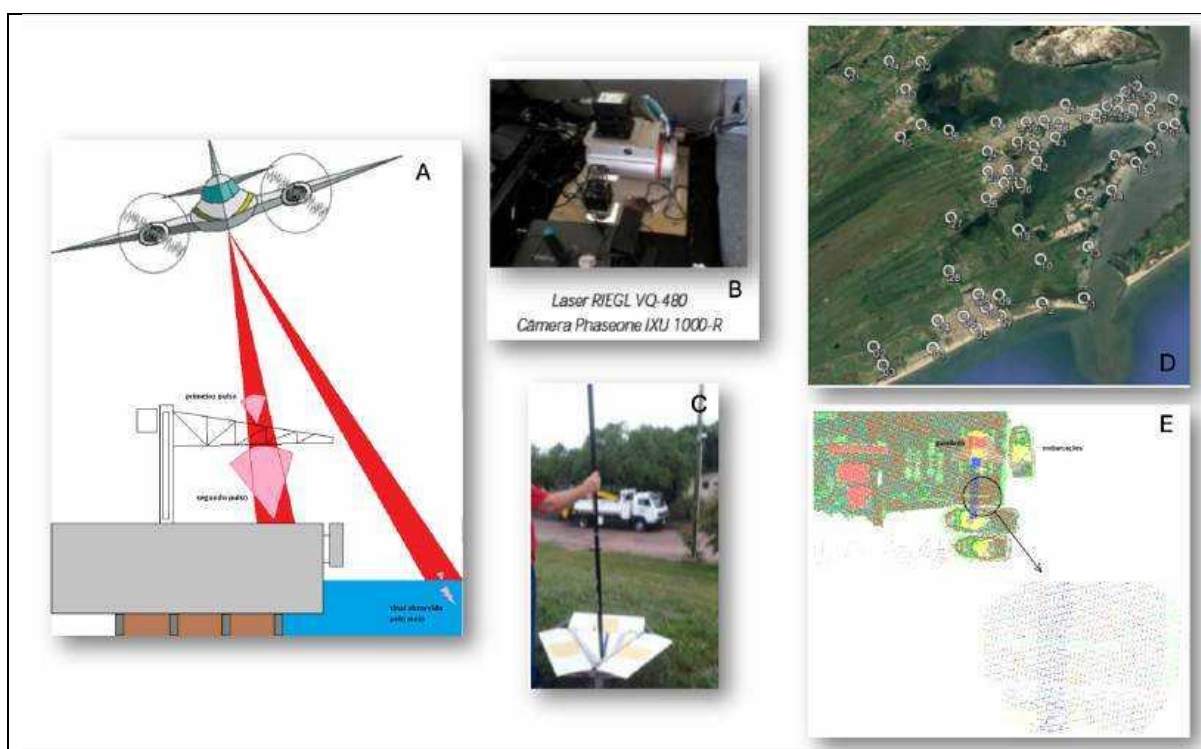


Figura 4 – A) Funcionamento da tecnologia Laser Scanner. B) Equipamento utilizado no levantamento, Modelo Laser RIEGL VQ-480, Câmera Phaseone IXU 1000-R. C) Refletores usados no processo de aquisição dos dados. D) Posições ocupadas pelos refletores no levantamento feito em Rio Grande, com destaque para as estações na área portuária. E) Nuvem de pontos resultantes do levantamento Laser Scanner com a identificação de um guindaste e de embarcações.

Estes dados foram obtidos pela Prefeitura Municipal de Rio Grande. Especificamente no Porto Organizado do Rio Grande, o plano do cais, a superfície da água, os equipamentos de movimento de carga e qualquer outro objeto ou estrutura física foram mapeados (Fig. 4E). Este conjunto de informações é o principal dado para o cálculo preciso da modelagem de inundação, tendo permitido a determinação das cotas de segurança de cada ponto da superfície do Porto do Rio Grande, ou seja, da diferença entre o nível máximo atingido em cada ciclo de elevação do nível do estuário e a cota da superfície das estruturas portuárias.

Do ponto de vista da modelagem de inundações em áreas urbanas realizado, foram aplicadas algumas hipóteses simplificadoras: (i) A região investigada está inteiramente contida em uma planície costeira, onde são observadas apenas pequenas declividades do terreno (máximo 5 cm por linha linear) em áreas onde as altitudes do terreno variam e 1 a 10 m acima do nível médio do mar na costa brasileira); (ii) A proporção entre as dimensões do corpo hídrico e dos compartimentos urbanos inundados permite considerar que o volume de água que entra na cidade não é suficiente para reduzir significativamente o nível do corpo hídrico principal; (iii) O principal componente da drenagem urbana é superficial e atmosférico, embora canais atmosféricos e sistemas subterrâneos tenham sido considerados no modelo; (iv) O nível de impermeabilização da superfície urbana é elevado (considerado acima de 0,8, numa escala de 0 a 1), e o solo está saturado, pois está permanentemente sob o bulbo de pressão da água da Lagoa dos Patos e do Oceano Atlântico.

Estas condições garantem resultados adequados com a aplicação de um algoritmo baseado em [Bates & De Roo \(2000\)](#), onde o movimento vertical unidimensional considerado do estuário (proveniente do modelo hidrodinâmico) induz uma onda de difusão bidimensional sobre o terreno. A técnica computacional utilizada é adaptada de um método de segmentação de imagens conhecido como *Watershed*, para uma evolução multiponto (pontos de entrada primários) ([Barnes et al., 2014](#)). Esses pontos foram selecionados em trechos do Porto Organizado do Rio Grande ([Fig. 1A](#)), que receberam o nível da água calculado pelo modelo hidrodinâmico ([Figs. 1B e 1C](#)). Dependendo das características topográficas do terreno, a camada resultante de inundação será diferente em cada área da cidade ([Fig. 1E](#)).

#### 4. Análise e Resultados

A modelagem das condições de inundação da área do Porto Organizado de Rio Grande foi analisada através da determinação das cotas de segurança de cada ponto da superfície da área, ou seja, da diferença entre o nível máximo atingido em cada ciclo de elevação do nível do estuário e a cota da superfície das estruturas portuárias, definindo Plantas de Segurança. Os resultados aqui apresentados são referentes as Plantas de Segurança do dia 16 de maio ([Figs. 5 – 8](#)), quando foram registrados os níveis mais altos do evento de inundação de maio de 2024 na estação CCMAR ([Fig. 2](#)).

No Porto Novo ([Fig. 5](#)), a diferença da cota da estrutura até o nível máximo da água no evento variou entre 5 cm nas regiões de cais mais próximas ao corpo d'água e 50 cm nas regiões do pátio interno (tons de vermelho e laranja, respectivamente), onde a maioria dos prédios estava a mais de 250 cm do nível da água (tons de cinza, sem risco de inundação) e alguns a 200 cm (tons de verde claro).

Na região dos Terminais Petroquímicos ([Fig. 6](#)), a diferença da cota da estrutura até o nível máximo da água no pico de inundação do evento variou entre 5 cm e 50 cm (tons de vermelho e laranja, respectivamente) nas regiões de cais mais próximas ao canal, mas atingiu condições de inundação nos pátios internos onde ficam

localizados tanques de armazenamento (tom de azul), e esteve a 5 cm de inundação em diversos outros pontos (tom de vermelho).

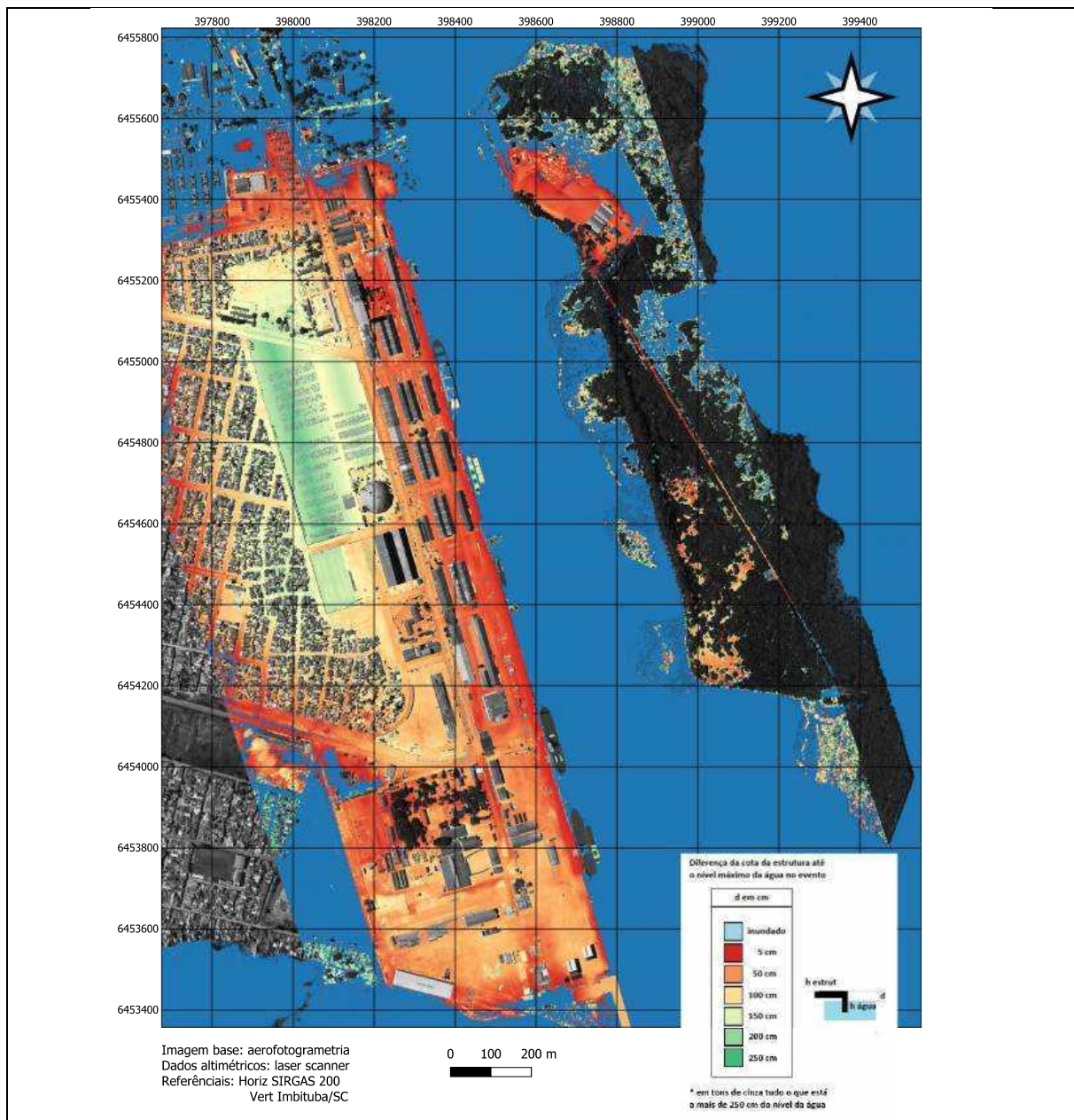


Figura 5 – Planta de Segurança do Porto Novo. A escala de cores indica a diferença da cota da estrutura até o nível máximo da água no dia 16 de maio, quando foram registrados os níveis mais altos do evento de inundação de maio de 2024 na estação CCMAR. Os tons de cinza indicam tudo que está a mais de 250 cm do nível da água no canal.

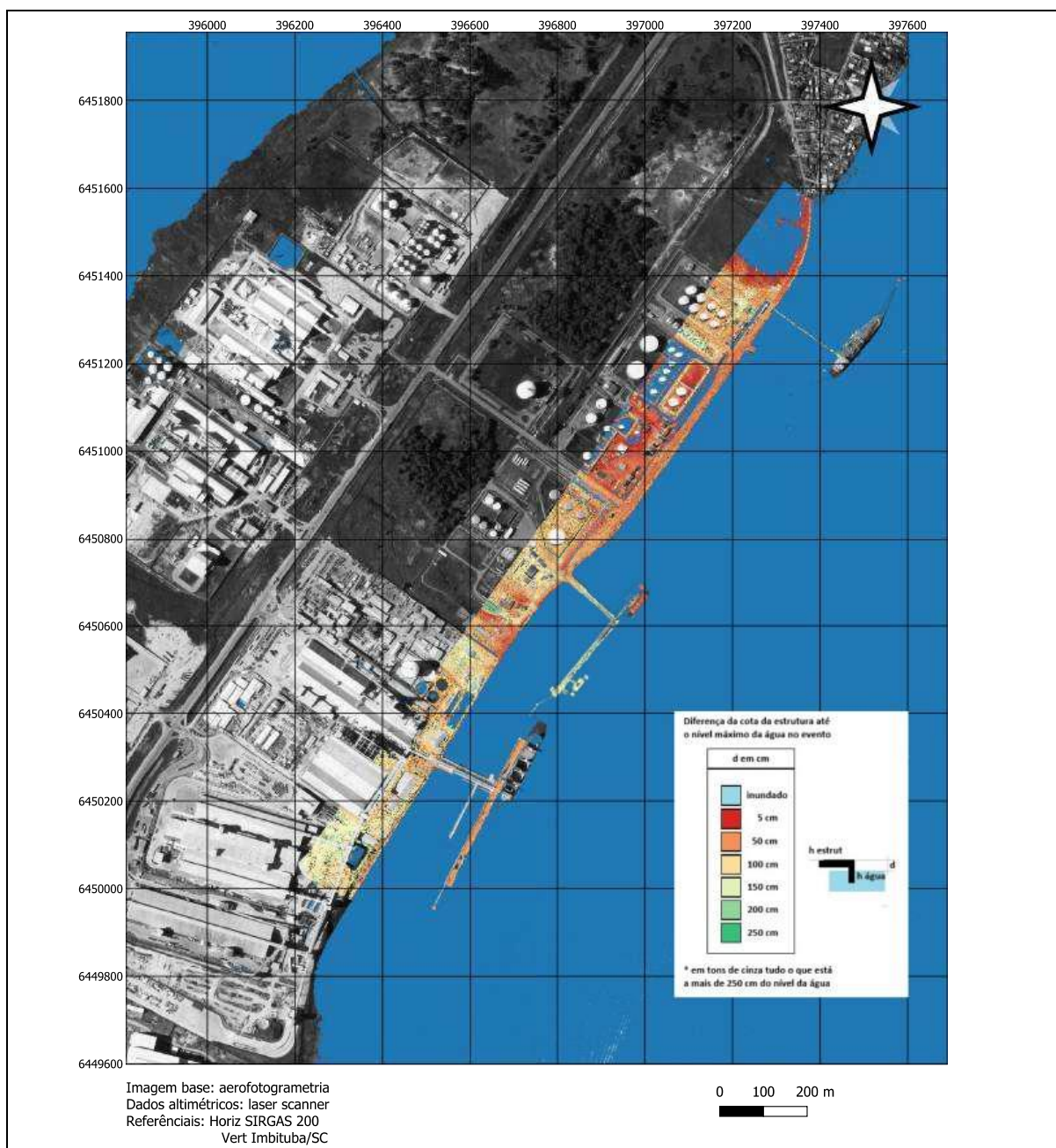


Figura 6 – Planta de Segurança dos Terminais Petroquímicos. A escala de cores indica a diferença da cota da estrutura até o nível máximo da água no dia 16 de maio, quando foram registrados os níveis mais altos do evento de inundação de maio de 2024 na estação CCMAR. Os tons de cinza indicam tudo que está a mais de 250 cm do nível da água no canal.

Para os Terminais Graneleiros (Fig. 7), por outro lado, as Plantas de Segurança indicam condições mais favoráveis durante o pico máximo de inundação de 16 de maio. A diferença da cota da estrutura até o nível máximo da água no canal na região de cais mais próxima ao corpo d'água indicam cotas de segurança de 100 cm em praticamente toda a extensão, atingindo até 250 cm no pátio interno dos Terminais. Comportamento semelhante é observado no TECON (Fig. 8).

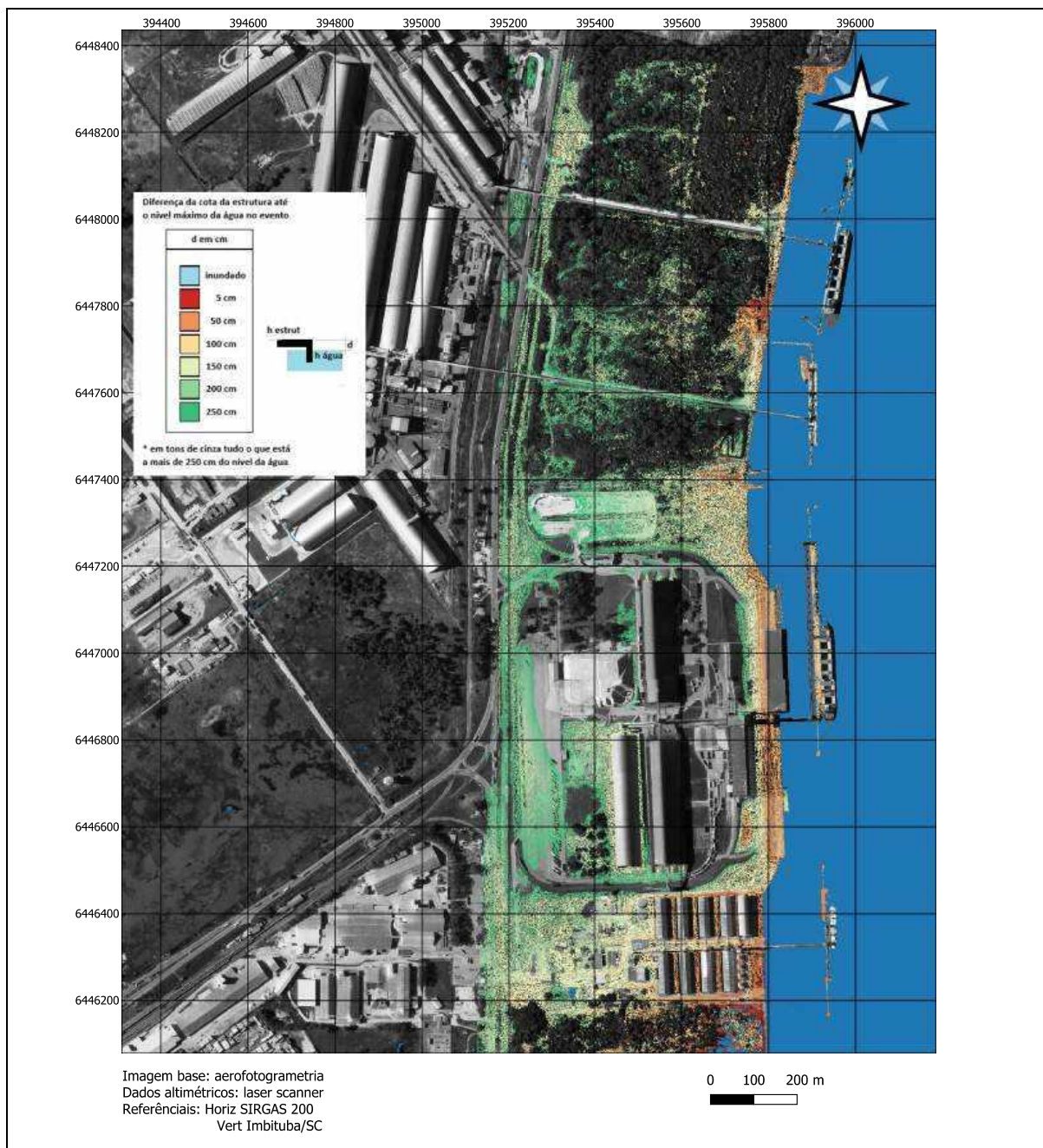


Figura 7 – Planta de Segurança dos Terminais Graneleiros. A escala de cores indica a diferença da cota da estrutura até o nível máximo da água no dia 16 de maio, quando foram registrados os níveis mais altos do evento de inundação de maio de 2024 na estação CCMAR. Os tons de cinza indicam tudo que está a mais de 250 cm do nível da água no canal.

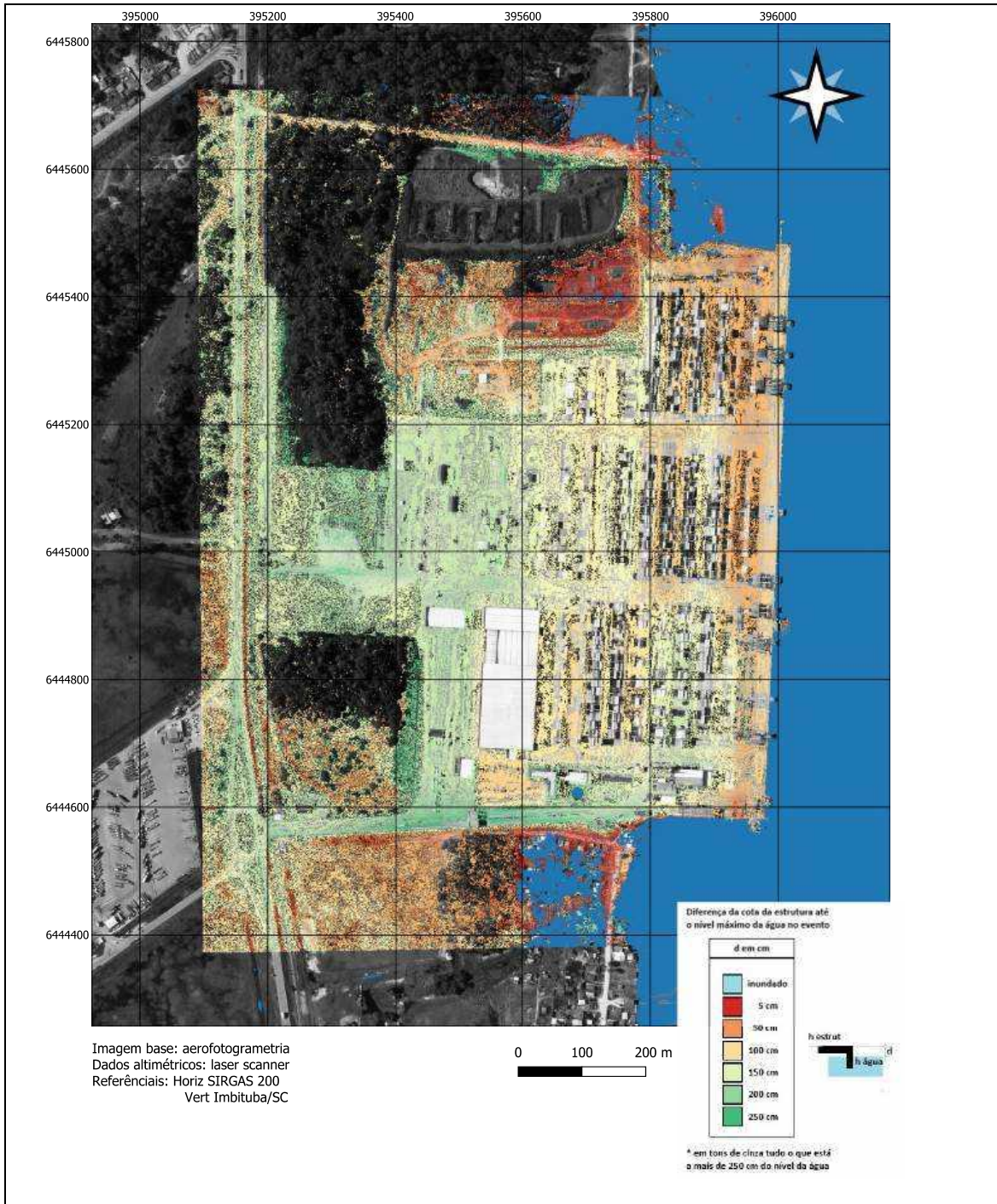


Figura 8 – Planta de Segurança do TECON. A escala de cores indica a diferença da cota da estrutura até o nível máximo da água no dia 16 de maio, quando foram registrados os níveis mais altos do evento de inundação de maio de 2024 na estação CCMAR. Os tons de cinza indicam tudo que está a mais de 250 cm do nível da água no canal.

A implementação do DT – PORTO para a área do Porto Organizado do Rio Grande durante o evento de inundação de maio de 2024 fez com que informações valiosas sobre potenciais áreas de inundação, cotas de segurança para a operação dos diferentes Terminais, áreas de livre ou restrito acesso estivessem prontamente disponíveis para gestores portuários e para as forças de segurança da região. A disponibilidade deste tipo de informação em altíssima resolução espacial e temporal

favoreceu o estabelecimento de importantes medidas de prevenção e planejamento estratégico frente ao maior evento extremo das últimas décadas. Embora não tenha sido necessário naquele momento, estas informações também são extremamente importantes para o estabelecimento das melhores práticas de segurança em relação à drenagem e bacias de contenção em áreas que recebem produtos tóxicos, por exemplo.

Ainda, os produtos gerados pela aplicação do modelo permitem a determinação com alta precisão das condições operacionais de elementos fundamentais para a segurança das embarcações junto às estruturas portuárias. Aqui são citadas duas dessas aplicações: a condição de defensas e o acesso ao uso de *dolphins* de amarração.

O conhecimento das cotas das estruturas e sua comparação com a previsão da cota atingida pela água na inundação, permite determinar se elas correm risco de serem submersas. Porém, mesmo que o nível não venha a submergir as linhas de cais, o conhecimento preciso da posição da superfície da água garante condições de planejar com segurança as operações de atracação e desatracação, inclusive da adequada posição onde defensas são visíveis e estão operacionais, visto que estão normalmente instaladas abaixo dessas linhas de cais.

Da mesma forma, nos *piers* graneleiros há um conjunto de *dolphins* de amarração, cuja cota da superfície onde estão os cabeços é mais baixa que a do atracadouro. O modelo permite determinar as cotas do nível da água que coloca esses elementos submersos, e por consequência, a necessidade de ações mais complexas. A **Figura 9** ilustra a técnica de avaliação utilizada.

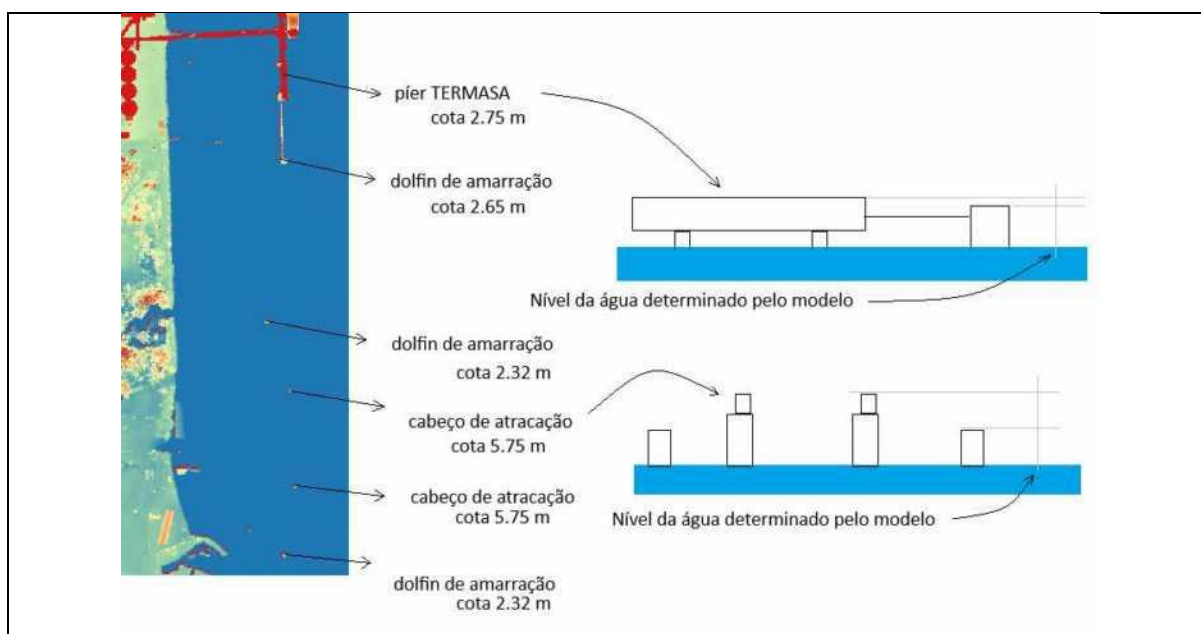


Figura 9 – Detalhamento da aplicação do modelo para cálculo de cotas de segurança em elementos críticos da estrutura portuária.

Logo, o DT – PORTO se apresenta como uma importante ferramenta de prevenção e resiliência para gestores, formuladores de políticas públicas e

autoridades portuárias encarregadas de gerenciar áreas portuárias complexas sob condições de eventos extremos, contribuindo para a definição de estratégias de mitigação das mudanças climáticas e de adaptação/preparação para desastres naturais. Por outro lado, o DT - PORTO consolida uma capacidade de simular não somente o impacto de eventos futuros de inundação sobre a estrutura portuária, mas também os impactos de projetos estruturais em consideração para a região através da simulação de cenários.

Dentro este contexto, a solução inovadora proposta pelo DT – PORTO promoveu o Porto do Rio Grande a um porto inteligente que utiliza sistemas de monitoramento e previsão para garantir uma operação segura e resiliente durante eventos extremos, contribuindo para a segurança da sociedade, da economia e do meio ambiente da região. Além disso, o potencial de expansão do conceito do DT – PORTO para outros portos no Brasil contribuirá sobremaneira para a resiliência e sustentabilidade do País frente aos eventos extremos.

## **5. Considerações Finais**

Com base nos resultados do presente estudo, fica evidente que o DT – PORTO surge como uma alternativa inovadora às metodologias convencionais de monitoramento e previsão da dinâmica das regiões costeiras e portuárias, que normalmente estão baseadas somente em dados de campo e fornecem informações limitadas no espaço e no tempo, passando a um novo patamar de inovação e tecnologia ao gerar informações com ampla cobertura e altíssima resolução espacial e em tempo real.

Ao qualificar o processo de previsão do impacto dos eventos extremos sobre as regiões e estruturas portuárias e convergir para a construção de regiões portuárias resilientes para o futuro, o DT – PORTO está alinhado com as melhores práticas de sustentabilidade ESG (*Environmental, Social and Governance*) no contexto das mudanças climáticas, trazendo benefícios ao fortalecimento da reputação e segurança do Porto Organizado do Rio Grande frente aos eventos extremos, o que contribui para a atração de investidores e auxilia na gestão de riscos com base em desenvolvimento tecnológico e inovador.

Além disso, a aplicação do DT – PORTO está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização Mundial das Nações Unidas (ONU), em relação aos objetivos 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura, ao construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação; 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis, ao tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis; 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima, ao tomar medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos.

Por fim, o sucesso do estudo de caso da aplicação do DT – PORTO à área do Porto Organizado do Rio Grande ilustra a robustez e inovação do método, e sua capacidade de efetivamente contribuir na prevenção dos impactos dos eventos extremos em regiões portuárias, bem como na resiliência destas regiões,

evidenciando a aplicabilidade do conceito DT – PORTO em outras regiões portuárias do Brasil e do mundo.

## 6. Referências

ANTÔNIO, M. H.; FERNANDES, E. H. & MUELBERT, J. H. Impact of jetty configuration changes on the hydrodynamics of the subtropical Patos Lagoon estuary, Brazil. **Water**, v. 12, p. 3197, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12113197>

BARBIE, A.; PECH, N.; HASSELBRING, W.; FLÖGEL, S.; WENZHÖFER, F.; WALTER, M.; SHCHEKINOVA, E.; BUSSE, M.; TÜRK, M.; HOFBAUER, M. & SOMMER, S. Developing and underwater network of ocean observation systems with Digital Twin Prototypes – A field report from the Baltic Sea. **IEEE Annals of the History of Computing**, v. 26(3), p. 33–42, 2021. <https://doi.org/10.1109/MIC.2021.3065245>

BARNES, R.; LEHMAN, C.; MULLA, D. Priority-flood: An optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models. **Computers & Geosciences**, v. 62, p. 117–127, 2014. [doi:10.1016/j.cageo.2013.04.024](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.04.024)

BATES, P. D. & DE ROO, A. P. J. A simple raster-based model for flood inundation simulation. **Journal of Hydrology**, v. 236(1–2), p. 54–77, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00278-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00278-X)

BITENCOURT, L. P.; FERNANDES, E. H.; SILVA, P. D. & MÖLLER, O. O. Spatio-temporal variability of suspended sediment concentrations in a shallow and turbid lagoon. **Journal of Marine Systems**, v. 212, p. 103454, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103454>

COLLISCHONN, W.; RUHOFF, A.; CABELEIRA FILHO, R.; PAIVA, R.; FAN, F., POSSA, T.; PICKBRENNER, K. Chuva da cheia de 2024 foi mais volumosa e intensa que a da cheia de 1941 na bacia hidrográfica do Guaíba. **Technical Report**, 2024 <https://www.ufrgs.br/iph/wp-content/uploads/2024/06/Comparacao-2024-e-1941-final.pdf>

DITTO Programme on Digital Twins of the Ocean. Disponível em: <https://ditto-oceandecade.org/>. Acesso em: 30 jul. 2024.

DUQUE, J.P. & BROVELLI, M.A. Building a digital Twin of the Italian Coasts. Free and Open-Source Software for Geospatial (FOSS4G) 2022 – Academic Track, **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLVIII-4/W1-2022, p. 22–28, 2022, Florence, Italy.

European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. The digital twin ocean – An interactive replica of the ocean for better decision-making, **Publications Office of the European Union**, 2022.

<https://data.europa.eu/doi/10.2777/343496>

FERNANDES, E. H.; DYER, K. R.; MOLLER, O. O. & NIENCHESKI, L. F. H. The Patos Lagoon hydrodynamics during an El Niño event (1998). **Continental Shelf Research**, v. 22, p. 1699–1713, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(02\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(02)00033-X)

FERNANDES, E. H.; DA SILVA, P. D.; GONÇALVES, G. A. & MÖLLER, O. O. Dispersion plumes in open ocean disposal sites of dredged sediment. **Water**, v. 13, p. 808, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13060808>.

FERNANDES, E. H.; GONÇALVES, G. A.; SILVA, P.; GERVINI, V. MAIER, E.; BUGONI, L.; SECCHI, E. (submetido). Patos Lagoon Digital Twin – A Tool for Assessment and Risk Mitigation of Extreme Flood Events. **Geophysical Research Letters**.

FRANZEN, M. O.; SILVA, P.; SIEGLE, E. & FERNANDES, E. H. L. Influence of long jetties on estuarine and coastal hydrodynamics in a microtidal estuary. **Regional Studies in Marine Science**, v. 59, p. 102809, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102809>

GIACOMELLI, L.; NECTOUX, M.; FAN, F.; FLEISCHMANN, A.; SIQUEIRA, V.; COLLISCHONN, W. & CUSTÓDIO, M. **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 24-28 de novembro de 2019. Foz do Iguaçu – PR, Brasil. ISSN 2318-0358.

HERVOUET, J. M. Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modeling with the Finite Element Method. **Wiley, Chichester**, 2007.

IPCC (Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee & J. Romero (eds.)]. **IPCC, Geneva, Switzerland**, p. 35–115, 2023, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

JEONG, J. S. & LEE, H. S. Unstructured grid-based river–coastal ocean circulation modeling towards a Digital Twin of the Seto Inland Sea. **Applied Sciences**, v. 13, p. 8143, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13148143>

LISBOA, P. V.; FERNANDES, E. H.; SOTTOLICHIO, A.; HUYBRECHT, N. & BENDÔ, R. (2022). Coastal plumes contribution to the suspended sediment transport in the Southwest Atlantic inner continental shelf. **Journal of Marine Systems**, v. 236, p. 103796, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103796>

LOPES, V. A. R.; FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; SIQUEIRA, V. A., Collischonn, W. & da Motta Marques, D. A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes. **Journal of hydrology**, v. 565, p. 177-196, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.011>

MARQUES, W. C.; FERNANDES, E. H.; MONTEIRO, I. O. & MÖLLER, O. O. Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 29, p. 556–571, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.09.022>.

PATANÈ, L.; IUPPA, C.; FARACI, C.; & XIBILIA, M. G. A deep hybrid network for significant wave height estimation. **Ocean Modelling**, v. 189, p. 102363, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2024.102363>

PIAS, M.; BULL, L.; BRENNAN, D.; GIROLAMI, M.; CROWCROFT, J. “On the Scaling of Digital Twins by Aggregation”, accepted for publication in autumn 2024, **Data & Policy Journal**, Cambridge University Press.

PILLAI, U. P. A.; PINARDI, N.; ALESSANDRI, J.; FEDERICO, I.; CAUSIO, S.; UNGUENDOLI, S.; VALENTINI, A. & STANEVA, J. A Digital Twin modelling framework for the assessment of seagrass Nature Based Solutions against storm surges. **Science of the Total Environment**, v. 847, p. 157603, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157603>

PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; DE PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; ... & COLLISCHONN, W. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open-source GIS. **Environmental Modelling & Software**, v. 94, p. 1-20, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.029>

PILLAR, V. E OVERBECK, G. Learning from a climate disaster: The catastrophic floods in southern Brazil. **Science**, v. 385, Issue 6713, 2024. <http://dx.doi.org/10.1126/science.adr835>

VILLARET, C.; HERVOUET, J.-M.; KOPMANN, R.; MERKEL, U., & DAVIES; A.G. Morphodynamic modeling using the telemac finite-element system. **Computational Geosciences**, v. 53, p. 105–113, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.004>.

VOOSEN, P. Europe builds “digital twin” of Earth to hone climate forecasts. **Science**, v. 370, p. 16–17, 2020. <https://doi.org/10.1126/science.370.6512>.

YUAN, R.; ZHANG, H.; XU, R.; & ZHANG, L. Enhancing coastal risk recognition: Assessing UAVs for monitoring accuracy and implementation in a Digital Twin framework. **Applied Sciences**, v. 14, p. 2879, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14072879>