

PREVISÃO DE ONDAS E CORRENTES PARA O PORTO DE SUAPE: MODELO ACOPLADO DE ALTA RESOLUÇÃO INTEGRADO À PLATAFORMA PREVISÃO AMBIENTAL MARINHA

Wave and current forecasting for the Suape Port: a high-resolution coupled model integrated into the marine environmental forecast platform

Vinícius Santos Pessanha¹ 

Resumo: Este estudo apresenta a implementação e a avaliação de um modelo numérico acoplado de alta resolução para a previsão de correntes e ondas na região do Porto de Suape, baseado no sistema Delft3D e integrado à plataforma Previsão Ambiental Marinha (PAM). O modelo foi configurado com condições de contorno provenientes de modelos regionais atmosféricos, de circulação e de ondas operados pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) e avaliado com base em dados observacionais de nível do mar, correntes e ondas obtidos no programa de monitoramento meteoceanográfico do porto. Os resultados demonstraram excelente desempenho na previsão da elevação da superfície do mar (*root mean square error* — RMSE = 0,049 m) e boa representação das correntes médias na coluna d'água (RMSE = 0,115 m/s), evidenciando a adequada reprodução da dinâmica hidrodinâmica local. Para ondas, o modelo superou os modelos global (RMSE = 0,420 m) e regional (RMSE = 0,195 m) utilizados como referência, alcançando um erro menor (RMSE = 0,150 m), incluindo os períodos de eventos extremos (percentil 95), embora tenha sido observada uma tendência à subestimação das alturas significativas superiores a 2,10 m. A integração do modelo à PAM possibilitou a disponibilização operacional de previsões horárias de alta resolução para a região de Suape, ampliando de forma objetiva o suporte à segurança da navegação, às operações portuárias e navais e ao planejamento ambiental em uma área de elevada relevância estratégica.

Palavras-chave: Modelagem numérica. Delft3D. Porto de Suape. Previsão ambiental marinha.

Abstract: This study presents the implementation and evaluation of a high-resolution coupled numerical model for forecasting currents and waves in the Suape Port region, based on the Delft3D system and integrated into the Marine Environmental Forecasting (PAM) platform. The model was configured with boundary conditions derived from regional atmospheric, circulation, and wave models operated by the Brazilian Navy Hydrographic Center (CHM) and validated using observational data obtained from the port's metocean monitoring program. The results demonstrated excellent performance in predicting sea surface height (RMSE = 0.049 m) and a good representation of depth-averaged currents (RMSE = 0.115 m/s), indicating an adequate reproduction of the local hydrodynamic processes. For waves, the model outperformed the reference global (RMSE = 0.420 m) and regional (RMSE = 0.195 m) models, achieving a lower overall error (RMSE = 0.150 m), including during extreme events defined by the 95th percentile of observations, although a tendency to underestimate significant wave heights exceeding 2.10 m was identified. The integration of the model into the PAM enabled the operational dissemination of high-resolution hourly forecasts for the Suape region, objectively enhancing support for navigation safety, port and naval operations, and environmental planning in an area of high strategic relevance.

Keywords: Numerical modeling. Delft3D. Suape Port. Marine Environmental Forecasting.

¹ Capitão de Fragata. Hidrógrafo. PhD em Oceanografia Física pela Naval Postgraduate School (Califórnia, Estados Unidos). Encarregado da Divisão de Previsão Numérica do Centro de Hidrografia da Marinha, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: vinicius.pessanha@marinha.mil.br

1. INTRODUÇÃO

A operação segura e eficiente de portos modernos depende, cada vez mais, do conhecimento detalhado das condições meteoceanográficas locais, especialmente das correntes e do estado do mar nas áreas de acesso e nas regiões adjacentes. Esse cenário torna-se ainda mais desafiador diante do aumento progressivo do porte dos navios, que reduz as margens operacionais e amplia a sensibilidade das manobras às forçantes ambientais. A modelagem numérica costeira de alta resolução tem, assim, se consolidado como ferramenta essencial para o apoio à navegação, ao planejamento operacional e à gestão ambiental portuária, ao permitir a representação da hidrodinâmica em escalas compatíveis com a complexidade desses ambientes (SOTILLO *et al.*, 2020; MAKRIS *et al.*, 2021). Além de subsidiar decisões operacionais, esses sistemas de previsão desempenham um papel estratégico na avaliação da dispersão de poluentes, no transporte de sedimentos e no suporte a ações de resposta a incidentes ambientais, ampliando a capacidade de gestão integrada das zonas costeiras e portuárias (CUCCO *et al.*, 2024).

Avanços na modelagem oceanográfica costeira têm possibilitado a implementação de sistemas acoplados de circulação e ondas em escala portuária, integrando forçantes atmosféricas, marés, interação onda-corrente e efeitos da batimetria local. Estudos demonstram que modelos de alta resolução, quando devidamente validados, são capazes de reduzir incertezas associadas a manobras de navios, otimizar janelas operacionais e fornecer informações ambientais críticas em tempo quase real, superando o desempenho de modelos globais e regionais em áreas costeiras complexas (SOTILLO *et al.*, 2020; ANDROULIDAKIS *et al.*, 2025).

No Brasil, apesar da ampla disponibilidade de previsões meteoceanográficas em escala regional, a aplicação operacional de modelos numéricos específicos em áreas portuárias ainda é incipiente. A plataforma Previsão Ambiental Marinha (PAM), desenvolvida pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) em cooperação com a Petrobras, por meio do projeto Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO), disponibiliza previsões numéricas para toda a costa brasileira. A plataforma é gratuita e está disponível tanto pelo *site* institucional quanto por aplicativo móvel (PAM, 2025). Entre os produtos oferecidos estão previsões atmosféricas, de correntes e de ondas, baseadas em modelos numéricos operados

diariamente pelo CHM, incluindo modelos de alta resolução para áreas estratégicas. Contudo, até este trabalho, não havia um modelo específico para Suape, o que representava uma lacuna importante.

Paralelamente, as cartas náuticas desempenham papel essencial ao fornecerem informações geoespaciais críticas para o planejamento e a condução segura da navegação e do transporte marítimo. A transição das cartas de navegação eletrônica para o novo modelo de dados hidrográficos S-100, estabelecido pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI), representa um marco tecnológico para a cartografia náutica (OHI, 2025). Nesse processo de modernização, destaca-se a carta de navegação eletrônica do Porto de Suape, publicada em setembro de 2025, como a primeira do Brasil no modelo S-101. A próxima etapa, alinhada às especificações S-104 (nível do mar) e S-111 (correntes de superfície), permitirá integrar informações ambientais diretamente às cartas eletrônicas, exigindo a aplicação de modelos numéricos de alta resolução para obter previsões confiáveis.

O Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros (Porto de Suape), localizado em Pernambuco, é um dos principais polos logísticos e industriais do Brasil, integrando a Região Nordeste ao comércio global. Em operação desde 1983 sob o conceito de porto-indústria, movimenta cerca de 25 milhões de toneladas de cargas por ano e mantém conexões com mais de 250 portos pelo mundo (SUAPE, 2025). Inserido em um ambiente estuarino de elevada complexidade hidrodinâmica, Suape é influenciado por descargas fluviais, regime de marés, ventos, ondas do Atlântico Sul e arrecifes costeiros. A construção do porto implicou dragagens, aterros e intervenções em ecossistemas, alterando a circulação e o transporte de sedimentos (FABIN *et al.*, 2020). Nesse cenário, previsões meteoceanográficas confiáveis são fundamentais para a segurança da navegação, o planejamento e a execução das atividades marítimas.

Diante disso, este estudo apresenta um modelo operacional acoplado de circulação e ondas de alta resolução para o Porto de Suape, empregando o modelo numérico Delft3D integrado ao PAM. A plataforma fornece previsões horárias acessíveis ao público para uma área de alto interesse estratégico, configurando-se como uma iniciativa inédita para a região, com grande potencial de aplicabilidade e impacto. Além disso, em consonância com o Plano Estratégico da Marinha (PEM 2040), que ressalta a Amazônia Azul como conceito político-estratégico

e atribui à atividade científica e tecnológica um papel central em seu fortalecimento (BRASIL, 2020), a implementação do modelo para o Porto de Suape contribui para ampliar o monitoramento ambiental alinhado a essa diretriz.

2. OBJETIVOS

Este estudo teve como objetivo principal implementar um modelo numérico acoplado de circulação e ondas para representar a hidrodinâmica local do Porto de Suape, avaliando o desempenho do modelo por meio da comparação de seus resultados com dados observacionais. Como objetivo secundário, buscou-se integrar o modelo à plataforma PAM, ampliando a capacidade de disponibilização aos usuários de previsões específicas para a região e contribuindo para a segurança da navegação, operações navais e portuárias, planejamento logístico e gestão ambiental.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDO

O Porto de Suape localiza-se no litoral nordeste do Brasil (Figura 1a), a cerca de 40 km ao sul da cidade do Recife, em Pernambuco (Figura 1b), situado entre os municípios de Ipojuca e Cabo de Santo Agostinho.

A construção do Porto de Suape provocou transformações expressivas na morfologia e nos ecossistemas da região, decorrentes de dragagens, derrocagens na linha de arrecifes, aterros e intervenções em áreas de manguezal (KOENING *et al.*, 2002; FABIN *et al.*, 2020). Tais modificações impactaram diretamente a circulação local e a dinâmica de redistribuição de sedimentos (NEUMANN *et al.*, 1998). Diante dessas modificações, ressalta-se a importância da linha de arrecifes costeiros, que atua como barreira natural ao dissipar a energia das ondas incidentes do Atlântico Sul e ao regular a

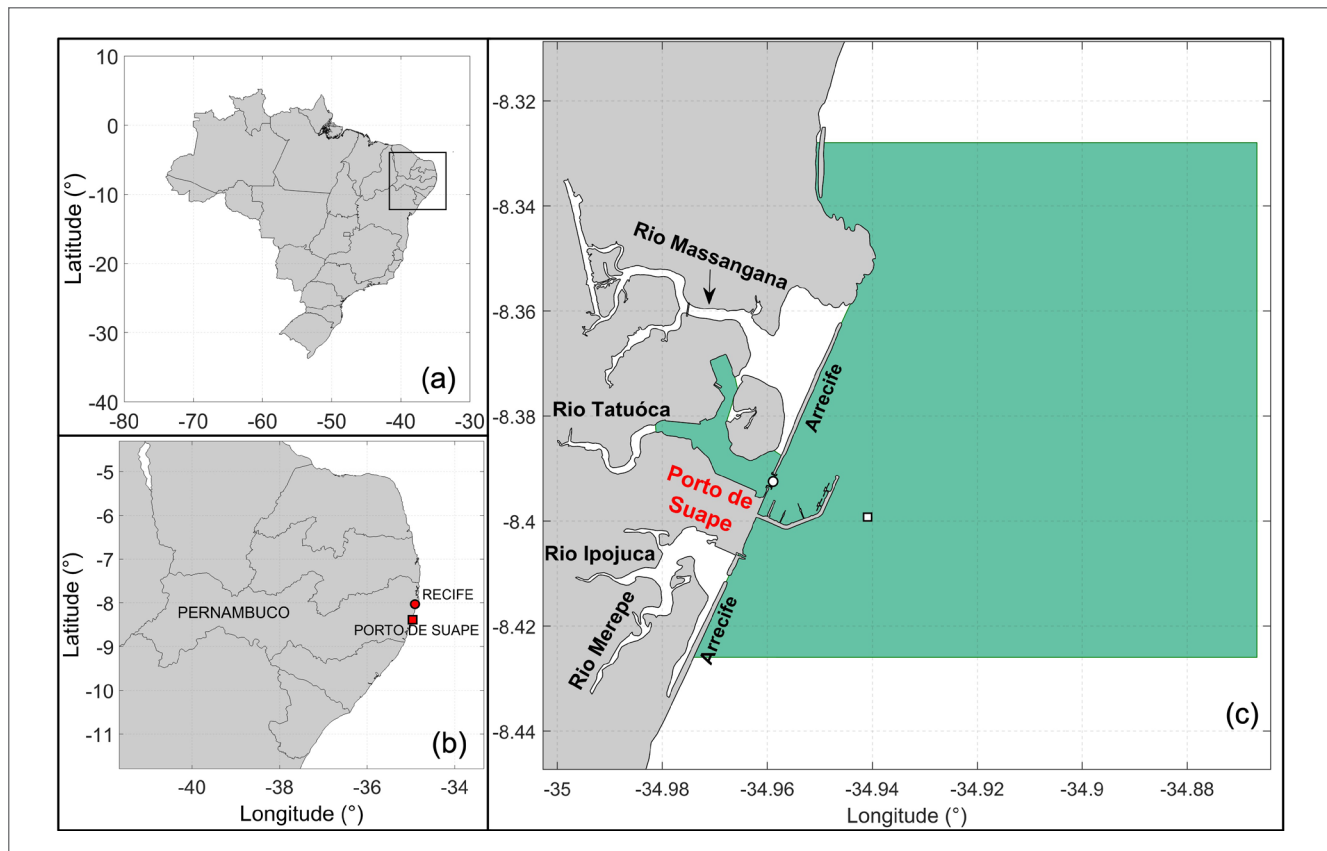


Figura 1. Área de Estudo. (a) Localização estratégica da Região Nordeste do Brasil. (b) Estado de Pernambuco ao centro, com destaque para a cidade de Recife e o Porto de Suape. (c) Área de interesse em verde, incluindo as estações de monitoramento HMSUPIER (círculo branco) e HMWAVE (quadrado branco).

comunicação com o oceano por meio de aberturas naturais e artificiais (NEUMANN *et al.*, 1998; FABIN *et al.*, 2020).

A região apresenta clima tropical úmido, com estação chuvosa no outono e inverno. O regime de marés é semidiurno, alcançando amplitudes de até 2,4 m em sizígia e 1,4 m em quadratura (BARROS, 2009). Nas proximidades do porto, a média anual da altura significativa das ondas é de 1,1 m, com direção de sudeste e máximos superiores a 2,2 m no inverno. Os ventos apresentam predominância de sudeste durante o inverno e de leste no verão, com velocidades médias entre 5 e 6 m/s.

Segundo Santos (2022), as correntes predominam no sentido norte, atingindo 0,5 m/s próximo à linha de arrecifes, 0,8 m/s na bacia portuária e cerca de 0,1 m/s junto às praias, intensificando-se nas conexões com o oceano. As desembocaduras dos rios Ipojuca, Merepe e Massangana são áreas de deposição sedimentar (SANTOS, 2022), enquanto o rio Tatuoca abriga um dique de proteção que alterou sua dinâmica (BARROS, 2009). O estuário do Ipojuca tem profundidades inferiores a 2 m, chegando a 5 m no canal principal (VASCONCELLOS, 2019), e o do Massangana apresenta calha prolongada com cerca de 5 m no centro (FABIN *et al.*, 2020). O Ipojuca é o principal aporte fluvial, com vazão média de 17 m³/s, seguido pelo Massangana, com menos de 2 m³/s (SANTOS, 2022).

Na área de interesse, a batimetria é predominantemente inferior a 25 m, destacando-se o canal de acesso dragado até 20 m e a área interna do porto com profundidades próximas a 16 m. Este estudo considera como área de interesse a porção navegável coberta pela carta náutica do Porto de Suape (Figura 1c).

3.2. DADOS OBSERVACIONAIS

Os dados utilizados neste estudo, referentes ao período de 18 de junho a 20 de agosto de 2025, foram concedidos pelo Porto de Suape e são provenientes do programa de monitoramento meteoceanográfico. Duas estações fixas próximas ao porto foram consideradas: HMSUPIER (08°23,595' S; 34°57,555' W), equipada com um ADCP instalado a 16 m de profundidade e um marégrafo do tipo radar, e HMSUWAVE (08°23,946' S; 34°56,480' W), composta de uma boia oceanográfica ODAS, fundeada a 17 m, equipada com ondógrafo MOTUS para a medição de ondas (Figura 1c).

As séries temporais de maré, correntes e ondas foram submetidas a controle de qualidade segundo o protocolo Quality Assurance of Real-Time Oceanographic Data — QARTOD

(IOOS, 2025), convertidas para UTC e agregadas em médias horárias. Para as correntes, os perfis do ADCP em múltiplos níveis (superfície, 2 m, 5 m, 8 m, 11 m e 14 m) foram processados em componentes leste-oeste (u) e norte-sul (v), permitindo calcular a média horária na coluna d'água. A contribuição relativa das componentes astronômicas e não astronômicas foi estimada pela variância das séries (MELO FILHO, 2017), e a separação da maré astronômica foi realizada com o filtro de Godin (GODIN, 1972).

3.3. O MODELO, CONFIGURAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

O Delft3D, desenvolvido pela Deltares, é um modelo numérico de código aberto baseado na aproximação das equações de águas rasas, resolvidas em uma grade ortogonal estruturada pelo método de diferenças finitas (LESSER *et al.*, 2004), amplamente utilizado em estudos costeiros e estuarinos. Neste estudo, foram empregados os módulos de circulação (*flow*) e de ondas (*wave*). O módulo *flow*, em configuração barotrópica, resolve a equação de continuidade e as equações de movimento horizontal, derivadas das equações de Navier-Stokes para fluido incompressível. Já o módulo *wave* incorpora o modelo de terceira geração *Simulating Waves Nearshore* — SWAN (BOOIJ *et al.*, 1999), que resolve a equação de balanço da ação de onda em coordenadas eulerianas, possibilitando a previsão da geração, propagação, dissipação e interações não lineares entre ondas em águas costeiras e estuarinas. Os módulos *flow* e *wave* foram acoplados de forma *online*, permitindo uma representação realista da interação ondas-correntes na área de estudo.

O modelo foi implementado em dois domínios aninhados utilizando *offline nesting*, em que o domínio externo de menor resolução fornece condições de contorno ao interno de maior resolução, reduzindo o custo computacional. Os limites das grades do modelo estão representados na Figura 2. No domínio externo, o módulo de ondas utiliza duas grades: uma com 2 km de resolução (98 × 57 km, linha branca na Figura 2a), estendendo-se além da plataforma continental para representar a propagação das ondas incidentes, e outra intermediária com 400 m de resolução (50 × 25 km, linha amarela). Como destacado por Roelvink e Walstra (2005), a utilização de uma grade de ondas mais extensa evita que perturbações de fronteira interfiram no domínio de circulação. Para o módulo de circulação, a grade tem 1 km de resolução, cobrindo 78 × 35 km (linha verde). O domínio interno foi representado por uma

única grade curvilínea para circulação e ondas (linha vermelha), com dimensões de até 35 km ao longo da costa e 13 km no sentido transversal, variando de 500 a 40 m de resolução na área portuária. Esse domínio abrange uma área maior do que a coberta pela carta náutica do Porto de Suape (Figura 2b), o que permitirá, em etapas futuras, a integração das previsões de correntes e ondas geradas pelo modelo como camadas sobre a carta de navegação eletrônica do porto.

A batimetria costeira foi obtida das cartas náuticas da região e, nas áreas não levantadas do estuário, adotaram-se profundidades entre 2 e 5 m. As descargas fluviais foram configuradas considerando-se vazões médias de 15 m³/s (rio Ipojuca) e 5 m³/s (rios Massangana e Merepe), enquanto o Tatuoca foi incluído sem aporte. As condições de contorno do domínio externo foram impostas com maré da solução global de altimetria (EGBERT; EROFEEVA, 2002), correntes do HYCOM (4 km), ondas do *WaveWatch III* — WW3 (4 km) e ventos do ICON-LAM (6,5 km), todos operados pelo CHM (CHM, 2025). O passo de tempo foi de 5 min no domínio externo e 6 s no interno, conforme o critério Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), mantendo-se valores padrão do Delft3D: Manning = 0,02 s/m^{1/3} e viscosidade horizontal = 1 m²/s. O acoplamento circulação-ondas foi configurado a cada 60 min, sendo a dissipação por atrito representada pelo modelo JONSWAP (HASSELMANN, 1974) e a quebra por profundidade parametrizada segundo Battjes e Janssen (1978), com $\alpha = 1$ e $\gamma = 0,73$.

A avaliação do desempenho do modelo foi realizada por meio da comparação dos resultados simulados e as observações, utilizando o erro quadrático médio (*root mean square error* — RMSE) e o índice de habilidade (*Skill Score* — SS). Seja X_{mod} a variável modelada, X_{obs} a variável observada, \bar{X} a média dos valores e N o número de observações, o RMSE é definido como (Equação 1):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_{mod} - X_{obs})^2} \quad (1)$$

O índice de habilidade (SS), conforme Willmott (1981), é dado por Equação 2:

$$SS = 1 - (\sum |X_{mod} - X_{obs}|^2) / [\sum (|X_{mod} - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs} - \bar{X}_{obs}|)^2] \quad (2)$$

Em que:

SS: 1 indica concordância perfeita entre modelo e observações;
 SS: 0 corresponde à completa discordância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. DESEMPENHO DO MODELO

Os resultados do Delft3D foram comparados com as médias horárias das observações das estações HMSUPIER (elevação

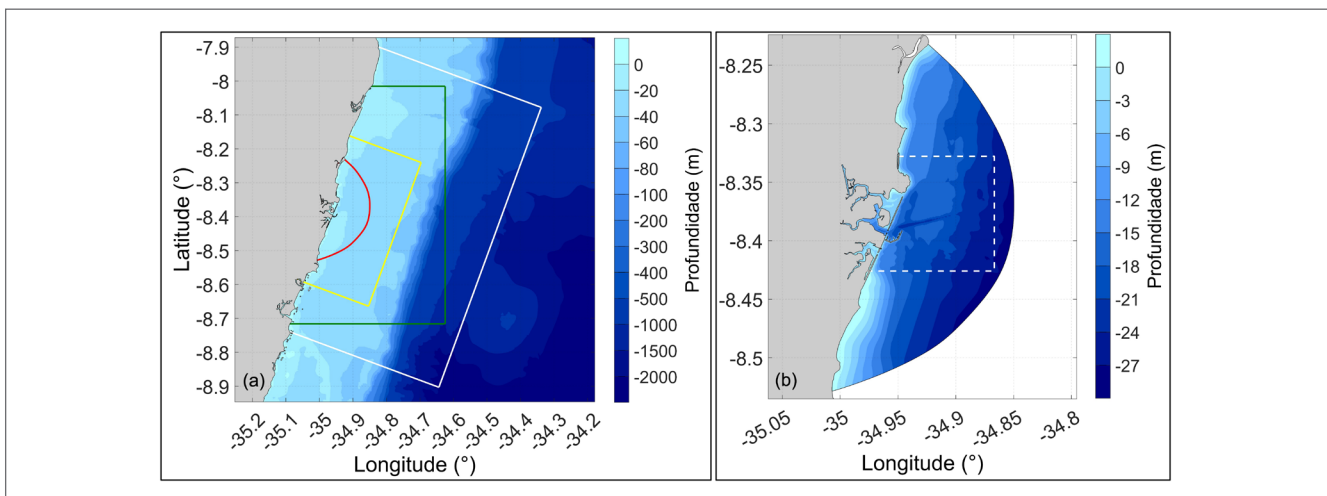


Figura 2. Domínio do modelo e batimetria local. (a) Limites das grades do domínio externo, com o módulo de ondas representado pelas linhas branca e amarela, o módulo de circulação pela linha verde e o domínio interno pela linha vermelha. (b) Domínio interno e o limite da área da carta náutica do Porto de Suape, indicado pela linha tracejada branca.

e correntes) e HMSUWAVE (ondas), no período de 18 de junho a 20 de agosto de 2025. Nesse intervalo, as correntes máximas observadas atingiram 0,44 m/s na vazante e 0,51 m/s na enchente. A análise direcional das correntes mostra que a circulação local é fortemente canalizada ao longo do eixo do acesso portuário, com reversão de sentido associada ao ciclo de maré. Aproximadamente 91,7% das direções observadas alinham-se a esse eixo dentro de $\pm 20^\circ$, com direção predominante em torno de 305° e direção oposta em 125° . No mesmo período, a altura significativa das ondas variou entre 1,11 e 2,54 m, com direção média predominante de 120° (leste-sudeste).

A Figura 3 apresenta as séries temporais comparativas entre os resultados do modelo e as observações. Para a elevação da superfície do mar (Figura 3a), o modelo representou com fidelidade as oscilações de maré, reproduzindo bem a amplitude e a fase. No caso das correntes, a contribuição relativa das componentes astronômicas e não astronômicas foi avaliada

por meio do cálculo da variância, mostrando que 90,4% da variabilidade é explicada pela maré astronômica, confirmando a predominância desse forçante no estuário. Por essa razão, aplicou-se o filtro de Godin às séries temporais, permitindo isolar a parcela astronômica. Assim, apenas os resultados filtrados foram representados nos gráficos. Considerando-se a forte canalização das correntes ao longo do eixo do acesso portuário e sua reversão associada ao ciclo de maré, as correntes foram representadas pela componente ao longo do canal, com sinal positivo e negativo indicando, respectivamente, as fases de enchente e vazante. O modelo demonstrou boa correspondência com as observações (Figura 3b). Para as ondas, além do Delft3D, foram incluídos os modelos WW3 global da NOAA (2025) e WW3 regional do CHM, com resoluções de 25 e 4 km, respectivamente. Os resultados utilizados correspondem aos pontos de grade mais próximos da estação HMSUWAVE: $8^\circ 30' S$, $34^\circ 30' W$ (distante 52 km) para o

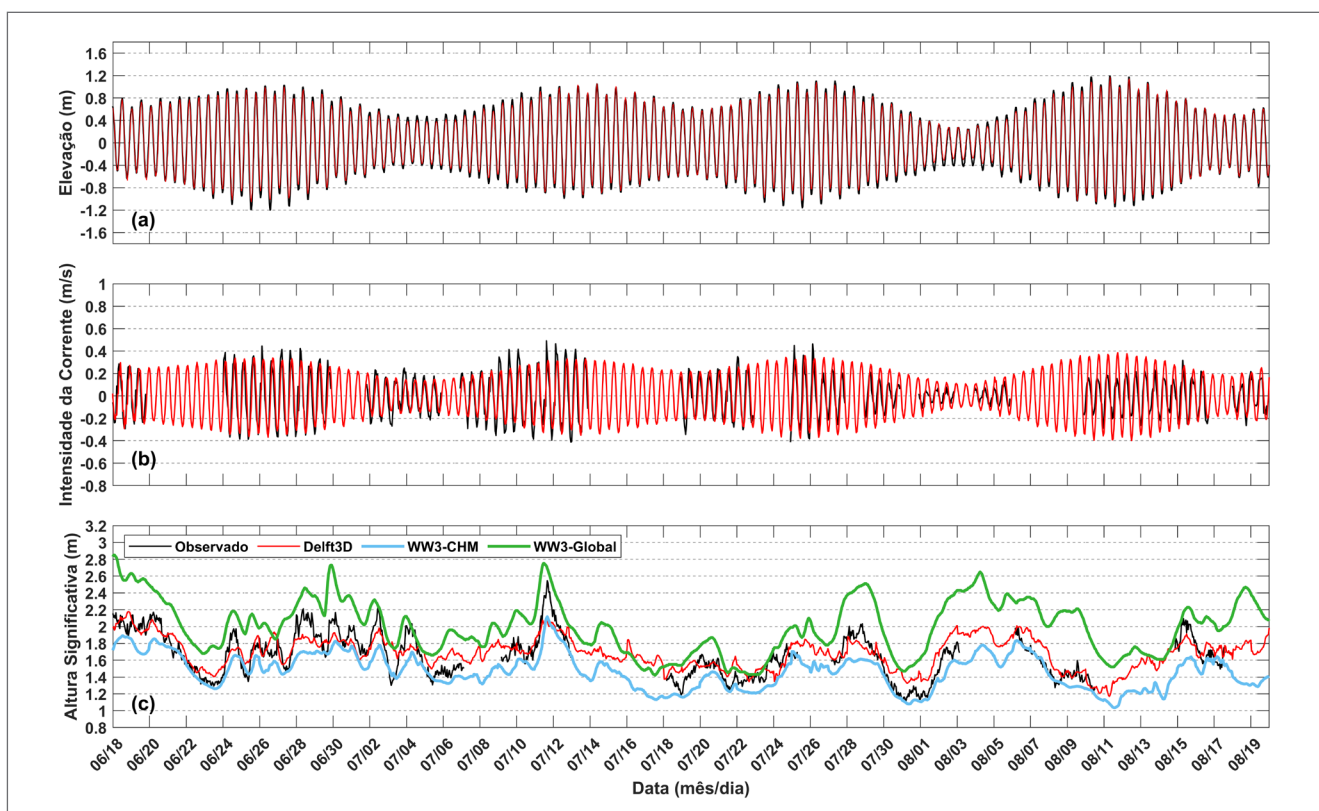


Figura 3. Comparação entre os resultados do modelo (vermelho) e as observações (preto). (a) Elevação da superfície do mar. (b) Velocidade média da corrente na coluna d'água, filtrada pelo método de Godin para isolar a componente astronômica (valores positivos indicam maré de enchente e negativos maré de vazante). (c) Altura significativa de ondas, incluindo também os resultados do modelo WW3-Global da NOAA (verde) e do modelo regional WW3-CHM (azul).

WW3-Global e 8°24' S, 34°56' W (distante 0,8 km) para o WW3-CHM. O Delft3D apresentou desempenho superior aos demais, representando de forma consistente a variabilidade observada, ainda que tenha ocorrido subestimação em eventos mais energéticos (Figura 3c). Essa limitação pode estar relacionada à sub-representação dos ventos locais e das ondas pelos modelos regionais utilizados nas condições de contorno, aspectos a serem investigados em estudos futuros.

A Figura 4 apresenta os gráficos de dispersão entre resultados do modelo e observações, acompanhados das estatísticas de desempenho para cada variável. Para a elevação da superfície do mar, o modelo obteve excelente ajuste ($SS = 0,998$; $RMSE = 0,049$ m). As correntes filtradas mostraram desempenho consistente ($SS = 0,905$; $RMSE = 0,115$ m/s), confirmando a boa representação da dinâmica local, assim como os resultados não filtrados, não incluídos nos gráficos, que mostraram desempenho semelhante ($SS = 0,886$; $RMSE = 0,130$ m/s). Com relação às ondas, o Delft3D apresentou melhor desempenho geral ($SS = 0,885$; $RMSE = 0,150$ m), superando o WW3-CHM ($SS = 0,842$; $RMSE = 0,195$ m) e o WW3-Global ($SS = 0,652$; $RMSE = 0,420$ m), cujos resultados não estão representados nos gráficos. Para a análise de extremos, adotou-se o percentil 95 das observações ($P95 = 2,10$ m) como referência para os 5% de valores mais altos do período. Nessa condição, o Delft3D manteve menor erro ($RMSE = 0,238$ m) em relação ao WW3-CHM ($RMSE = 0,368$ m) e ao WW3-Global ($RMSE = 0,358$ m), confirmando a maior habilidade em reproduzir os eventos de maior energia observados.

4.2. PREVISÃO DE CORRENTES E ONDAS

O modelo numérico implementado para o Porto de Suape gera prognósticos de correntes e ondas para toda a área do domínio interno (maior resolução). Esses prognósticos podem ser representados por mapas que sintetizam os campos correntes e ondas, permitindo uma avaliação detalhada das condições do mar na região. A Figura 5 apresenta um exemplo desses produtos: o campo de direção média e velocidade da corrente na coluna d'água (Figura 5a), em que a intensidade é representada pela escala de cores e a direção pelos vetores brancos; e o campo de altura significativa de ondas e direção média de propagação (Figura 5b) também é indicado pela escala de cores e vetores brancos. Essa capacidade de gerar previsões horárias possibilita um acompanhamento contínuo e atualizado das condições na área de interesse.

Como parte de sua operacionalização, os resultados do modelo foram integrados ao sistema PAM, que disponibiliza gratuitamente prognósticos horários de correntes e ondas para a região de Suape, com horizonte de até 72 horas. A plataforma, acessível em ambiente *web* e por aplicativo móvel, permite ao usuário interagir com os resultados do modelo, ampliar a visualização de áreas de interesse, selecionar pontos específicos do domínio e gerar gráficos de séries temporais das previsões. Além disso, a plataforma oferece funcionalidades adicionais, como a medição de distâncias, o traçado de rotas, a visualização de meteorogramas, cartas sinóticas e outros produtos ambientais, consolidando-se como uma ferramenta de apoio à segurança da navegação.

A Figura 6 ilustra a interface do PAM para a região de Suape (<https://pam.dhn.mar.mil.br/suape.html>).

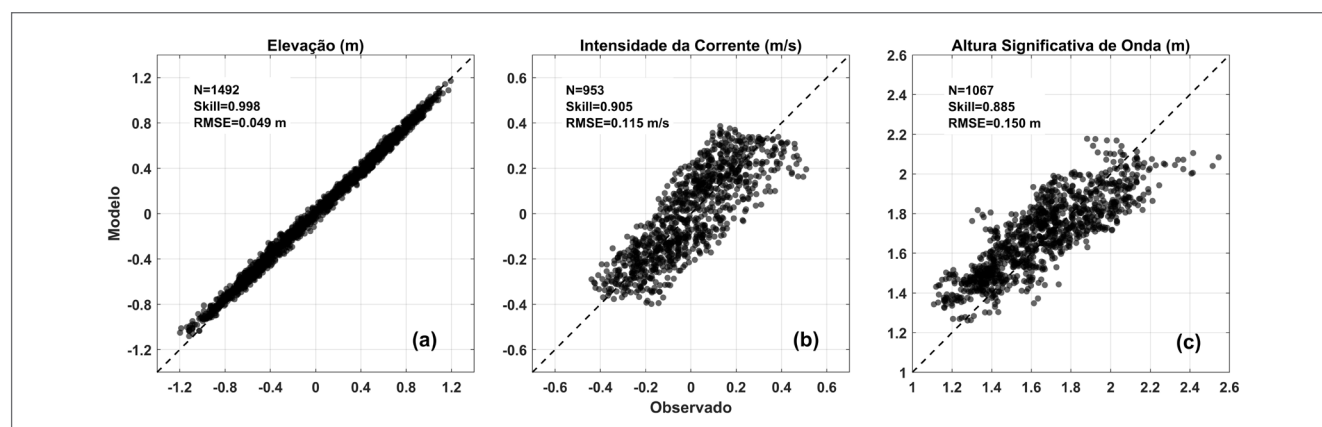


Figura 4. Gráficos de dispersão entre os resultados do modelo (eixo vertical) e as observações (eixo horizontal) para o período de 18 de junho a 20 de agosto de 2025. (a) Elevação da superfície do mar. (b) Velocidade média da corrente no meio da coluna d'água, filtrada pelo método de Godin. (c) Altura significativa das ondas. O número de observações (N), *Skill Score* (SS) e RMSE estão indicados em cada painel.

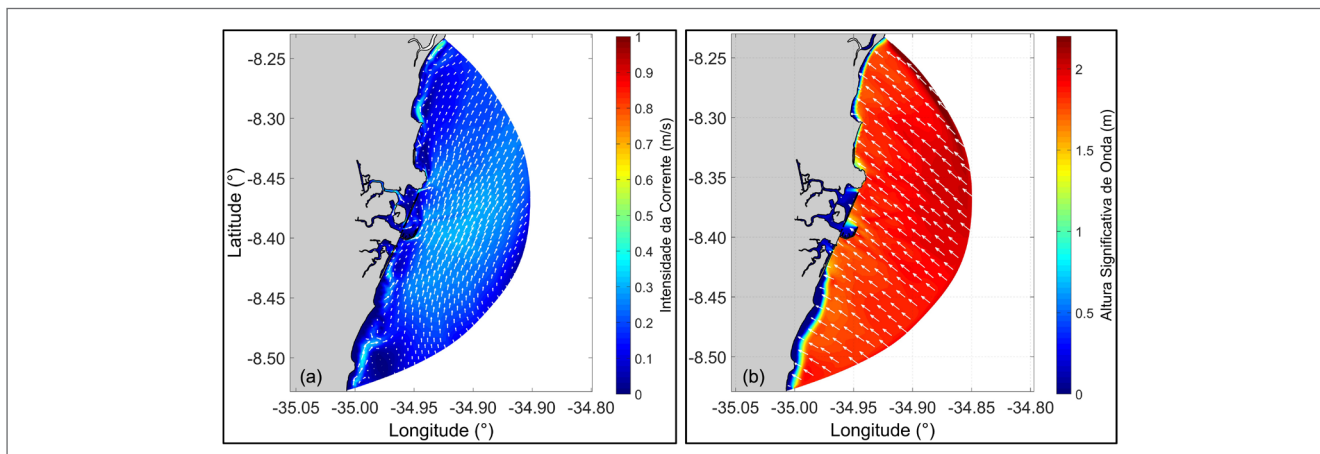
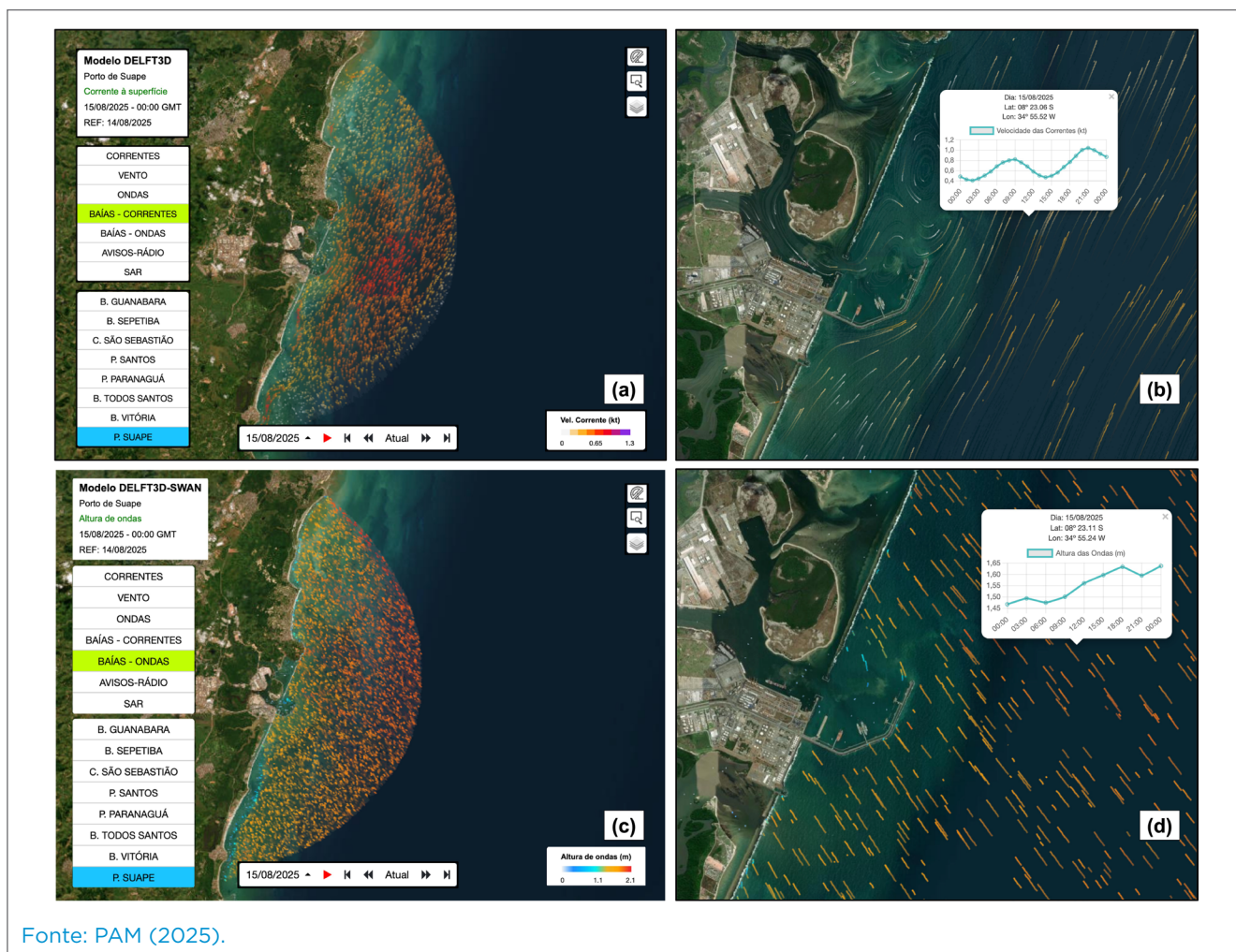


Figura 5. Exemplo de prognósticos gerados pelo modelo para o Porto de Suape: (a) direção média e velocidade da corrente na coluna d’água, com intensidade indicada pela escala de cores e direção pelos vetores brancos; (b) altura significativa e direção média das ondas, representadas pela escala de cores e vetores brancos.



Fonte: PAM (2025).

Figura 6. Visualização da plataforma Previsão Ambiental Marinha (PAM) para o Porto de Suape. (a) Campo de correntes. (b) Série temporal da velocidade de corrente em ponto selecionado do domínio. (c) Campo de ondas. (d) Série temporal da altura significativa das ondas em ponto selecionado do domínio.

Nela, observa-se a visualização das correntes previstas com a velocidade da corrente e sua direção indicadas por vetores coloridos, sendo possível extrair séries temporais para pontos do domínio (Figura 6b). De forma análoga, a Figura 6c mostra o prognóstico de ondas, enquanto a Figura 6d, com ampliação no entorno do Porto de Suape, apresenta a série temporal de altura significativa correspondente a um ponto selecionado no domínio. Esses exemplos demonstram a aplicabilidade da plataforma na disponibilização de previsões, reforçando seu potencial para fornecer informações úteis e de fácil acesso aos usuários.

Ressalta-se, como limitação do estudo, a disponibilidade restrita de dados observacionais de correntes, concentrados na região do canal de acesso ao porto, o que limita uma avaliação espacial mais abrangente. Ainda assim, a localização das medições é consistente com o objetivo do estudo, voltado ao suporte à segurança da navegação nas áreas de acesso e de manobra portuária. Ademais, os padrões de circulação simulados ao longo do domínio do modelo mostram-se coerentes com a hidrodinâmica local descrita na literatura.

Os resultados obtidos neste estudo também evidenciam o potencial de uso das previsões de correntes e ondas geradas pelo modelo como insumo para aplicações na cartografia náutica digital. A capacidade do sistema de fornecer campos horários de alta resolução, devidamente validados, atende aos requisitos técnicos necessários para a futura integração dessas informações como camadas ambientais em cartas de navegação eletrônica baseadas no modelo de dados hidrográficos S-100, especialmente nas especificações S-104 (nível do mar) e S-111 (correntes de superfície). Essa interface entre modelagem numérica e cartografia náutica representa um avanço conceitual relevante para o apoio à navegação em ambientes portuários complexos.

5. CONCLUSÃO

Este estudo apresentou a implementação e a avaliação de um modelo numérico operacional acoplado de circulação e ondas, em alta resolução, para a região do Porto de Suape, integrado à plataforma PAM. O modelo foi configurado com forçantes atmosféricas, de circulação e de ondas provenientes de modelos regionais operados pelo Centro

de Hidrografia da Marinha e avaliado com base em dados observacionais de elevação da superfície do mar, correntes e ondas obtidos no programa de monitoramento meteorológico do porto.

Os resultados demonstraram elevado desempenho do modelo na representação dos principais processos hidrodinâmicos da região. A elevação da superfície do mar foi reproduzida com excelente concordância, refletida em baixos erros e elevados valores de Skill Score, confirmando a adequada representação do regime de marés. As correntes médias na coluna d'água também apresentaram desempenho consistente, com erros reduzidos e alta habilidade, demonstrando a capacidade do modelo de representar a circulação local dominada por forçantes astronômicas. Para as ondas, o modelo mostrou desempenho superior ao dos modelos global e regional de referência, mantendo maior habilidade mesmo durante eventos extremos, embora com tendência à subestimação das alturas significativas mais elevadas.

A integração do modelo à plataforma PAM representa um avanço concreto ao viabilizar a disponibilização de previsões meteorológicas de alta resolução para a região do Porto de Suape em uma plataforma gratuita e interativa, ampliando de forma efetiva o suporte à segurança da navegação, ao planejamento logístico, à gestão portuária e à gestão ambiental. Assim, o sistema desenvolvido consolida-se como ferramenta eficaz de apoio à tomada de decisão em ambientes portuários de elevada complexidade hidrodinâmica.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Capitão de Mar e Guerra Luiz Claudio Monteiro da Fonseca, Coordenador Científico do projeto REMO, e a Gustavo Mesquita da Silva, pesquisador do projeto REMO, o apoio na integração do modelo ao sistema PAM. Também agradece a Alexandre De Caroli, Diretor de Operações da Hidromares, e à Dra. Daniele Laura Bridi Mallmann, Diretora de Sustentabilidade do Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros, a disponibilização dos dados observacionais utilizados na verificação do modelo. Por fim, agradece à equipe da Seção de Modelagem Oceanográfica do CHM os comentários e discussões que contribuíram para o aprimoramento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANDROULIDAKIS, Y.; MAKRIS, C.; KOLOVOYIANNIS, V.; KOMBIADOU, K.; KRESTENITIS, Y.; KARTSIOS, S.; MALLIOS, Z. Operational platform for metocean forecasts in Thermaikos Gulf (Aegean Sea, Greece). *Journal of Operational Oceanography*, v. 18, n. 2, p. 123-149, 2025. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2025.2503569>
- BARROS, J. S. *Climatologia de marés e batimetria da região costeira de Suape-PE*. 2009. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- BATTJES, J. A.; JANSSEN, J. P. F. M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Coastal Engineering*, v. 1, n. 1, p. 1-16, 1978. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(79\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0378-3839(79)90016-7)
- BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions. Part I: Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. C4, p. 7649-7666, 1999. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- BRASIL. Marinha. *Plano Estratégico da Marinha (2040)*. Brasília, DF: MB, 2020. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/sites/all/modules/pub_pem_2040/book.html. Acesso em: 19 ago. 2025.
- CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM). *Modelagem numérica*. CHM. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/pagina-basica/modelagem-numerica-0>. Acesso em: 27 jul. 2025.
- CUCCO, A.; SIMEONE, S.; QUATTROCCHI, G.; SORGENTE, R.; PES, A.; SATTA, A.; SINERCHIA, M.; PERILLI, A.; RIBOTTI, A. Operational oceanography in ports and coastal areas: applications for the management of pollution events. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 12, n. 3, p. 380, 2024. <https://doi.org/10.3390/jmse12030380>
- EGBERT, G. D.; EROFEEVA, S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 19, n. 2, p. 183-204, 2002. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2)
- FABIN, C. E.; NEUMANN, V. H.; BARROS, J. S.; SILVA, L. A. Mudanças morfodinâmicas na área estuarina de Suape (PE) em função da construção do porto. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 4, p. 1472-1491, 2020.
- GODIN, G. *The analysis of tides*. Toronto: University of Toronto Press, 1972.
- HASSELMANN, K. On the spectral dissipation of ocean waves due to white capping. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 6, n. 1-2, p. 107-127, 1974. <https://doi.org/10.1007/BF00232479>
- INTEGRATED OCEAN OBSERVING SYSTEM (IOOS). *QARTOD: Quality Assurance of Real-Time Oceanographic Data*. Disponível em: <https://ioos.noaa.gov/project/qartod/>. Acesso em: 30 ago. 2025.
- KOENING, M. L.; NEUMANN-LEITÃO, S.; MACEDO, S. J. Impactos da construção do porto de Suape sobre o ecossistema estuarino. *Tropical Oceanography*, v. 30, n. 1, p. 1-20, 2002.
- LESSER, G. R.; ROELVINK, J. A.; VAN KESTER, J. A. T. M.; STELLING, G. S. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, v. 51, n. 8-9, p. 883-915, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>
- MAKRIS, C.; BALTİKAS, V.; ANDROULIDAKIS, Y.; KONTOS, Y.; NAGKOULIS, N.; KAZAKIS, I.; KARAMBAS, T.; PAPADIMITRIOU, A.; METALLINOS, A.; CHONDROS, M.; EMMANOULIDOU, M.-E.; MALLIOURI, D.; KLONARIS, G.; TSOUKALA, V.; MEMOS, C.; SPILIOPOULOS, G.; ZISSIS, D. Integrated modelling of sea-state forecasts for safe navigation near and inside ports: the Accu-Waves platform. *Applied Mathematical Modelling*, v. 94, p. 377-395, 2021.
- MELO FILHO, J. R. *Caracterização hidrodinâmica da região costeira e estuarina de Suape (PE)*. 2017. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). National Centers for Environmental Prediction. *WaveWatch III (WW3) Global Wave Model*. NOAA. Disponível em: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/>. Acesso em: 15 ago. 2025.
- NEUMANN, L. E.; NEUMANN-LEITÃO, S.; KOENING, M. L.; MACEDO, S. J. Modelo hidrodinâmico do estuário de Suape (PE). *Tropical Oceanography*, v. 26, n. 2, p. 115-132, 1998.
- ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL (OHI). *S-100: Universal Hydrographic Data Model*. Monaco: IHO, 2025. Disponível em: <https://iho.int/en/s-100-universal-hydrographic-data-model>. Acesso em: 04 ago. 2025.
- PREVISÃO AMBIENTAL MARINHA (PAM). *Portal*. PAM. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/pam>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- ROELVINK, J. A.; WALSTRA, D. J. R. Keeping it simple by using complex models. *Advances in Hydro-Science and Engineering*, v. 6, n. 1, p. 1-15, 2005.
- SANTOS, M. C. *Dinâmica sedimentar nas desembocaduras fluviais de Suape (PE)*. 2022. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.
- SOTILLO, M. G.; MOURRE, B.; MESTRES, M.; LORENTE, P.; AZNAR, R.; GARCÍA-LEÓN, M.; LISTE, M.; SANTANA, A.; ESPINO, M.; ÁLVAREZ, E. Coastal ocean forecasting in Spanish ports: the SAMOA operational forecast systems. *Journal of Operational Oceanography*, v. 12, n. 1, p. 1022, 2020.
- SUAPE. *Complexo Industrial Portuário de Suape*. Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br>. Acesso em: 8 ago. 2025.
- VASCONCELLOS, C. A. C. *Caracterização morfodinâmica e sedimentar dos estuários dos rios Ipojuca e Massangana, litoral sul de Pernambuco*. 2019. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Physical Geography*, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>