AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS DE ONDAS GLOBAIS E LOCAIS PARA PREVISÃO DE ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA NA BAÍA DE SANTOS, SP

PERFORMANCE EVALUATION OF GLOBAL AND LOCAL WAVE MODELS FOR SIGNIFICANT WAVE HEIGHT FORECASTING IN SANTOS BAY, SP

Kauê Leocádio Gomes, Matheus Souza Ruiz, Regina de Souza Ferreira, Alexandra Franciscatto Penteado Sampaio, Vinicius Santos Pessanha

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Civil
E-mail para contato: kaueleocadio@hotmail.com

RESUMO – As mudanças climáticas têm intensificado a frequência e a magnitude dos eventos extremos, como ondas e marés altas na Baía de Santos. Este estudo tem como objetivo avaliar a acurácia de quatro modelos locais (SWAN v1, SWAN v2, Delft3D e ADCIRC) e dois modelos globais (CMS-Wave e WAVEWATCH III) na previsão da altura significativa das ondas na Ilha das Palmas, em Santos, SP, Brasil, durante o ano de 2023. Foram aplicadas métricas estatísticas, como Viés, RMSE, Willmott Skill Score e correlação. Os resultados mostram que todos os modelos apresentam bom desempenho na previsão da altura significativa das ondas na Baía de Santos, especialmente os modelos em escala local, com valores de Willmott superiores a 0,88 e RMSE inferiores a 0,37 m. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que todos os modelos apresentam boa capacidade de prever e simular as variações de altura significativa das ondas na Baía de Santos, com destaque do modelo local Delft3D pela maior concordância com os dados observados, apresentando menores erros e maior correlação no período analisado.

Palavras-chave: Altura significativa das ondas; Baía de Santos; modelos numéricos.

ABSTRACT – Climate change has intensified extreme events in Santos Bay, such as high waves and elevated tides. This study aims to evaluate four local models (SWAN v1, SWAN v2, Delft3D, and ADCIRC) and two global models (CMS-Wave and WAVEWATCH III) in simulating significant wave height at Ilha das Palmas, Santos, SP, Brazil, during 2023. Statistical metrics such as Bias, RMSE, Willmott Skill Score, and correlation were applied. The results show that all models perform well in predicting significant wave height in Santos Bay, especially the local scale models, with Willmott values above 0.88 and RMSE below 0.37 m. Based on the obtained results, it is concluded that the models have good capability to predict and simulate significant wave height variations in Santos Bay, with the Delft3D model standing out for its greater agreement with observed data, presenting lower errors and higher correlation.

Keywords: Significant wave height; numerical models; Santos Bay.

Tipo do trabalho: (X) Iniciação científica ( ) Iniciação tecnológica ( ) Extensão

1. INTRODUÇÃO

No atual cenário de mudanças climáticas, comunidades costeiras em todo o planeta têm sofrido inundações causadas por eventos meteoceanográficos extremos, cada vez mais frequentes e intensos (Church et al., 2013). A cidade de Santos, localizada no litoral do estado de São Paulo, destaca-se em sua área insular, como uma das cidades de maior densidade populacional do Brasil e a mais populosa do litoral de São Paulo com aproximadamente 418 mil habitantes (IBGE, 2022). Eventos extremos de ressacas do mar podem impactar diretamente a vida de seus habitantes, afetando desde a rotina diária até questões mais graves de segurança e infraestrutura (Ribeiro *et al*., 2019). Deste modo, a previsão das condições marítimas tem sido essencial para possibilitar a mitigação dos impactos destes eventos e a implementação e gestão de estratégias de segurança, como Proteção e Defesa Civil.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de modelos numéricos globais e modelos em escala local na simulação e previsão de altura significativa das ondas na região da Baía de Santos.

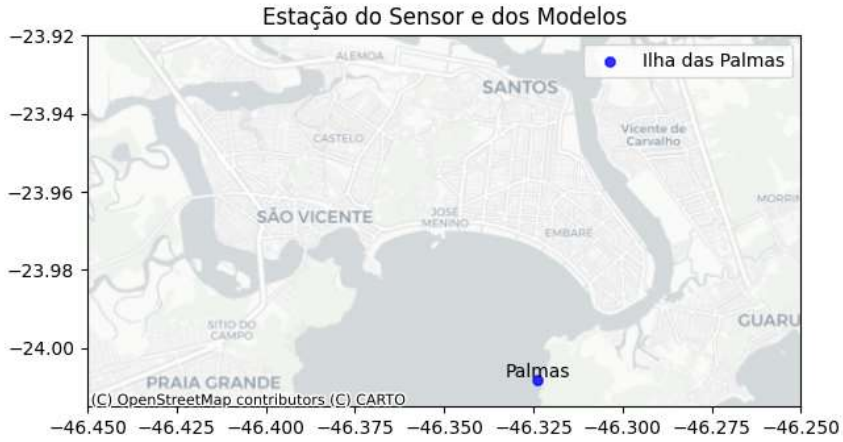
2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, foram utilizados os dados de altura significativa das ondas registrados pelo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) da rede de monitoramento da Praticagem de São Paulo (SPPilots) na estação Palmas (Figura 1), localizada na baía de Santos, durante todo o ano de 2023. Foram utilizados os resultados de previsão dos modelos globais de ondas *CMS-Wave* (Ardhuin *et al*., 2010) e *WW3* (Cheung, 2010); bem como dos modelos numéricos de ondas em escala local *ADCIRC*, fornecidos pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, bem como dos modelos S*WAN* v1 e S*WAN* v2 (Ribeiro *et al*., 2019) e *Delft3D-WAVE* (Ribeiro *et al*., 2022) – que são processados operacionalmente pelo Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas da Universidade Santa Cecília (NPH-UNISANTA).

A avaliação dos modelos se deu através de gráficos de dispersão e séries temporais, bem como da aplicação dos parâmetros estatísticos Viés, Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Coeficiente de Correlação de *Pearson* (CC) e *Willmott Skill Score* (WILLMOTT), proporcionando uma avaliação abrangente do desempenho dos modelos numéricos (Buckley *et al*., 2004; Steyn e Mckendry, 1998; Willmott, 1982). A análise concentrou-se especialmente nos diagramas de dispersão, que são essenciais para avaliar a precisão das previsões. Estes diagramas permitem uma visualização direta da relação entre os valores modelados e

observados, ajudando a identificar padrões de dispersão, viés e correlação entre os dados e os modelos.

Figura 1: Localização geográfica do ponto analisado, considerando a região da Baía de Santos.



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 e a Figura 2 apresentam o desempenho dos modelos numéricos globais e locais avaliados. Entre os modelos globais, é possível observar que o *CMS-Wave* apresenta maior CC em relação ao *WW3* e representa bem os períodos em que a altura das ondas é superior a 1,5 m, mas superestima as observações em períodos em que a altura das ondas é inferior a 1,5 m. Os modelos locais conseguem reproduzir com melhor precisão a variação de altura significativa das ondas na Baía de Santos, com RMSE inferior a 0,37 m, CC acima de 0,85 e WILLMOTT acima de 0,88.

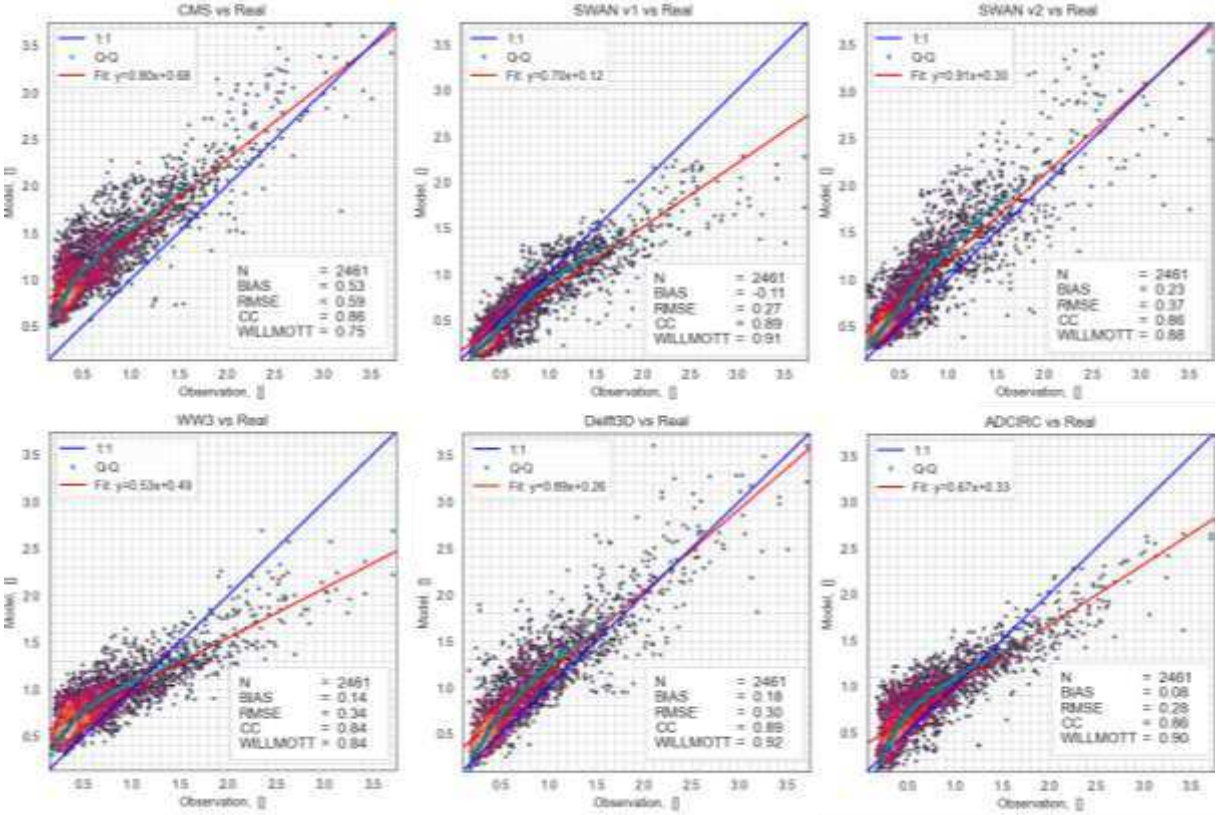
É importante ressaltar que os modelos processados pelo NPH-UNISANTA *SWAN* v1 e *SWAN* v2 foram desenvolvidos com o objetivo de representar duas bandas de altura significativa das ondas (Hs), sendo o primeiro para condições normais (< 1,5 m) e o segundo para eventos mais intensos (≥ 1,5 m), respectivamente; enquanto o Delft3D foi desenvolvido com o objetivo de representar ambas as condições, assim como é o *ADCIRC*, processado pela DHN da Marinha do Brasil.

Entre todos os modelos analisados, o SWAN v1 foi o que melhor representou os períodos de Hs < 1,5 m, com RMSE de 0,18 m e WILLMOTT de 0,92; para os períodos de Hs ≥ 1,5 m, o Delft3D foi quem apresentou os melhores resultados, com RMSE de 0,36 m e WILLMOTT de 0,85. Considerando todo o período de dados, os modelos *SWAN v1*, *Delft3D* e *ADCIRC* apresentaram WILLMOTT superior a 0,90.

Tabela 1: Avaliação dos modelos numéricos globais CMS e WW3 e locais SWAN v1, SWAN v2, Delft3D e ADCIRC na representação de altura significativa das ondas, através dos índices estatísticos, para a estação Palmas.

Modelo	BIAS			RMSE			CC (0 - 1)			WILLMOTT (0 - 1)		
	Geral	< 1,5m	≥ 1,5m	Geral	< 1,5m	≥ 1,5m	Geral	< 1,5m	≥ 1,5m	Geral	< 1,5m	≥ 1,5m
WW3	0,141	0,201	-0,291	0,335	0,297	0,471	0,838	0,737	0,599	0,844	0,760	0,618
CMS	0,531	0,500	0,293	0,541	0,555	0,443	0,863	0,676	0,772	0,750	0,563	0,801
SWAN v1	-0,108	**-0,061**	-0,341	**0,269**	**0,175**	0,511	0,888	**0,871**	0,583	0,914	**0,923**	0,575
SWAN v2	0,228	0,218	0,129	0,367	0,299	0,469	0,858	0,825	0,565	0,883	0,820	0,730
Delft3D	0,177	0,183	**0,058**	0,301	0,267	**0,356**	**0,890**	0,837	0,725	**0,916**	0,849	**0,845**
ADCIRC	**0,080**	0,127	-0,263	0,285	0,248	0,411	0,855	0,776	**0,748**	0,902	0,849	0,725

Figura 2: Diagramas de Dispersão da Altura Significativa da Onda (em metros) no ponto Ilha das Palmas para os modelos *CMS, SWAN v1, SWAN v2, WW3, Delft3D* e *ADCIRC* (da esquerda para a direita, de cima para baixo).



4. CONCLUSÃO

Este estudo revelou que todos os modelos analisados são capazes de representar adequadamente a agitação marítima no ponto Ilha das Palmas, com correlações superiores a 0,86. O modelo *SWAN v1* foi quem melhor representou os períodos de Hs < 1,5 m, enquanto o *Delft3D* se destacou para os períodos de Hs ≥ 1,5 m. Considerando todo o período de dados, os modelos *SWAN v1*, *Delft3D* e *ADCIRC* apresentaram WILLMOTT superior a 0,90. No entanto é valido ressaltar que, embora os modelos numéricos globais não tenham apresentado os melhores índices em comparação aos modelos locais, eles apresentaram bons desempenhos que podem ainda ser aprimorados com a implementação de técnicas de aprendizado de máquina.

Agradeço à Diretoria de Hidrografia e Navegação Marinha do Brasil pelo fornecimento dos resultados do modelo *ADCIRC* e ao Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas da Universidade Santa Cecília pelo auxílio na construção da análise e por disponibilizarem os resultados de seus modelos de ondas.

5. REFERÊNCIAS

Ardhuin F, Rogers E, Babanin AV, Filipot J, Magne R, Roland A, et al. Semiempirical Dissipation Source Functions for Ocean Waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation. Journal of Physical Oceanography. 2010 Sep 1;40(9):1917-41.

Buckley RL, Weber AH, Weber JH. Statistical comparison of Regional Atmospheric Modelling System forecasts with observations. *Meteorological Applications*. 2004 Mar;11(1):67–82.

Cheung KF. WaveWatch III (WW3) Global Wave Model. The Pacific Islands Ocean Observing System (PacIOOS). 2010.

IBGE. Censo 2022 [Internet]. Available from: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html

Ribeiro RB, Ruiz MS, Sampaio AFP, Oliveira FR, Santos AJ, Borges JM, Pires CP. IARA -BS | Implantação do sistema de alerta para ressacas e alagamentos na baixada santista. *Even3* [Internet]. 2022 Oct 11 [cited 2024 Sep 16];1:1.

Ribeiro RB, Leitão JMCFL, Leitão PMCFL, Puia HL, Sampaio AFP. Integration of high-resolution metocean forecast and observing systems at Port of Santos. In: Proceedings of IX PIANC-COPEDEC; 2016 Sep 16-21; Rio de Janeiro, Brazil. Rio de Janeiro: PIANC; 2016.

Steyn DG, McKendry IG. Quantitative and Qualitative Evaluation of a Three-Dimensional Mesoscale Numerical Model Simulation of a Sea Breeze in Complex Terrain. *Monthly Weather Review* [Internet]. 1988 Oct [cited 2024 Sep 9];116(10):1914–26. Available from: https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/116/10/1520-0493_1988_116_1914_qaqeoa_2_0_co_2.xml

Willmott CJ. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society* [Internet]. 1982 Nov 1;63(11):1309–13.