

PREVISÃO OPERACIONAL DE SUPORTE À ENTRADA E SAÍDA DE NAVIOS NO PORTO DE SANTOS – SÃO PAULO.

João Ribeiro¹, José Chambel Leitão¹, Alexandra Franciscatto Penteado², Renan Braga Ribeiro², Paulo Leitão¹, Adélio Silva¹

¹Hidromod-modelação em engenharia Lda.

²Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas - Universidade Santa Cecília

joao.ribeiro@hidromod.com; jcleitao@hidromod.com; canastra@unisanta.br;
renanribeiro@unisanta.br; paulo.chambel@hidromod.com; adelio@hidromod.com

Resumo

O clima de agitação marítima é um dos fatores condicionantes do acesso ao Porto de Santos por via da limitação de calado à entrada e saída dos navios. O clima de agitação local é moderado mas o calado máximo de operação no canal de navegação, na zona sujeita a ondulação, é atualmente de 13.2 m, podendo ter um acréscimo de até 1 m em função das condições de maré. Sendo este o maior porto da América Latina com uma movimentação de cerca de 114 milhões de toneladas e 4600 navios, em 2016, compreende-se que a operação nestas condições necessite de um suporte de medição e previsão meteo-oceanográfica compatível.

A praticagem de Santos tem um conjunto de equipamentos de medição em tempo real que inclui um ADCP que mede a altura significativa e o período da onda próximo da entrada do canal de navegação. Foi implementado para a zona um sistema de previsão meteo-oceanográfica e um sistema de previsão dinâmica da folga sob a quilha do navio. A utilização destes sistemas permite melhorar as condições de segurança da entrada e saída de navios, otimizando em simultâneo as janelas de tempo disponíveis para as operações.

A componente meteo-oceanográfica inclui medições (ADCP, marégrafos, estações meteorológicas) e previsões meteorológicas, hidrodinâmicas e de agitação marítima (WaveWatch3 e SWAN), tendo sido implementadas cadeias de modelos que começam à escala do Atlântico Sul e chegam à escala local do Porto. O sistema é suportado pela plataforma AQUASAFE que controla um conjunto de simulações numéricas baseadas em modelos que produzem informação na forma de mapas e séries temporais de diferentes parâmetros (altura significativa, período, direção).

A análise efetuada teve especial atenção a eventos de altura significativa elevada, uma vez que estes são os que têm um maior impacto sobre a atividade portuária local.

Neste processo os resultados dos modelos foram comparados com observações em três locais distintos. Verificou-se que existe capacidade de prever a agitação local mas que existem algumas limitações na representatividade das medições no ADCP local. É avaliada a fiabilidade das previsões, as margens de erro e os processos mais importantes para a propagação das ondas na Baía de Santos.

Palavras-chave: AQUASAFE, WaveWatch3, SWAN, modelos espectrais, Santos.

1 Introdução

A presente comunicação tem como objetivo apresentar uma análise sobre a propagação da agitação marítima ao largo até ao interior da Baía de Santos. É dada especial atenção a eventos de altura significativa elevada nos anos de 2016 e 2017; são estes eventos que representam um maior impacto sobre a atividade portuária.

A análise efetuada tem como base o sistema operacional de previsão de ondas implementado pela HIDROMOD em parceria com a Universidade Santa Cecília, sendo as previsões disseminadas via sistema AQUASAFE. Este sistema de previsão tem duas componentes: uma de grande escala simulada pelo modelo WaveWatch 3 (WW3; Tolman, 1999) e outra de escala costeira/local simulada pelo modelo SWAN (Booij et al., 1999).

Foi efetuada uma calibração e validação do modelo WW3 tendo como base uma análise de sensibilidade focada no número de frequências e direções de cálculo, e também a sensibilidade do modelo à discretização temporal do campo de ventos. As observações utilizadas na calibração e validação referem-se a duas boias localizadas ao largo, uma localizada na batimétrica dos 50 m e outra na dos 200 m (Figura 1).

A análise, à escala da Baía de Santos, é baseada no modelo SWAN (Booij et al., 1999) e validada com dados do ADCP. O ADCP encontra-se fundeado na baía de Santos em profundidades da ordem de 10 m (Figura 1).

Esta análise foi complementada com modelos de alta resolução (10 m) que resolvem de forma detalhada os principais processos físicos que condicionam a propagação de uma onda de vento. Os modelos utilizados foram: MOHID Boussinesq (Lopes et al., 2005), MOHID Não-Hidrostático (Silva et al., 2016) e Simulating WAVes till SHore (SWASH, Zijlema et al., 2011). Relativamente ao modelo SWAN (Booij et al., 1999), estes modelos permitem avaliar de forma mais consistente, do ponto de vista físico, os efeitos de refração, difração e reflexão na Baía de Santos. No entanto, são modelos que exigem um grande esforço de cálculo computacional sendo utilizados para simular períodos curtos (da ordem dos minutos).

1.1 Motivação

A plataforma AquaSafe dissemina previsões de agitação marítima de alta resolução para a Baía de Santos. A informação disponibilizada consiste em mapas dos principais parâmetros integrais de ondulação (altura significativa, período de pico, direção média, etc.), mas também séries temporais em locais específicos (estações de observação e pontos de controlo no canal de navegação).

A possibilidade de ter um acesso centralizado, rápido e fácil; em simultâneo, às observações e às previsões de agitação para a localização do ADCP (localizado junto à Ilha das Palmas, Figura 1), permitiu verificar que existe uma tendência para a previsão operacional subestimar a altura significativa durante os períodos de agitação mais intensa (Figura 2). É este o ponto de partida para este estudo.



Figura 1 – Localização dos pontos de medida de parâmetros integrais de agitação marítima. Imagem do lado esquerdo: boias PNBOIA 69150 (200 m) e Rede Ondas (B=50 m) e ADCP. Imagem do lado direito: localização do ADCP no interior da Baía de Santos (próximo da Ilha das Palmas).

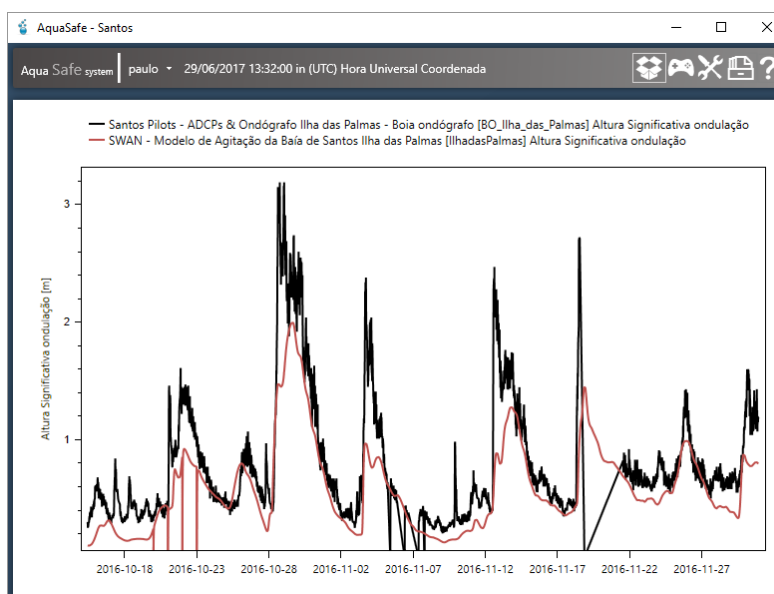


Figura 2 - Previsões operacionais de altura significativa para os meses Outubro e Novembro de 2016 (linha a preto valores medidos ADCP, linha vermelha previsões do modelo Swan).

As observações utilizadas têm origem em três equipamentos distintos (Figura 1):

- Boia PNBOIA 69150 (-44.92 -25.27, fundeada a cerca de 200m, ver <http://www.goosbrasil.org/static/pdf/pnboia/SANTOS.pdf>);
- Boia Santos - Rede Ondas: (-46.167500 -24.350528, fundeada a cerca de 50m, <http://redeondas.furg.br/index.php/pt/>);
- ADCP fundeado na Baía de Santos (-46.326194 -24.004694, fundeado a cerca de 10m).

Analisando as observações recolhidas pela boia ondógrafo PNBOIA 69150, para o mesmo período, é possível ver que os eventos de altura significativa mais elevada ao largo apresentam rumos entre 150° e 240°. Em geral estes eventos estão associados a tempestades tropicais muito intensas, com uma escala temporal que varia entre poucas horas a um dia, geralmente com origem na costa Argentina e que se propagam-se para Norte (Guimarães et al, 2014). Na Figura 3 são apresentados

valores de direção média e altura significativa. A banda a cinzento visa realçar as direções normalmente associadas aos eventos de maior altura significativa.

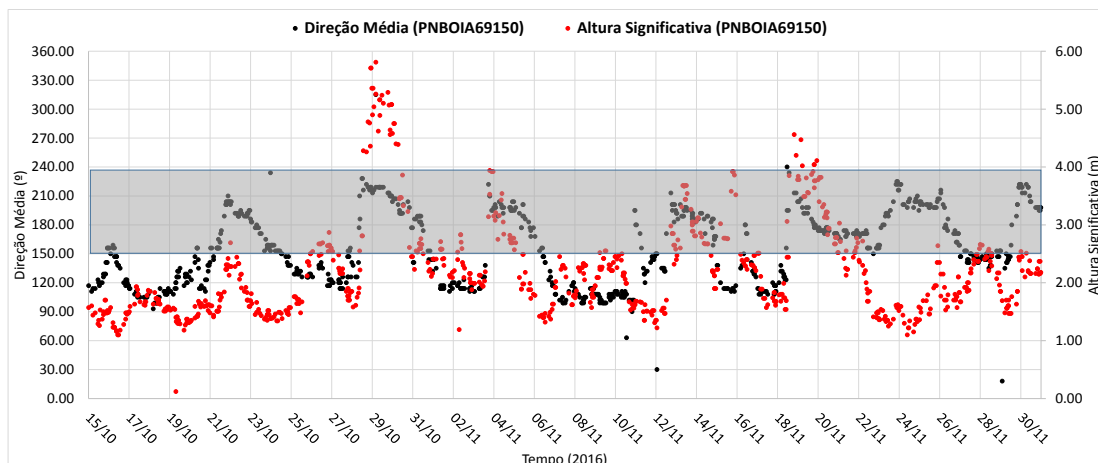


Figura 3 - Medidas de altura significativa (pontos a vermelho) e de direção média (pontos a preto) período em que ocorreram vários eventos de altura significativa elevada (> 2.5 m). A banda das direções compreendidas entre 150° e 240° está assinalada a cinzento.

2 Características dos Modelos

Os modelos WW3 e SWAN seguem uma filosofia muito semelhante. Ambos são modelos de terceira geração para geração e propagação de ondas geradas pelo vento e têm como base a equação de balanço de energia espectral. Ainda assim apresentam algumas diferenças nas equações ao nível dos termos de fonte, de sumidouro e processos físicos que influenciam a propagação das ondas, fazendo com que o WW3 seja mais adequado à larga escala e o SWAN mais adequado a uma escala costeira.

Desenvolvido pela NOAA/NCEP o WAVEWATCH III (WW3) é um modelo de terceira geração para modelação de ondulação de larga escala. Resulta de um melhoramento do modelo WAVEWATCH I, desenvolvido na Delft University of Technology e do WAVEWATCH II, desenvolvido na NASA, Goddard Space Flight Center. Relativamente aos seus antecessores, o WW3 apresenta alterações ao nível das equações de governo, métodos numéricos e parametrizações físicas. O WW3 calcula a equação de equilíbrio da densidade espectral em função do número de ondas e direção.

O modelo considera ainda que as propriedades do meio (profundidade e correntes), bem como o campo de ondas, variam em escalas de tempo e espaço muito maior do que as escalas de variação de uma única onda. Estes dois pressupostos implicam que o modelo pode ser utilizado em escalas espaciais que vão desde um quilómetro até dez quilómetros.

Um dos constrangimentos do modelo é o facto de que a sua parametrização não considerar as situações em que as ondas são fortemente limitadas pela profundidade. Em particular, não é aplicável em zonas de rebentação.

As equações de governo utilizadas no modelo incluem a refração e alongamento do campo de ondas devido a variações espaciais e temporais da profundidade média e também o efeito de correntes.

As parametrizações físicas para a geração e decaimento das ondas incluem a ação do vento, termos de interação não linear, dissipação através de whitecapping e atrito no fundo. É considerado que a propagação é linear e que os termos não lineares relevantes estão incluídos nos parâmetros físicos de geração e decaimento. O modelo inclui ainda a possibilidade de assimilação de dados.

O WW3 utiliza uma grelha espacial em termos de longitude e latitude e o espectro de energia, abrange todas as direções, para isso é discretizado usando um incremento direcional constante e uma grelha variável do número de onda.

Em termos de resultados, é possível obter um conjunto variado de parâmetros tais como a altura significativa, direção, período e ainda a energia espectral da onda em localizações individuais de modo a extrair condições de fronteira para *nesting* com o SWAN.

O SWAN é um modelo computacional de geração e propagação de ondas, concebido para zonas costeiras. Sendo um modelo de terceira geração tem como finalidade obter estimativas realistas da ondulação em zonas costeiras, lagos e estuários a partir de alguns parâmetros como o vento, a batimetria, o atrito e correntes e considera os seguintes processos que atuam na propagação de ondas:

- Refração por efeito do fundo e correntes.
- Difração de ondas (de forma limitada).
- Shoaling por efeito do fundo e correntes.
- Bloqueio e reflexão devido a correntes contrárias.
- Transmissão através, bloqueio ou reflexão devido a obstáculos.

Para geração e dissipação estão presentes os seguintes processos:

- Geração pelo vento.
- Dissipação por whitecapping
- Dissipação por rebentação devido a efeitos de batimetria.
- Dissipação por atrito no fundo.
- Dissipação por interação onda-onda em águas profundas e pouco profundas.

O modelo é baseado na equação de equilíbrio espectral, tem incluído os efeitos de propagação espacial, refração, wave shoaling, geração, dissipação e interações não lineares onda-onda.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \vec{x} \cdot \left[\left(\vec{c}_g + \vec{U} \right) N \right] + \frac{\partial c_{\omega} N}{\partial \omega} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\omega}$$

$$N(\vec{x}, t; \omega, \theta) = \frac{E(\omega, \theta)}{\omega}$$

O modelo pode ser forçado com condições de fronteira teóricas, com condições de fronteira geradas por simulações anteriores do SWAN ou ainda condições de fronteira fornecidas por modelos de agitação marítima de larga escala como o WW3 e WAM.

3 Sistema Operacional

O sistema operacional de previsão de ondas implementado para a zona de Santos através da plataforma Aquasafe tem como base um sistema de modelos encaixados de passo espacial decrescente (Figura 4, Tabela 1).

A previsão operacional começa com modelo WW3, onde o primeiro nível do modelo cobre todo o globo, com um passo espacial de 1° e tem como principal função fornecer condições de fronteira para o domínio da costa do Brasil. O domínio da costa do Brasil tem uma resolução de 0.25° (1/4 do modelo global) e fornece condições de fronteira para o domínio da costa de São Paulo. Este nível permite obter uma previsão offshore operacional para toda a costa do Brasil e fornecer condições de

fronteira a subdomínios de maior resolução. O último domínio operacional do WW3 compreende uma área para a região de São Paulo com uma resolução espacial 0.05° e que fornece condições de fronteira a um primeiro nível do modelo SWAN com uma resolução de 0.01° . Este primeiro nível do SWAN permite considerar alguns dos processos costeiros (atrito, refração, interação onda-onda, rebentação) que influenciam a propagação das ondas perto da costa e, finalmente, fornecer condições de fronteira para um modelo detalhado da Baía de Santos com uma resolução da ordem dos 50 metros.

Todos os níveis são forçados com a informação meteorológica providenciada pelo Global Forecasting System (GFS) que tem uma resolução espacial de 0.5° e temporal de 3 horas.

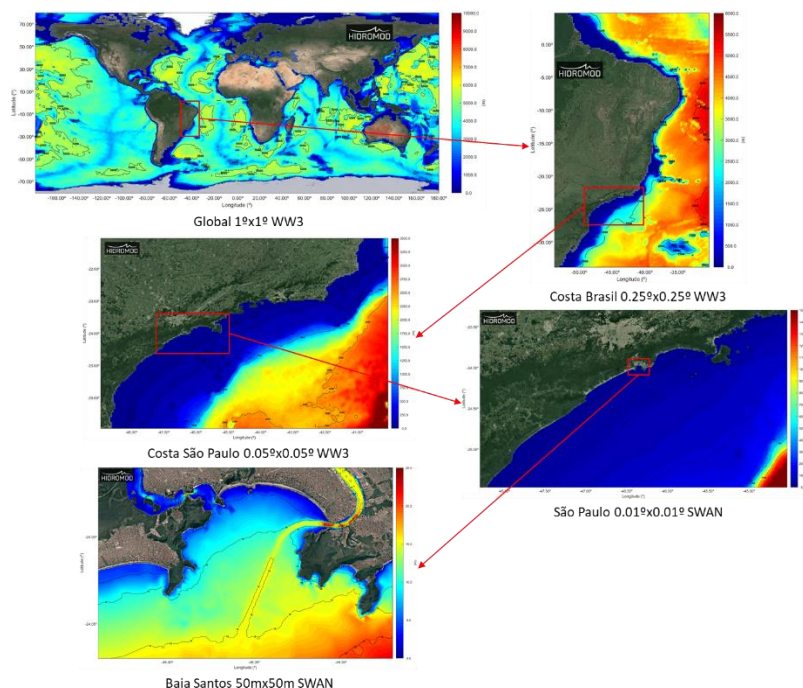


Figura 4 - Esquema de implementação do sistema operacional.

Tabela 1: Resumo da configuração espacial do sistema operacional de agitação marítima.

Domínio	Modelo	Resolução	Extensão Espacial
Global	WW3	$1^\circ \times 1^\circ$	80.5° -179.5° a 180.5° -80.5°
Costa do Brasil (CB)	WW3	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	4.875° -53.875° a -30.125° -33.875°
Costa de São Paulo (CSP)	WW3	$0.05^\circ \times 0.05^\circ$	-21.025° -48.975° a -40.025° -26.975°
Costa São Paulo (CSP)	SWAN	$0.01^\circ \times 0.01^\circ$	-23.29° -48.3° a -44.53° -25.47°
Baía de Santos (BS)	SWAN	50mx50m	-23.96° -46.44° a -46.27° -23.96°

4 Resultados

4.1 Calibração das previsões de agitação ao largo

Na fase de calibração pretende-se avaliar de uma forma sistemática a origem das discrepâncias detetadas anteriormente (Figura 2, Figura 3), sendo o objetivo principal avaliar até que ponto os erros registados no ADCP, localizado no interior da Baía de Santos, poderiam ser reduzidos melhorando a previsão da agitação ao largo.

A calibração do modelo foi realizada a dois níveis:

- Discretização no domínio da frequência e da direção
- Aumento da frequência temporal da solução de vento utilizada para forçar o modelo de agitação.

O período de calibração é de 15/10/2016 a 20/11/2016 (Figura 2, Figura 3).

4.1.1 Frequência

O modelo WW3 considera por defeito uma discretização com base em 25 frequências de cálculo, 0.04 Hz (25s) para a frequência menor e um fator de incremento de 1.1 entre frequências sucessivas (Tabela 2).

O primeiro teste consistiu apenas em um incremento do número de frequências de cálculo para 51, ou seja, manteve-se o fator de incremento de 1.1 tendo apenas alterado a frequência mínima de início. Num segundo teste manteve-se o número de frequências do primeiro teste e diminuiu-se o fator de incremento entre frequências sucessivas para 1.05 (Tabela 2).

Com estes dois testes pretendeu-se avaliar se o intervalo de frequências considerado e se a sua discretização é a mais correta para o caso em estudo.

Os resultados obtidos, tendo como foco a altura significativa, mostram ligeiras diferenças mas, de forma genérica, pode-se concluir que o aumento do número de frequências utilizadas não introduz alterações significativas nos resultados.

Tabela 2 - Resumo da configuração do cálculo das frequências predefinidas e de teste.

Configuração	Número de Frequências	Intervalo de Frequências (Hz)	Intervalo em Segundos (s)	Fator Incremental
Predefinida	25	0.0400-0.3940	25-2.53	1.1
Teste 1	51	0.0357-4.1920	28-0.23	1.1
Teste 2	51	0.0400-0.4587	25-2.18	1.05

4.1.2 Direção

À semelhança do que foi feito com as frequências de cálculo, também foi efetuado um teste de sensibilidade ao número de direções de cálculo. A configuração por defeito considera 24 direções ($d\theta = 15^\circ$). Foi realizado apenas um teste em que se consideraram 36 direções ($d\theta = 10^\circ$, Tabela 3). Os resultados obtidos mostram novamente que não existem alterações significativas nos resultados.

Tabela 3 - Resumo da configuração do cálculo das direções, predefinida e teste.

Configuração	Número de Direções	Intervalo de Direções (°)	Intervalo entre Direções (°)
Predefinida	24	0-360	15
Teste 1	36	0-360	10

4.1.3 Forçamento atmosférico horário

Em alternativa ao forçamento de vento denominado GFS que tem uma discretização temporal de 3 horas foram testadas reanálises horárias do NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR). Ambas as soluções têm uma resolução espacial de 0.5°. Para a análise de sensibilidade à frequência temporal do forçamento atmosférico adotou-se a discretização assumida por defeito pelo WW3 (25 frequências e 24 direções).

Os resultados mostram que também neste caso o aumento da frequência temporal do forçamento atmosférico não introduz nenhuma alteração significativa. Os modelos WW3 e SWAN conseguem reproduzir com uma precisão razoável os registos da boia situada ao largo (Boia PNBOIA 69150, Figura 1) para as diferentes discretizações e domínios (Figura 5, Figura 6, Figura 7). De salientar a que em algumas situações menos energéticas existe uma tendência para sobrestimar os valores da altura significativa. Outra situação relevante foi ter-se verificado a existência de um desvio sistemático com um intervalo de 30° a 60° na direção da ondulação. Esta situação poderá estar relacionada com um erro no aparelho de medição ou com o forçamento utilizado. Nas comparações de vento apresentadas na secção 4.1.4 constata-se a existência de um desvio sistemático na direção do vento com valores semelhantes aos da ondulação Figura 11.

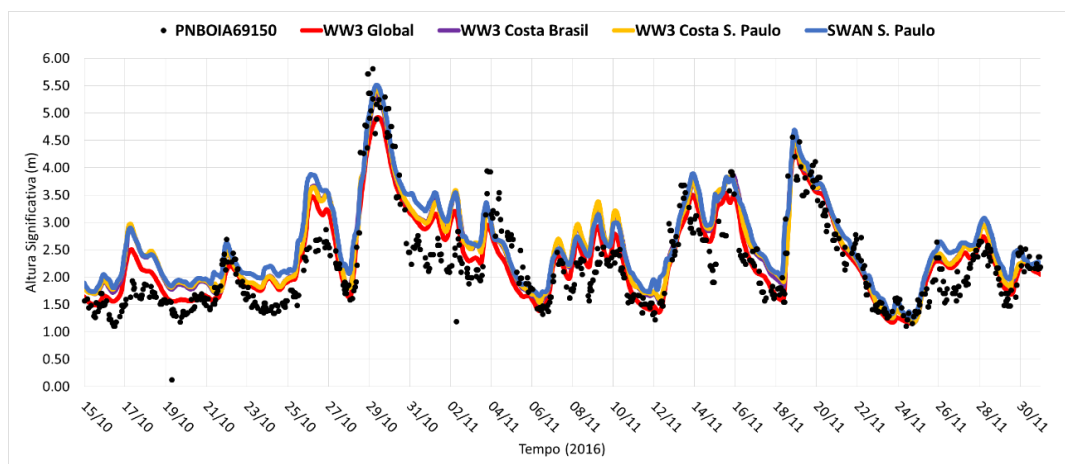


Figura 5 - Comparação de medidas com resultados de modelação de altura significativa da ondulação (teste vento horário) para a localização da boia PNBOIA.

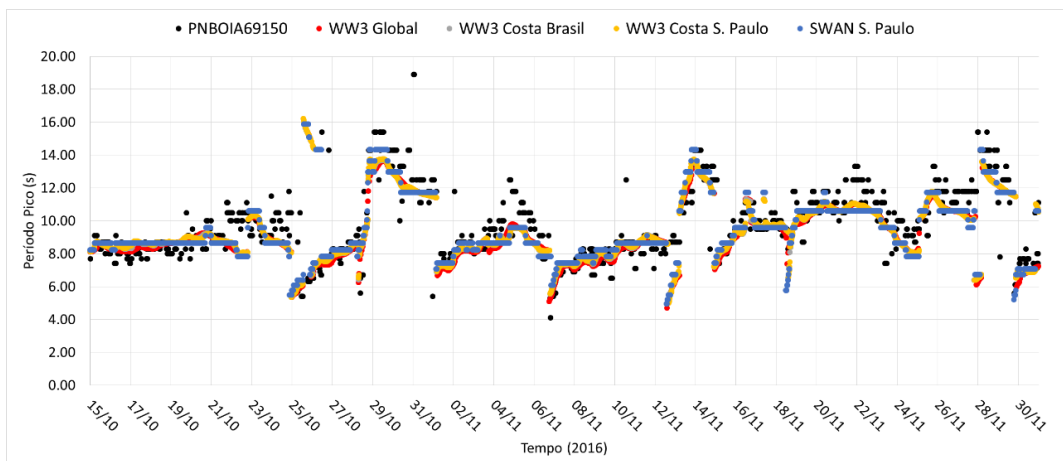


Figura 6 - Comparação de medidas com resultados de modelação de período de pico da ondulação (teste vento horário) para a localização da boia PNBOIA.

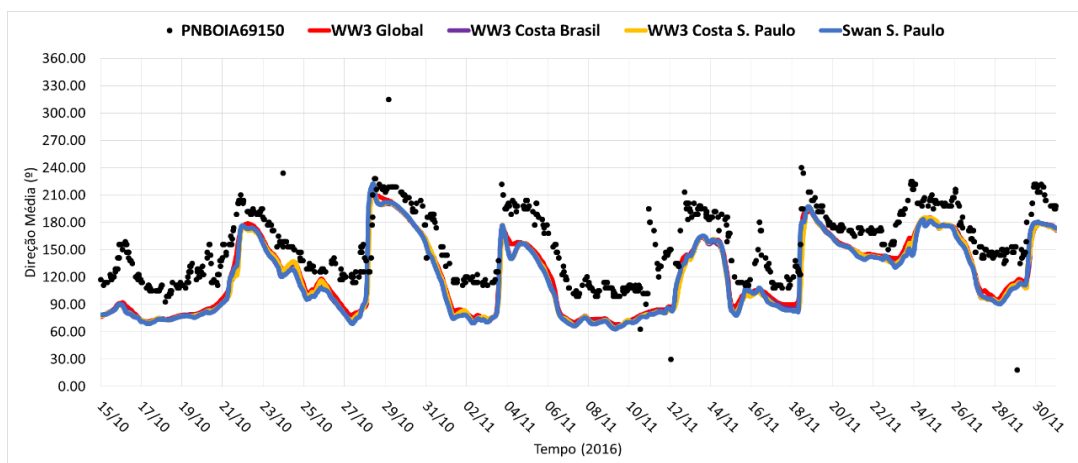


Figura 7 - Comparação de medidas com resultados de modelação de direção média da ondulação (teste vento horário) para a localização da boia PNBOIA 69150.

4.1.4 Validação da previsão ao largo

Para a fase de validação ao largo foram considerados dois períodos: 01/12/2016 a 01/01/2017 e 01/02/2017 a 01/04/2017. A comparação dos resultados é feita com os dados das boias PNBOIA 69150 e da Rede Ondas (Figura 1) para os períodos referidos. De salientar que a boia da Rede Ondas é relativamente recente e tem apenas observações válidas de Dezembro de 2016 até Março de 2017. Tendo em conta a ausência de informação para o primeiro período de validação e o fato de os resultados serem qualitativamente iguais nos dois períodos optou-se por apenas mostrar os resultados do segundo período de validação.

4.1.4.1 Segundo período de validação (01/03/2017 a 01/04/2017)

Para este período de validação ocorrem dois eventos com características que se enquadram nas situações em que o modelo subestima a previsão, ou seja, eventos que se caracterizam por uma intensificação abrupta do estado do mar com a ondulação a atingir 3.5 m de altura significativa e novamente acompanhado com uma rotação extrema entre 90° e 220° (Figura 8). Para a estação de Santos da Rede Ondas os registos mostram o mesmo tipo de comportamento da estação offshore mas com uma redução de cerca de 1.0m para o evento de pico (Figura 9).

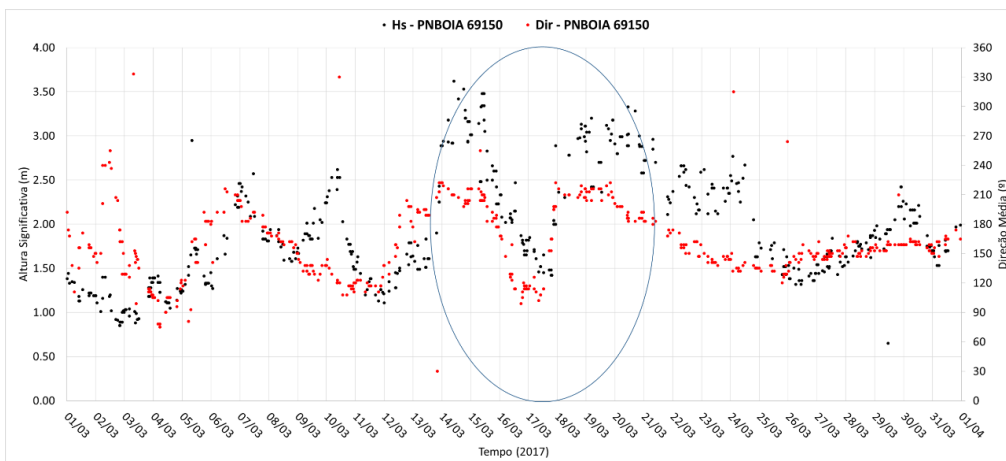


Figura 8 - Medições estação PNBOIA 69150 de altura significativa e direção.

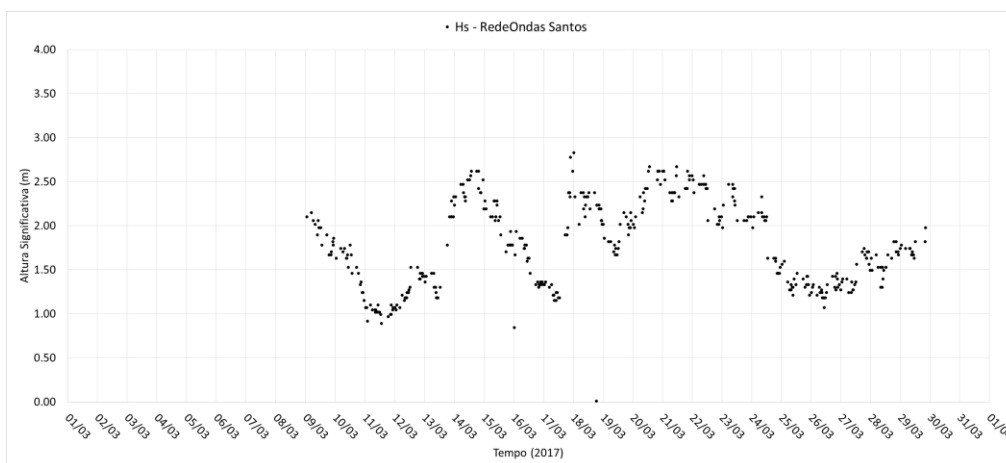


Figura 9 - Medições da estação de Santos da Rede Ondas de altura significativa.

A comparação do GFS com os registos da boia mostra que para a intensidade do vento o modelo consegue acompanhar as observações (Figura 10), no entanto para a direção do vento verifica-se que o modelo acompanha o perfil observado mas com um desfasamento em relação às medidas que varia entre 30° a 60° (Figura 11).

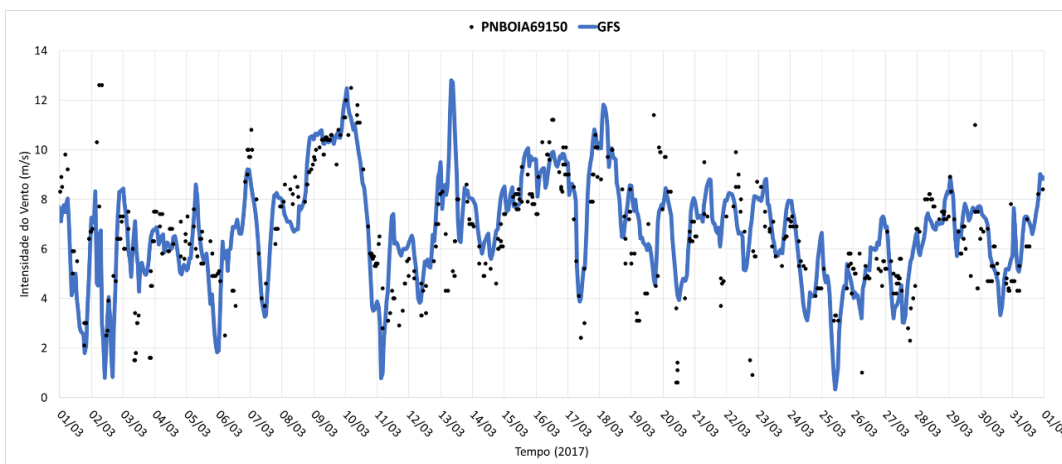


Figura 10 - Intensidade do vento (PNBOIA 69150 vs GFS).

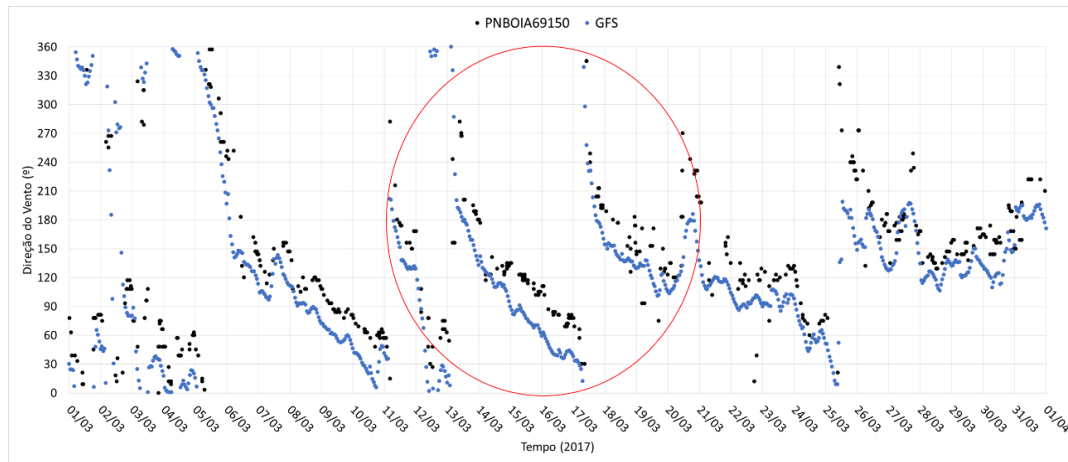


Figura 11 - Direção do vento (PNBOIA 69150 vs GFS).

Os resultados do modelo de ondas mostram que, de forma geral, existe uma boa concordância com os registros em ambas as boias (Figura 12, Figura 13). No caso particular da boia de Santos da Rede Ondas o comportamento do WW3 e SWAN acompanha as duas situações extremas com uma grande precisão. Quando se compara para o mesmo período os resultados de altura significativa medidos no ADCP, localizado no interior da Baía de Santos, com o modelo SWAN (domínio com uma resolução espacial de ~50 m) verifica-se que o modelo tem uma tendência para subestimar os eventos mais intensos (Figura 14).

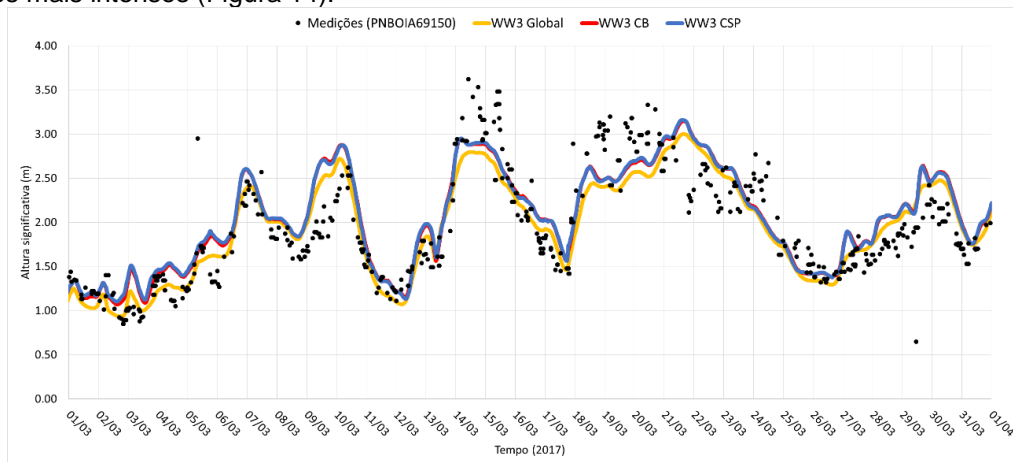


Figura 12 - Comparação de medições de altura significativa para o local da boia PNBOIA 69150 com modelos de ondas.

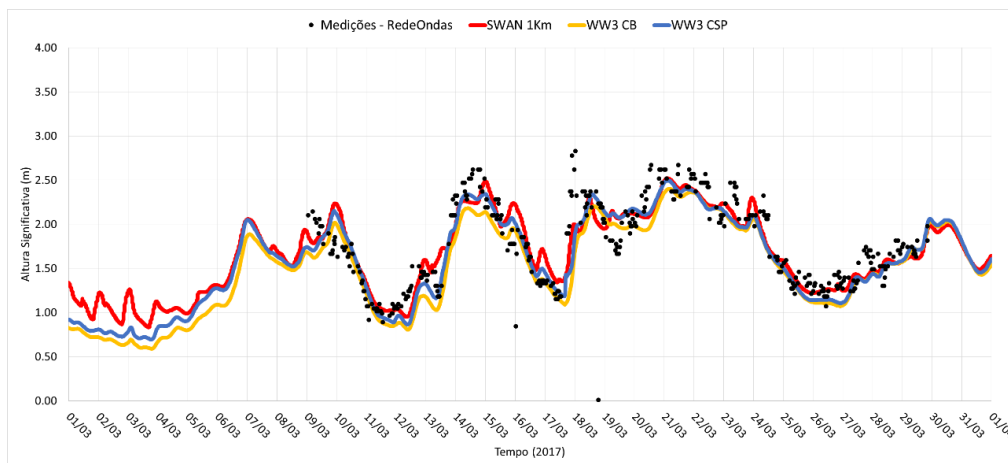


Figura 13 - Comparação de medições de altura significativa para o local da boia de Santos da Rede Ondas com modelos de ondas.

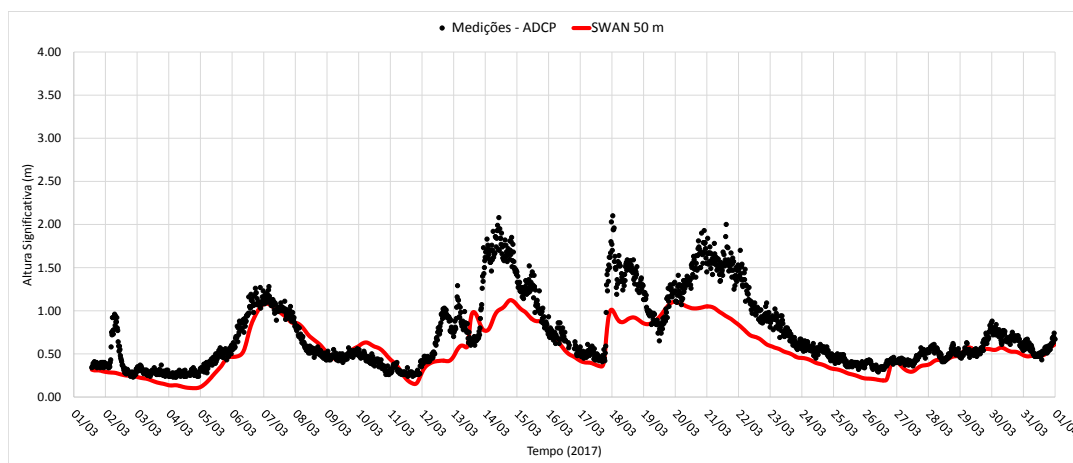


Figura 14 - Comparação de medições de altura significativa para o local do ADCP localizado no interior da Baía de Santos com modelo SWAN (~50 m).

4.1.5 Análise da agitação na baía de Santos (15/10/2016 a 20/11/2016)

Considerando os resultados obtidos ao largo e de modo a perceber como é modificada a ondulação entre o largo (boia PNBOIA 69150) e o interior da Baía de Santos (ADCP) foram extraídas séries temporais de altura significativa nas batimétricas dos 150m, 100m, 50m, 25m, 15m e 10m (Figura 1). Os resultados do modelo mostram que alterações relevantes, aos valores registados de altura significativa pela boia PNBOIA 69150, apenas se começam a fazer sentir a partir da batimétrica dos 50 m (Figura 15).

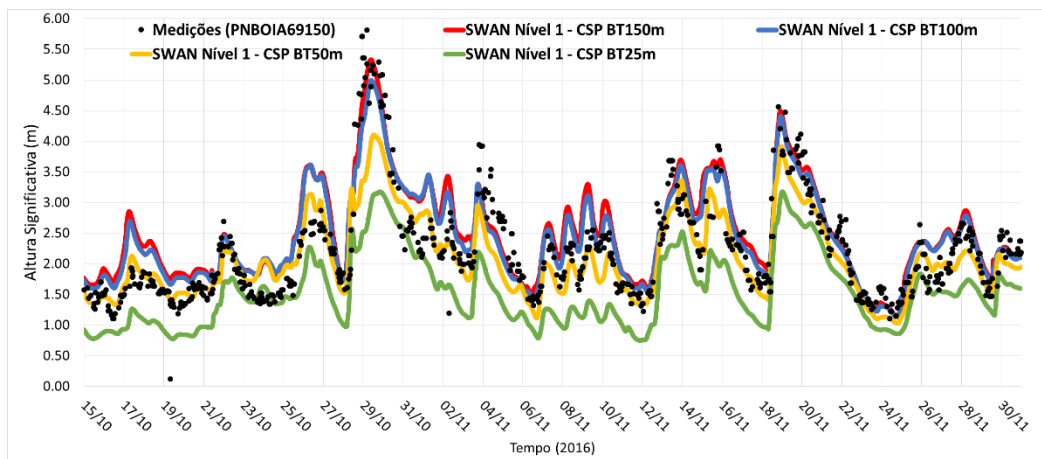


Figura 15. Comparação dos resultados da altura significativa medidos pela boia PNBOIA 69150 e obtidos pelo modelo SWAN (domínio Costa de São Paulo).

Analisando as Figura 16, Figura 17 e Figura 18 é possível observar que a modificação da ondulação com a profundidade acompanha os valores de altura significativa registrados no ADCP e na boia ondógrafo. Na batimétrica dos 10m (Figura 18) é onde se obtém um melhor ajuste aos dados do ADCP, ainda assim, e para os casos mais extremos, o modelo não consegue atingir os valores observados.

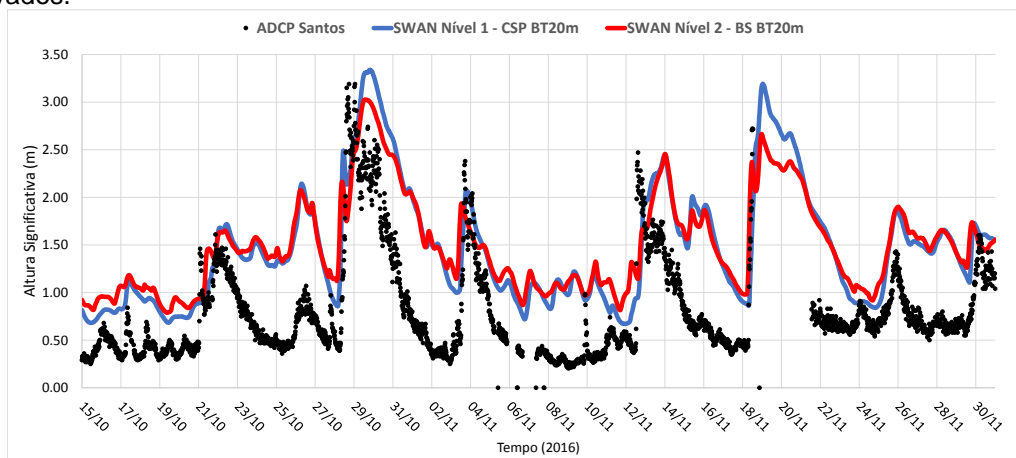


Figura 16. Comparação dos resultados da altura significativa medidos pelo ADCP e obtidos pelo modelo SWAN (dois domínios Costa de São Paulo e Baía de Santos) na batimétrica dos 20m.

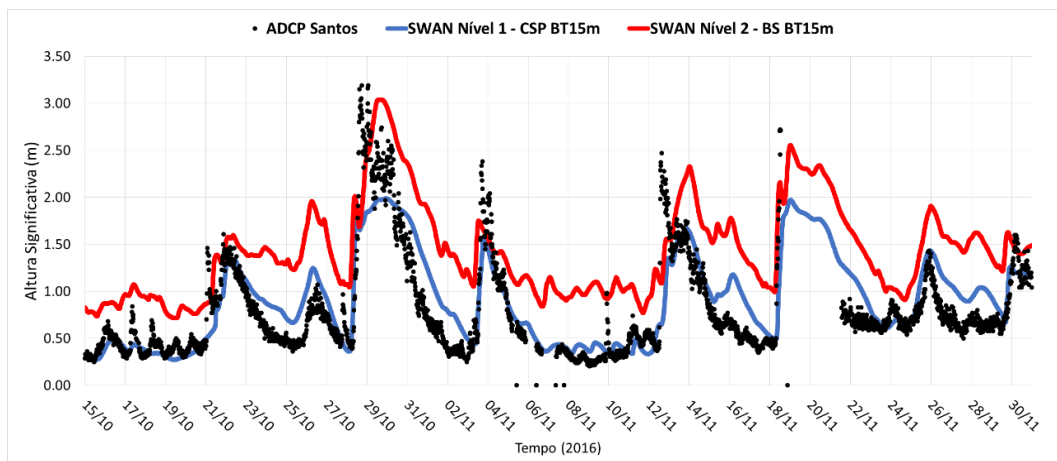


Figura 17. Comparação dos resultados da altura significativa medidos pelo ADCP e obtidos pelo modelo SWAN (dois domínios Costa de São Paulo e Baía de Santos) na batimétrica dos 15m.

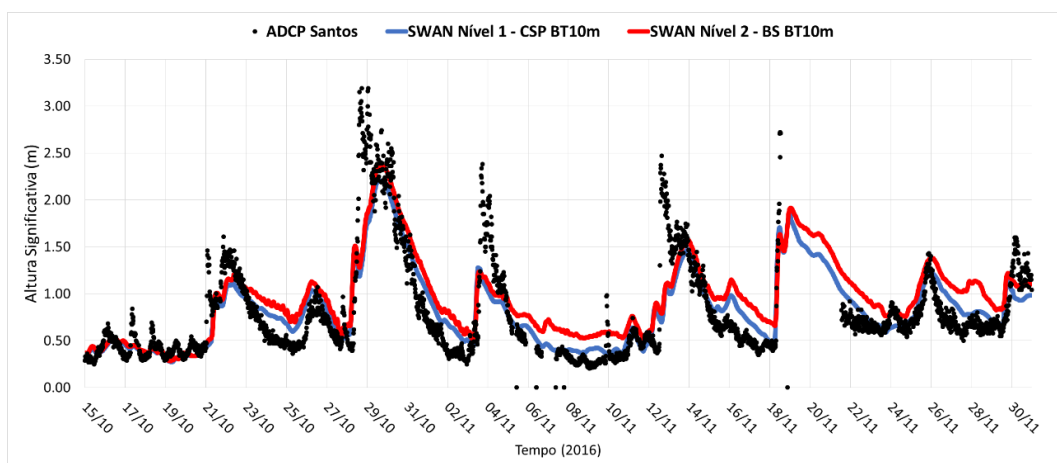


Figura 18. Comparação dos resultados da altura significativa medidos pelo ADCP e obtidos pelo modelo SWAN (dois domínios Costa de São Paulo e Baía de Santos) na batimétrica dos 10m.

Analisando a distribuição espacial das alturas significativas do evento de 28 a 30 de Outubro de 2016 é possível constatar que a ondulação na zona do ADCP é fortemente influenciada pelo efeito de sombra da Ponta Grossa da Barra (Figura 19). Este efeito de sombra tende a ser persistente ao longo de todo o evento. Dadas as limitações do modelo SWAN em simular o fenómeno da difração, a dificuldade do modelo em simular os valores observados no ADCP poderá estar de alguma forma relacionada com este facto.

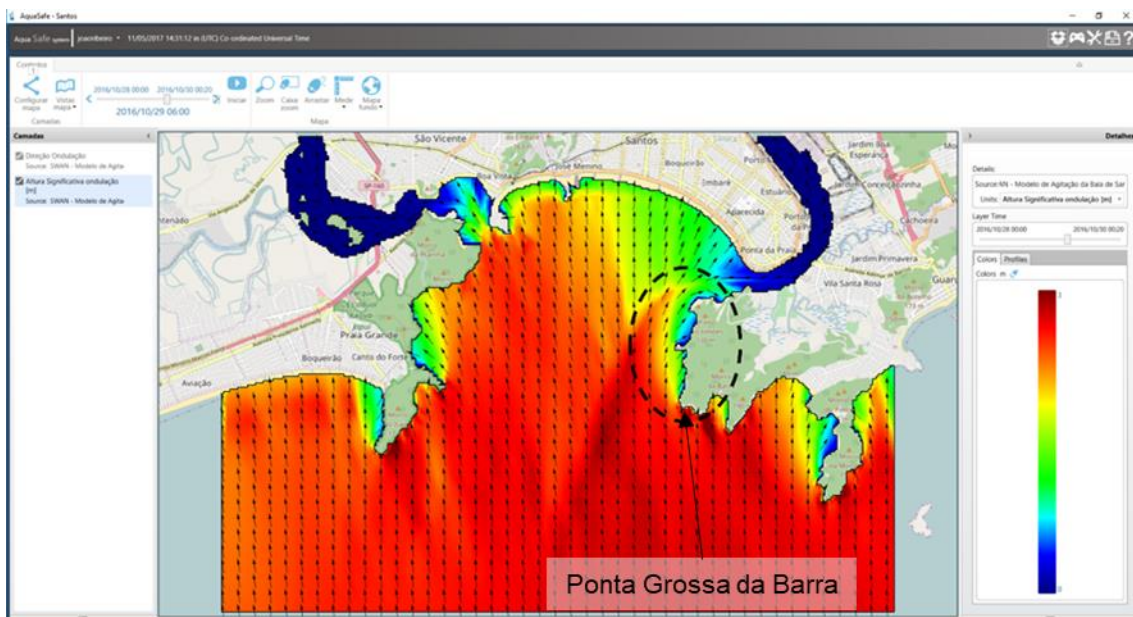


Figura 19. Evento extremo de 28 a 30 de Outubro de 2016, instante 28/10/2016 às 06h.

Considerando os pontos BS, P01 e PB2 (já fora da influência deste efeito de sombra, Figura 1 e Figura 20), verifica-se que existe uma melhor concordância com os dados medidos do que com os resultados obtidos para o ponto onde está localizado o ADCP (Figura 21). No entanto, mesmo nestes pontos e nas situações extremas o modelo ainda subestima a altura significativa. De notar que são pontos localizados numa zona mais central da Baía e com profundidades ligeiramente superiores comparativamente à localização do ADCP.

Pode-se concluir que o modelo SWAN para situações de agitação menos intensa reproduz de forma precisa as alturas significativas medidas pelo ADCP (Figura 21). No entanto, para eventos de agitação mais intensa, os resultados obtidos para o ponto do ADCP subestimam os valores medidos e estes estão mais de acordo com os resultados do modelo SWAN obtidos nos pontos mais próximos do centro da Baía (Figura 20 e Figura 21)

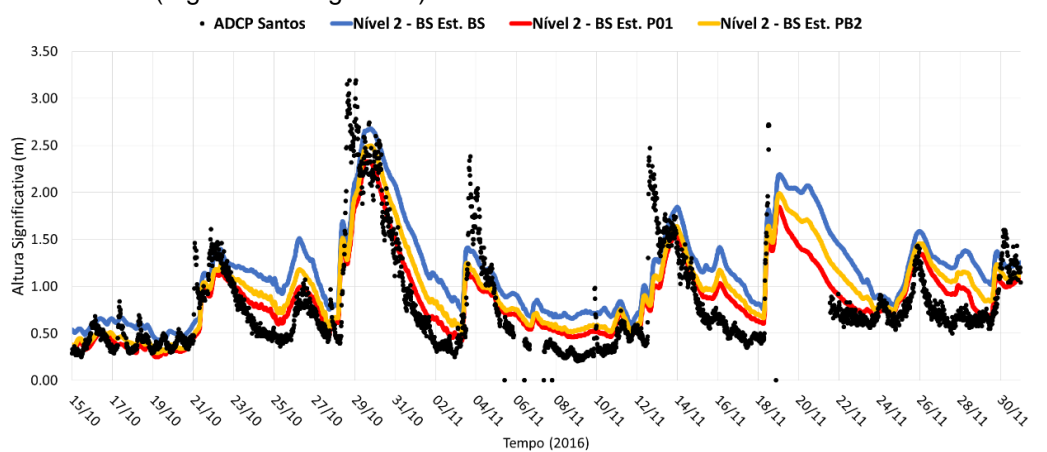


Figura 20. Comparação dos resultados da altura significativa medidos pelo ADCP e obtidos pelo modelo SWAN (domínio da Baía de Santos) para os pontos BS, P01 e PB2 (ver Figura 1).

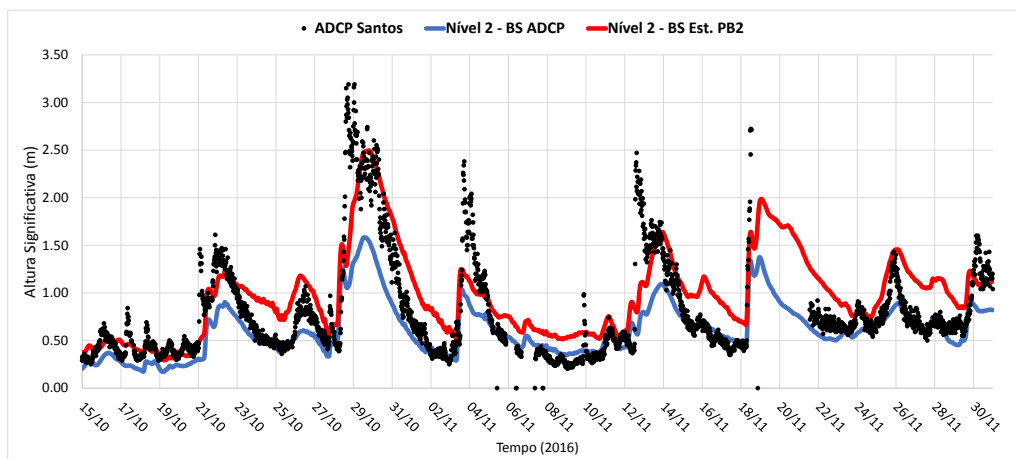


Figura 21 - Comparação dos resultados da altura significativa medidos pelo ADCP e obtidos pelo modelo SWAN (domínio da Baía de Santos) para os pontos PB2 e para a localização do ADCP (ver Figura 1).

Os resultados obtidos mostram que no interior da Baía de Santos, em zonas que sofrem processos intensos de refração/difração e de baixa profundidade, o modelo SWAN tem dificuldade em gerar uma solução realista nas situações de alturas significativas extremas (Figura 19, Figura 20, Figura 21).

4.1.6 Simulações MOHID Boussinesq, MOHID Non Hydrostatic e SWASH

Para perceber melhor os padrões de propagação das ondas no interior da Baía de Santos foram efetuadas simulações com modelos que permitem uma descrição mais detalhada dos processos de propagação das ondas e que permitem simular de forma precisa os processos de difração e reflexão. Para este efeito foram utilizados os modelos MOHID Boussinesq (Lopes et al., 2005), SWASH (Zijlema et al., 2011) e MOHID non-hydrostatic (Silva et al., 2016 - utiliza uma abordagem numérica semelhante ao do modelo SWASH). Para facilitar a compreensão dos fenómenos as simulações foram efetuadas com ondas monocromáticas. Para estes testes foi considerada uma onda de 1m, 10s e uma direção de 180° (Sul). Uma discretização espacial de 10 m foi considerada nos três modelos.

Os resultados obtidos pelos vários modelos são coerentes entre si, sendo possível observar que as zonas onde ocorrem fenómenos de concentração e dispersão da ondulação são praticamente idênticas. O canal de navegação é um importante canalizador da ondulação (Figura 22, Figura 23, Figura 24), algo que já se tinha verificado nos resultados do SWAN.

As diferenças registadas entre modelos têm origem na parametrização dos termos turbulentos (parametrização sub-grid) que neste tipo de modelos exige um trabalho sistemático de calibração. Neste caso optou-se por correr com as opções de defeito de cada modelo.

Na zona de sombra da Ilha da Palmas (onde está localizado o ADCP), é possível ver a rotação das ondas em todos os modelos. A este tipo de rotação associado a obstáculos está normalmente associado um processo de difração intenso. Adicionalmente os três modelos mostram que se trata de uma zona onde ocorrem processos de reflexão. No manual do SWAN é referido que o modelo tem limitações em simular a difração, em especial em zonas em que existam condições para haver reflexões.

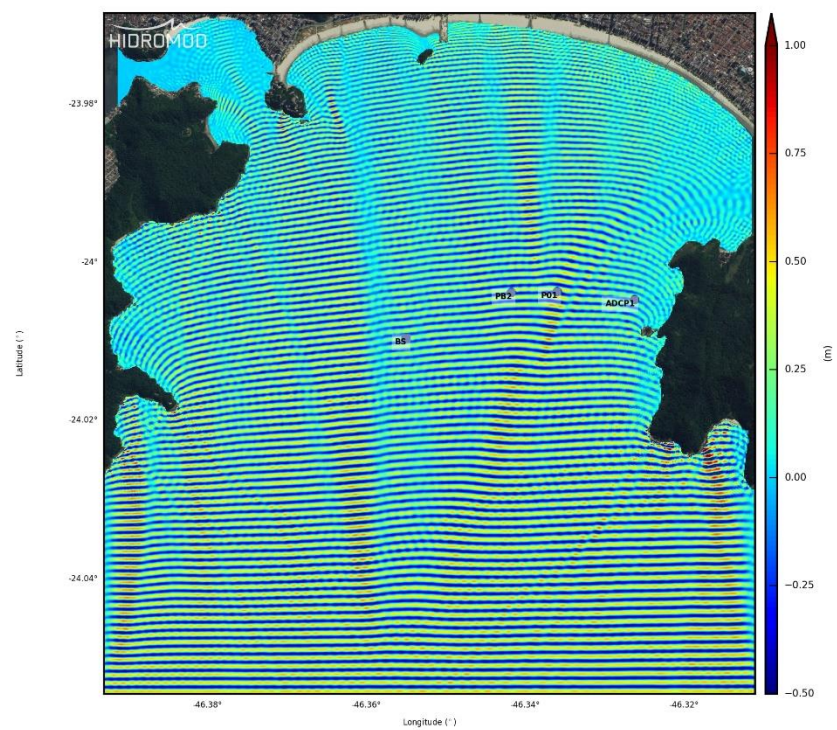


Figura 22. Resultados do modelo de MOHID Boussinesq (nível do mar, cristas-verde\amarelo\vermelho e cavas-azul).

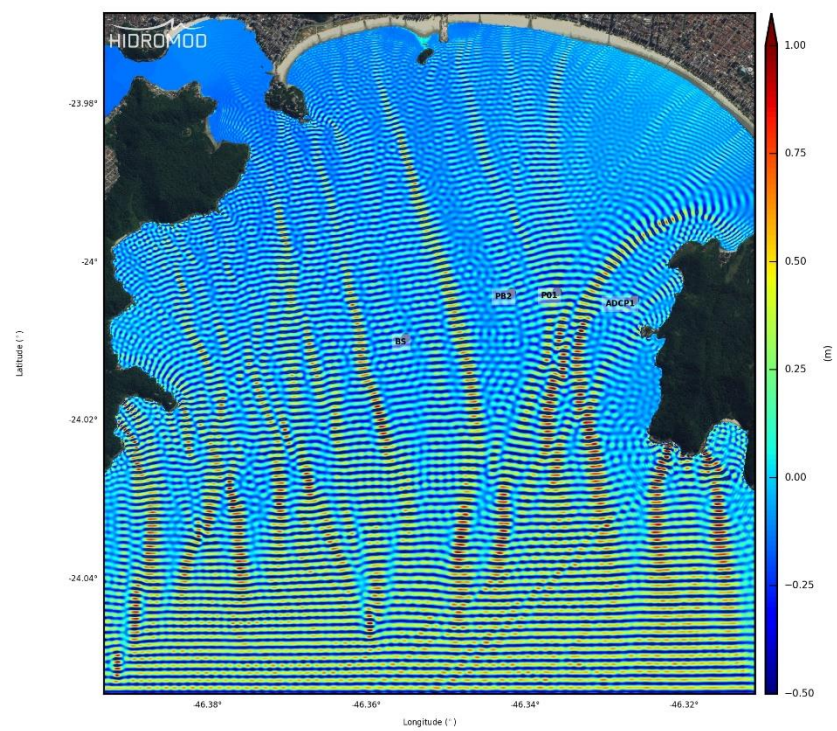


Figura 23. Resultados MOHID não-hidrostatico (nível do mar, cristas-verde\amarelo\vermelho e cavas-azul).

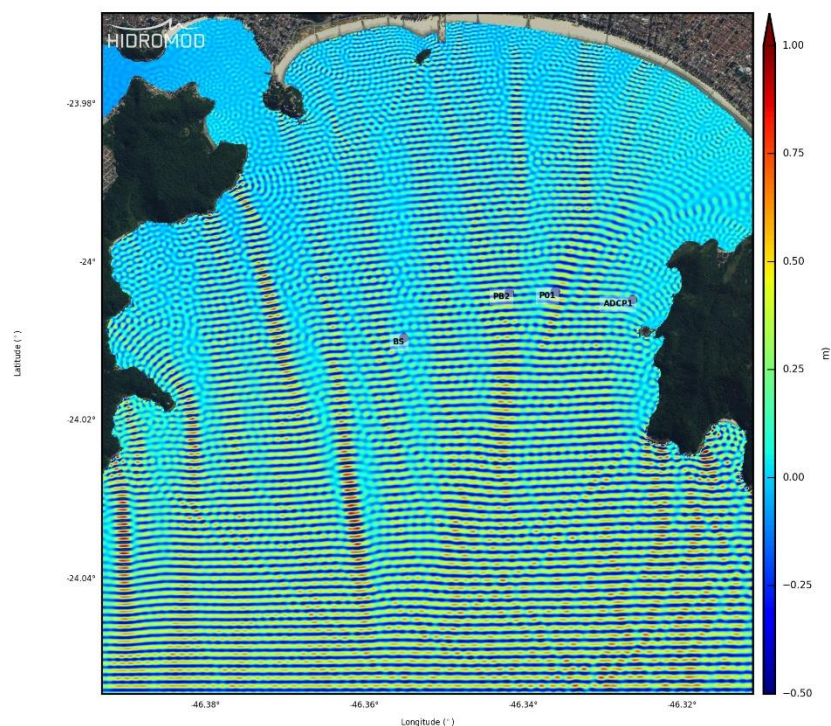


Figura 24. Resultados do modelo SWASH (nível do mar, cristas- verde\amarelo\vermelho e cavas-azul).

5 Discussão de Resultados e conclusões

Os resultados obtidos mostram que na análise de sensibilidade realizada ao modelo o número de frequências e direções assumida por defeito é a correta para este caso de estudo e que os resultados ao largo não apresentaram diferenças significativas quando se aumenta a discretização temporal do forçamento do vento. Tomando como referência o ponto de localização da boia ondógrafo (PNBOIA 69150), o modelo WW3 consegue prever os eventos extremos no período analisado, verificando-se também uma tendência para sobrestimar a agitação em situações menos energéticas.

Os modelos SWAN (dx ~1km) e WW3 apresentam sensivelmente o mesmo desempenho na localização da boia PNBOIA 69150. De salientar que em situações menos energéticas o SWAN é uma melhor aproximação às observações. Em qualquer dos casos pode afirmar-se que ambos os modelos estão a conseguir prever corretamente o clima de ondas ao largo da Baía de Santos.

O desvio sistemático observado na direção da ondulação e do vento pode estar relacionado com algum erro no referencial do equipamento de medição. Esta situação necessita de mais investigação.

No modelo SWAN Baía de Santos é possível observar dois efeitos significativos: a concentração da agitação no canal de navegação e o efeito de sombra causado pela Ponta Grossa da Barra. As diferenças verificadas entre as medidas do ADCP e o modelo de previsão de ondas poderão estar relacionadas com os processos de forte difração. O SWAN, apesar de incluir parametrização de modo a ter em conta este processo físico, é algo limitado e como tal pode estar a subestimar o mesmo. De modo a obter uma segunda validação seria útil a instalação de um equipamento de medição de ondas o mais perto possível do canal, entre os pontos PB2 e P01 que são os que melhor representam as condições observadas no ADCP em situações de agitação intensa, e voltar a avaliar o modelo com base na informação recolhida.

Os resultados qualitativos obtidos com os modelos SWASH, MOHID non-hydrostatic e Boussinesq, confirmam que o canal de navegação é um ponto de concentração da ondulação (efeito também obtido com o SWAN) e ilustram o efeito de rotação na zona de sombra da Ilha da Palmas.

6 Referências

Booij, N., Ris, R. C. and Holthuijsen, L. H., (1999). A third generation wave model for coastal regions. Part 1: Model description and validation, J. Geophys. Res. 104, C4, pp. 7649-7666.

Guimarães, P. V., Farina, L., and Toldo Jr., E. E.: Analysis of extreme wave events on the southern coast of Brazil, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 3195-3205, doi:10.5194/nhess-14-3195-2014, 2014.

Lopes, M., Fortes, J., Silva, A.J.R., Mil-Homens, J., Zózimo, C., Neves, G., Silva, G. & Pires-Silva, A., 2005, Numerical wave model performance evaluated with physical model data, Waves 2005, The 5th International Symposium on Ocean Waves Measurement and Analysis, Madrid, Spain, 2005.

Silva, J., C.; Silva, A., A., P.; Leitão, P., C.; and Silva, A., J. (2016). Modelling tsunamis with a non-hydrostatic version of the MOHID model. In 4ª Jornadas de Engenharia Hidrográfica, pages 1-4, 2016. Instituto Hidrográfico Português.

Tolman H. 1991. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents. Journal of Physical Oceanography; 21(6):782e97.

Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P., 2011. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. Coast. Engng., 58, 992-1012. <http://swash.sourceforge.net/>.