



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE UMA
NOVA VERSÃO OPERACIONAL DO MODELO DE ONDAS
WAVEWATCH III®**

Rosio Camayo e André Lanfer

Versão do modelo:
Versão do documento: 1.1
Data de aprovação pelo Comitê/Grupo de Avaliação:

INPE
Cachoeira Paulista
2021

RESUMO

Este documento visa descrever e estabelecer um protocolo de avaliação da qualidade das previsões de ondas para costa brasileira geradas por uma nova versão do Sistema de Previsão de Ondas baseado no modelo WAVEWATCH III®, que será implementada no ambiente operacional no CGCT (Coordenação-Geral de Ciências da Terra), substituindo a atual versão disponibilizada ao público na página.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1	Introdução.....1
2	Descrição do Sistema de Previsão de Ondas.....2
2.1	Modelo de ondas WAVEWATCH III ®.....4
2.2	Configuração do novo Sistema de Previsão de Ondas.....5
3	Validação.....8
3.1	Controle de Qualidade dos dados das boias e de satélite.....9
3.1.1	Verificação do intervalo dos dados (“Range Check”).....9
3.1.2	Verificação da presença de “spikes” (“Continuity Check”).....10
3.1.3	Verificação das exceções pela passagem de Ciclones Extratropicais / Sistemas Frontais.....10
3.2	Pareamento dos dados das bóias/satélites e do modelo.....11
3.3	Métricas do erro padrão.....11
3.4	Erro em função do horizonte de previsão.....15
3.5	Erro em função da severidade.....15
3.6	Calibração do modelo.....17
4	Conclusões e Recomendações.....18
5	Referências Bibliográficas.....19

1 INTRODUÇÃO

A Coordenação Geral de Ciências da Terra (CGCT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) produz operacionalmente previsões de agitação marítima geradas por ondas de gravidade forçadas pelo vento desde o ano 2000 (Innocentini, 2001). Inicialmente foi implementado um Sistema de Previsão de Ondas (SPO) baseado no modelo de ondas WAVEWATCH III® versão 1.18 para águas profundas e o modelo SWAN (Simulating Wave Nearshore) para águas rasas. Os modelos eram integrados até 72 horas e forçados com os ventos à 10 metros sobre a superfície do mar fornecidos pelo modelo atmosférico AVN no NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Posteriormente, a versão 2.22 do modelo WAVEWATCH III® foi implementado para um domínio global com resolução espacial de 1 grau, usando como forçante atmosférica as previsões do modelo GFS (Global Forecast System). No ano 2010, o sistema foi atualizado com a versão 3.14 do modelo, usando o pacote de física ST2, para um novo conjunto de grades aninhadas, que incluía um domínio global com resolução espacial de 1 grau, 4 domínios regionais cobrindo a costa das regiões Sul, Sudeste, Norte-Nordeste do Brasil com resolução espacial de 25 km e para costa dos estados do Rio-São Paulo com resolução de 5 km. A integração do modelo tinha incrementado até 120 horas. O sistema ainda continuou forçado com os ventos do modelo GFS com resolução espacial de 1 grau. No período de 2015-2016, um Sistema de Modelagem Meteo-Oceanográfica foi projetado e implementado operacionalmente com alta resolução espacial e temporal para a região costeira do Sudeste do Brasil e a Baía de Guanabara usando o modelo atmosférico WRF (Weather and Research Forecasting Model), o modelo hidrodinâmico ROMS (Regional Ocean Modeling System) e os modelo de ondas WAVEWATCH III ® (versão 4.18) e SWAN (versão 41.01). Este sistema permitiu fornecer previsões com boa qualidade das variáveis dos ventos à 10 m da superfície, ondas e correntes superficiais para a região costeira do RJ, e principalmente, para os pontos das raias localizados na Baía de Guanabara, RJ, brindando suporte para a realização das competições de vela nos Jogos Olímpicos e Para-Olímpicos RIO-2016 (Ferreira et. al., 2016) . Neste Sistema,

o WAVEWATCH III foi forçado com ventos do GFS com resolução espacial de 0.25° , com o pacote de física ST4, para o domínio global com resolução de 25 km, aninhado a outro domínio cobrindo a região Sudeste do Brasil com resolução de 5 km, e um domínio para a região do Rio de Janeiro com resolução de 1 km. No ano de 2017, um novo sistema de previsão de ondas foi proposto e implementado, com base na versão construída para os Jogos RIO-2016, para substituir a versão operacional disponibilizada na página de ondas do CPTEC, com o intuito de melhorar a qualidade das previsões de agitação marítima, a nível global e regional, e das alertas de agitação marítima emitidas para a costa do Brasil. O novo sistema foi construído com a versão 5.16 do modelo WAVEWATCH III®, considerado na época, no estado da arte da modelagem numérica de ondas. O modelo foi compilado, calibrado e implementado no modo operacional com o pacote de física ST4 (Ardhuin et. Al. 2010) para o domínio global com resolução espacial de 25 km, forçado com os ventos do modelo GFS. A validação do sistema destacou uma melhora na qualidade das previsões da altura significativa das ondas quando comparado com as versões anteriores do modelo, implementado operacionalmente no CGCT (versões 3.14 e 4.18 do WAVEWATCH III®), e com os dados das bóias do Rio Grande, Santos e Fortaleza do Programa PNBOIA, associado, muito provavelmente, com a melhor representação da forçante de vento/gelo e com a troca do pacote de física de ST2 para ST4, para o período de verificação entre janeiro e maio de 2017.

2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE PREVISÃO DE ONDAS

2.1 Modelo de ondas WAVEWATCH III®

O modelo WAVEWATCH III (Tolman 1997, 2002a, 2009, 2014a; WW3DG, 2016; WW3DG, 2019) é um modelo espectral de terceira geração que permite descrever a geração e a propagação das ondas, desenvolvido no “Marine Modeling and Analysis Branch (MMAB)” do “National Centers for Environmental Modeling Center (NCEP)” no espírito do modelo de ondas WAM (WAMDIG 1988, Komen et. al. 1994). Este modelo é baseado no WAVEWATCH I e WAVEWATCH II desenvolvidos na “Delft University of Technology” e no “NASA Goddard Space Flight Center”, respectivamente. O WAVEWATCH III se diferencia dos seus predecessores em quase todos os aspectos das equações governantes, estrutura do programa, aproximações numéricas e físicas (Tolman, 2014a). Este modelo utiliza otimização vetorial, junto com otimização paralela OpenMP o MPI e, por tanto, pode ser rodado de forma eficiente na maioria das arquiteturas de computadores modernos (Tolman, 2014b).

O modelo WAVEWATCH III calcula a evolução do espectro direção-número de onda de uma localização do oceano para outra, resolvendo a equação do balanço da densidade espectral. Esta equação requer que as propriedades do meio (profundidade da água e correntes), assim como o próprio campo de onda variem em escalas espaciais e temporais muito maiores que as variações de escala de uma única onda. Para águas profundas, os termos fontes e sumidouros da equação de balanço incluem os processos físicos associados com a interação onda-vento, as interações não lineares onda-onda e a dissipação da energia pela arrebentação tipo “whitecapping”. Para águas rasas, processos adicionais também são considerados, principalmente interações onda-fundo. Para águas extremamente rasas, as interações onda-onda em tripletos e quebra induzida pelo fundo também são importantes. Também estão disponíveis os termos fonte para dispersão de ondas pelas características do fundo, interações onda-gelo, reflexão de objetos fora da costa ou que flutuam

tais como icebergs, e um espaço de uso geral para termos adicionais definidos pelo usuário.

A versão 4.18 do modelo inclui importantes modificações, entre elas, a possibilidade do uso de grades curvilíneas de Rogers & Campbel (2009) e grades não estruturadas de Roland (2009), do pacote de termo fonte de Arduin et. al (2010) (ST4) sobre as parametrizações da entrada do vento e a dissipação, o termo fonte da fricção do fundo SHOWEX, a saída do pós-processamento em NetCDF, esquemas UNO de segunda ordem, interações não lineares em tripletos, entre outros.

Na versão 5.16 do modelo WAVEWATCH III destaca-se o aprimoramento das parametrizações para o efeito do gelo do mar nas ondas, introdução da aproximação híbrida MPI-OpenMP, implementação da funcionalidade da grade tripolar para o esquema de primeira ordem e cálculos de gradiente, atualização da física ST6, opções de uso dos acopladores NCEP e OASIS para o acoplamento com modelos oceânicos e atmosféricos, atualizações no uso da grade tipo SMC (Spherical Multiple-Cell) , inclusão dos termos fontes de dissipação por arrasto e espalhamento pelo gelo do mar, inclusão do TSA (Two-Scale Approximation) como uma opção do termo fonte de interação onda-onda não linear, entre outras atualizações e/ou funcionalidades incluídas.

O modelo é de domínio público e está disponível no endereço: <https://github.com/NOAA-EMC/WW3/releases>. A documentação do modelo sobre as equações governantes, as aproximações numéricas, instalação do modelo, a estrutura do código do modelo, o armazenamento interno dos dados e a otimização, entre outras informações, podem ser encontradas no manual mais recente do modelo, versão 6.07, (WW3DG, 2019).

2.2 Configuração do novo Sistema de Previsão de Ondas

Nesta seção serão descritas as características da compilação do código do modelo, implementação numérica e custo/desempenho computacional do novo sistema proposto.

A modo de exemplo, descreve-se aqui, a configuração da atual versão operacional do Sistema de Previsão de Ondas do CGCT que encontra-se

disponível na página de ondas. A versão 5.16 do modelo WAVEWATCH III® foi implementada para o domínio global para um domínio global entre 78.5 graus Norte e -78.5 graus Sul com uma resolução espacial de 25x25 km na direção x e y. As grades utilizadas foram do tipo latitude-longitude com espaçamento regular.

O modelo WAVEWATCH foi compilado usando o pacote da física ST4 de Arduin et. al. (2010), para a parametrização da entrada dos ventos e dissipação das ondas. Na tabela 1 mostra-se a lista completa dos “switchs” utilizados na compilação do modelo.

O modelo WAVEWATCH foi forçado com as previsões dos ventos à 10 metros da superfície do mar e a concentração de gelo do modelo atmosférico operacional GFS (NCEP) com resolução de 25 km e intervalo de tempo de 3 horas. As correntes oceânicas ainda não foram incluídas nas forçantes. As condições iniciais são obtidas pela previsão de 24 horas da rodada do dia anterior, sem nenhum processo de assimilação de dados. A batimetria utilizada é de ETOPO-1 (Amante & Eakins, 2009). O espectro da energia de onda é discretizada usando 25 frequências e 24 direções, com a frequência inicial de 0.04177 e fator de incremento de 1.1. Na tabela 2 resume-se as características da implementação do sistema.

A saída do modelo inclui arquivos com dados do espectro para determinados pontos espaciais e arquivos com vários parâmetros calculados a partir do espectro e do particionamento espectral (wind-sea e swell) para todos os pontos da grade.

SWITCH	Descrição	Referências:
F90	Data e tempo no estilo do FORTRAN-90	
NOGRB	Pacote GRIB não incluído.	
NOPA	Compilação como um programa autônomo	
LRB4	Palavras de 4 bytes. Usado para determinar a longitude do registro em arquivos de acesso direto.	
DIST	Uso da memória distribuída. Definido em conjunto com switch MPI.	
MPI	Uso do protocolo Message Passing Interface (MPI)	
PR3	Esquemas de propagação de alta ordem com a técnica de média de Tolman (2002b)	Tolman (2002b)
UQ	Esquema de propagação de alta ordem (UQ)	
FLX0	Rotina do cálculo do fluxo não usado. Cálculo do fluxo incluída nos termos fonte.	
LN1	Parametrização de Cavaleri e Malanotte-Rizzoli (com filtro) para o termo fonte da entrada linear	Cavaleri e Malanotte-Rizzoli (1981)
ST4	Parametrização de Arduin et. al. (2010) para o termos fonte da entrada do vento e a dissipação	Arduin et. al. (2010)
STAB0	Correção de estabilidade não usada para o pacote ST4	
NL1	Aproximação de interação discreta (DIA) para o termo fonte das interações não lineares	Hasselmann et. al. (1985)
BT1	Formulação JONSWAP para a fricção no fundo	Hasselaman et. al (1973)
DB1	Quebra induzida pelo fundo de Battjes-Janssen	Battjes e Janssen (1978)
MLIM	Uso do critério de Miche (1944) para limitador de água rasa	Miche (1944)
TR0	Interações não lineares de tripletos não usadas.	
BS0	Espalhamento no fundo não usado.	
IC0	Amortecimento pelo gelo do mar não usado.	
REF0	Termo para a reflexão da linha de costa e icebergs não usados.	
XX0	Termo fonte suplementar não usado.	
WNT1	Uso do método de interpolação linear do vento no tempo.	
WNX1	Uso do método de interpolação aproximadamente linear da velocidade do vento no espaço.	
CRT1	Uso do método de interpolação linear da corrente no tempo.	
CRX1	Uso do método de interpolação aproximadamente linear da velocidade da corrente no espaço.	
O0	Saída dos namelists no preprocessador da grade.	
O1	Saída dos pontos da borda no preprocessador da grade.	
O2	Saída do mapa de status do ponto de grade.	
O3	Saída adicional em “loop” sobre os campos.	
O4	Saída do espectro de energia unidimensional normalizada no programa de condições iniciais.	
O5	Idem para o espectro de energia bidimensional.	
O6	Idem para a distribuição da altura da onda (não adaptado para memória distribuída)	
O7	Visualização dos dados de entrada para campos homogêneos no shell genérico.	

Tabela 1. Switchs utilizados na compilação do modelo WAVEWATCH III®, versão 5.16.

Passos de tempo do modelo (s) : Passo de tempo global, passo de tempo para a propagação espacial, passo de tempo para a propagação intra-espectral e passo de tempo para a integração dos termos fontes	960, 240, 480 e 15
Condições Iniciais	Previsão de 24 horas da rodada do dia anterior.
Forçantes	Previsões de vento à 10 m da superfície e concentração de gelo do modelo GFS com resolução 0.25 graus com intervalo de tempo a cada 3 horas.
Horizonte de previsão	5 dias
Número de processadores	384 processadores
Tempo de Integração	4.6 minutos por dia de previsão
Intervalo de saída	Cada 3 horas para os campos espaciais e cada 1 hora para as séries temporais.

Tabela 2. Características da implementação do atual Sistema de Previsão de Ondas.

3 VALIDAÇÃO

A qualidade do novo Sistema de Previsão de Ondas proposto deverá ser avaliada comparando com observações da altura significativa das ondas, período de pico da onda e velocidade dos ventos à 10 metros da superfície do mar provenientes das bóias (Sistemas PNBOIA e SIMCOSTA), dos altímetros (JASON-2/JASON-3, SARAL-AltiKA, SENTINEL-3 e CRYOSAT-2) e dos escaterómetros orbitais derivados do sensor ASCAT, instalados a bordo dos satélites MetOp-A e MetOp-B, para um período mínimo de dois (2) anos, com a superposição de todos os conjuntos dos dados. A performance do novo sistema também deverá ser confrontada com os resultados obtidos da atual versão operacional do modelo WAVEWATCH III®, e se for possível, com as

outras versões anteriores. A verificação será feita para as previsões de no mínimo, de até 120 horas (5 dias).

3.1 Controle de Qualidade dos dados das bóias e de satélite

Os dados provenientes das bóias e dos satélites deverão ser submetidos a um processo de controle de qualidade (NDBC, 2009; QARTOD, 2019; e CHM,2019) para verificar que os dados se encontram dentro dos limites geofísicos e dos instrumentos, assim como também para eliminar valores tipo “spikes” que ainda podem ser encontrados nos dados qualificados, que posteriormente, podem comprometer o processo de validação do modelo.

Antes da realização dos testes de verificação, recomenda-se ter um conhecimento dos processos de obtenção a partir dos dados brutos medidos pelos sensores e dos diferentes níveis de controle de qualidade, para saber se por exemplo, os dados da velocidade dos ventos foram medidos por um anemómetro ou estimados a partir da faixa de equilíbrio do espectro de ondas, ou qual foi a metodologia usada para estimar os ventos para a altura de 10 metros acima da superfície do mar a partir da altura do anemômetros; entre outras informações pertinentes.

Num primeiro momento, os dados das bóias e dos satélites também podem ser comparados observando se existe uma divergência notável entre os dados por um período longo, garantindo uma maior segurança no uso de cada fonte de dados.

3.1.1 Verificação do intervalo dos dados (“Range Check”)

É importante verificar que os dados estejam dentro dos limites mínimos e máximos de aquisição pré-definidos pelo fabricante dos sensores das bóias e dos satélites. Os limites climatológicos também poderão ser verificados, inicialmente para cada bóia do programa PNBOIA, devido a sua disponibilidade. Os limites inferiores e superiores serão definidos por meio de uma margem de 7 desvios padrões em torno da média das séries temporais dos parâmetros para cada bóia (CHM, 2019).

3.1.2 Verificação da presença de “spikes” (“Continuity Check”)

O teste da continuidade verifica a consistência dos dados no tempo, sem a presença de “spikes”. “Spikes” são definidos como picos com mais de M vezes o desvio padrão (DP) da média da série temporal (Figura 1). O valor $4 \times DP$ da WMO é geralmente usado.

No caso dos dados das bóias, recomenda-se a eliminação dos “spikes” quando superarem o valor de M vezes o desvio padrão da vizinhança no intervalo de tempo de ± 3 horas. Para cada bóia, é adequado determinar M depois de testar vários valores de acordo com a variabilidade da série temporal.

Para o caso dos dados ao longo da passagem (“track”) do satélite, os spikes podem ser eliminados se são maiores que $4 \times DP$ em subáreas de 1 grau x 1 grau. O tamanho destas subáreas e o valor de M podem ser ajustados, de acordo com a resolução espacial dos produtos dos satélites.

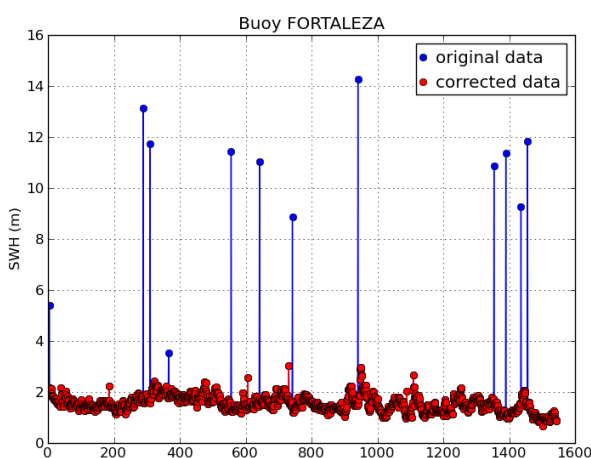


Figura 1. Exemplo do teste de verificação de spikes aplicado aos dados de altura significativa das ondas da Boia de Fortaleza do Programa PNBOIA. (Elaborado pelo autor).

3.1.3 Verificação das exceções pela passagem de Ciclones Extratropicais/Sistemas Frontais

Exceções serão aplicados aos testes de continuidade do tempo durante a passagem de ciclones extratropicais e/ou sistemas frontais, devido a sua importância durante a qualificação de dados meteorológicos (CHM, 2019). Os dados de altura significativa das ondas que foram identificados como “spikes” deverão ser reconsiderados se a intensidade do vento for igual ou superior a 15 m/s. Se o dado de velocidade do vento indicado como “spike”, deverá ser aceito se a pressão atmosférica correspondente e a imediatamente anterior forem menores que 995 hPa, isto é, se no caso estiverem disponíveis dados medidos de pressão atmosférica.

3.2 Pareamento dos dados das bóias/satélites e do modelo

Para a colocação dos dados do modelo e das boias no mesmo tempo e espaço, os dados do modelo poderão ser interpolados no espaço para as localizações das boias, e os dados das boias “colocados” para as horas do modelo usando uma janela temporal de 1.5 horas.

As medições ao longo dos tracks dos satélites precisarão ser “colocados” numa grade regular lat/lon, centrados em cada pixel de grade, calculando a média dos dados disponíveis dos satélites no raio de influência do pixel, e em torno do horário do modelo (+-30 minutos).

Para o caso dos altímetros, recomenda-se excluir os dados próximos da costa (menos de 30 km) que tendem a apresentar maior incerteza.

Uma profundidade mínima de 80 metros poderá ser aplicada permitindo excluir dados em águas rasas. De acordo com a Teoria Linear de Ondas, nesta profundidade, é assegurado que ondas com período de até 10 segundos estejam em águas profundas sem nenhuma interação com o fundo; os períodos acima disso estariam entrando em águas intermediárias, mas ainda assim, com muita pouca influência da batimetria (Campos, 2018).

3.3 Métricas do Erro Padrão

Para quantificar a performance do modelo, as seguintes métricas do erro serão usadas:

- BIAS : Que indica a tendência do erro,

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)$$

Onde, y_i é o dado do modelo e x_i é o dado da boia/satélite. Se positivo (negativo), o modelo tende a apresentar valores maiores (menores) que as observações in-situ ou remotas.

- RMSE: É a raiz do erro quadrático médio que indica o valor médio dos erros,

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - x_i]^2}$$

- NRMSE: É o RMSE normalizado,

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2}}$$

- SCRMSE: É o erro espalhado (“*Scatter component of RMSE*”),

$$SCRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y}) - (x_i - \bar{x})]^2}{n}} = \sqrt{RMSE^2 - BIAS^2}$$

No relatório de Campos(2018), menciona-se os problemas de utilizar-se somente o erro médio quadrático (RMSE) na avaliação de modelos numéricos Mentaschi et. al. (2013), pois este corresponde à combinação de dois tipos de erros com comportamentos completamente distintos: o erro sistemático (BIAS) e o erro espalhado (SCRMSE).

- SI: O índice de dispersão é uma medida utilizada para quantificar se um conjunto de ocorrências observadas estão relativamente dispersas ou agrupadas em comparação com um modelo estatístico padrão,

$$SI = \frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y}) - (x_i - \bar{x})]^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2}$$

Quando o coeficiente de dispersão é inferior a 1, o conjunto de dados é pouco disperso. Se o índice de dispersão é maior que 1, o conjunto de dados é muito disperso.

- CC: O coeficiente de correlação é a medida padronizada da relação entre duas variáveis, o qual indica se o crescimento de um tende a ser acompanhado pelo outro. Ele é calculado da seguinte forma:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

A correlação nunca pode ser maior do que 1 ou menor do que -1. Uma correlação próxima a zero indica que as duas variáveis não estão relacionadas. Uma correlação positiva indica que as duas variáveis se movem juntas, e a relação é forte quanto mais a correlação se aproxima de um. Uma correlação negativa indica que as duas variáveis se movem em direções opostas, e que a relação também fica mais forte quanto mais próxima de -1 indica a correlação.

Para validação do modelo com os dados das bóias, estas métricas deverão ser calculadas para cada série temporal modelo/boia das variáveis de altura significativa das ondas (Hs), período de pico (Pk) e velocidade dos ventos à 10 metros da superfície (V10), considerando todo o período de 2 anos e todos os horizontes de previsão, incluindo a análise 00Z.

A validação com os dados de satélite será dividida em duas regiões ao largo da costa do Brasil (Região Norte-Nordeste e Região Sul-Sudeste), que apresentam características, bem diferenciadas, no padrão de ondas e regime dos ventos. As métricas do erro serão calculadas para cada região para U10 e Hs, considerando todo o período de 2 anos e todos os horizontes de previsão, incluindo a análise 00Z.

As métricas poderão ser apresentadas em tabelas e/ou Diagramas de Taylor, segundo os exemplos (Tabela 3 e Figura 2).

Error statistics for H_s and U_{10} at select NDBC buoy locations (see Fig. 2 for buoy locations). Statistics have been computed over the entire hindcast period (wherever data is available). Except for SI and R^2 estimates (which are non-dimensional) all other error metrics are in m for H_s and m/s for U_{10} .

Buoy	Bias (H_s, U_{10})	SI	RMSE	R^2
<i>Atlantic/Gulf of Mexico buoys</i>				
41008	(-0.02, -0.28)	(21.7, 29.2)	(0.21, 1.77)	(0.81, 0.66)
41004	(0.02, 0.03)	(21.9, 23.5)	(0.29, 1.65)	(0.83, 0.78)
41010	(0.08, -0.16)	(19.0, 20.6)	(0.31, 1.36)	(0.87, 0.82)
41002	(0.08, 0.18)	(19.7, 21.5)	(0.37, 1.54)	(0.87, 0.82)
41001	(0.06, 0.09)	(19.3, 21.3)	(0.40, 1.65)	(0.88, 0.82)
44004	(0.08, 0.33)	(19.8, 22.0)	(0.41, 1.76)	(0.90, 0.82)
44025	(-0.04, 0.20)	(23.5, 22.6)	(0.30, 1.59)	(0.83, 0.81)
44005	(-0.25, 0.53)	(31.0, 26.8)	(0.55, 2.00)	(0.76, 0.77)
44011	(-0.01, 0.90)	(18.5, 24.3)	(0.37, 1.86)	(0.91, 0.82)
42001	(0.15, -0.40)	(23.2, 22.0)	(0.30, 1.47)	(0.89, 0.80)
42002	(0.12, 0.08)	(24.4, 24.3)	(0.33, 1.55)	(0.84, 0.73)
42003	(0.02, -0.41)	(24.4, 22.5)	(0.26, 1.48)	(0.88, 0.80)
42007	(-0.09, -0.97)	(32.3, 28.9)	(0.22, 1.97)	(0.80, 0.65)
<i>Pacific/Hawaii buoys</i>				
46001	(0.10, 0.19)	(17.5, 9.2)	(0.49, 1.55)	(0.89, 0.85)
46005	(0.36, 0.06)	(16.2, 18.7)	(0.57, 1.46)	(0.92, 0.85)
46002	(0.33, 0.11)	(15.5, 17.5)	(0.54, 1.33)	(0.92, 0.85)
46006	(0.37, -0.26)	(15.4, 17.4)	(0.57, 1.44)	(0.93, 0.87)
46012	(0.43, -0.12)	(18.8, 32.0)	(0.58, 1.83)	(0.84, 0.68)
46011	(0.28, -1.26)	(18.7, 34.8)	(0.48, 2.42)	(0.82, 0.63)
51001	(0.24, -0.19)	(16.9, 16.0)	(0.48, 1.17)	(0.85, 0.82)
51003	(0.13, -0.43)	(17.5, 19.2)	(0.41, 1.32)	(0.76, 0.69)
51002	(0.22, -0.34)	(15.9, 14.2)	(0.44, 1.23)	(0.76, 0.78)
51004	(0.15, -0.41)	(12.0, 14.2)	(0.33, 1.20)	(0.82, 0.75)

Tabela 3. Exemplo de tabela contendo a estatística do erro para diferentes boias. Tabelas similares também poderão ser construídas para a comparação com os dados de satélite (Extraído de Chawla et. al., 2013).

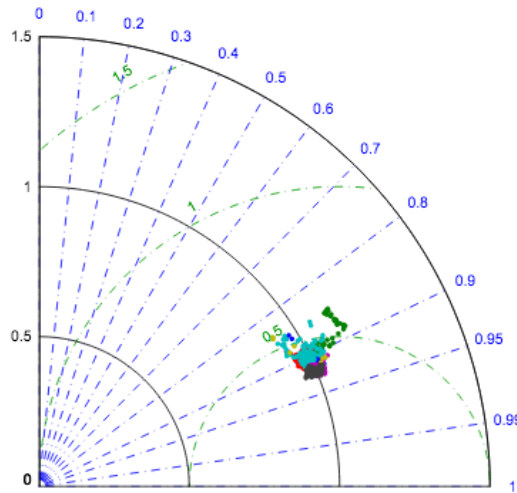


Figura 3. Exemplo de Diagrama de Taylor contendo as métricas do erro. As linhas radiais em azul representam os coeficientes de correlação, as linhas de contorno circulares em preto representam o desvio padrão normalizado e as linhas de contorno tracejadas representam o RMSE normalizado. (Extraído de Chawla et. al., 2013).

3.4 Erro em função do horizonte de previsão

As métricas do erro para Hs, Pk e V10 deverão ser calculadas para a análise (00Z) e cada horizonte de previsão (24Z, 48Z, 72Z, 96Z e 120Z) do modelo, tanto para cada bóia como para as duas regiões com os dados de satélite. Isto indicará a diminuição da qualidade da previsão no tempo (Figura 4).

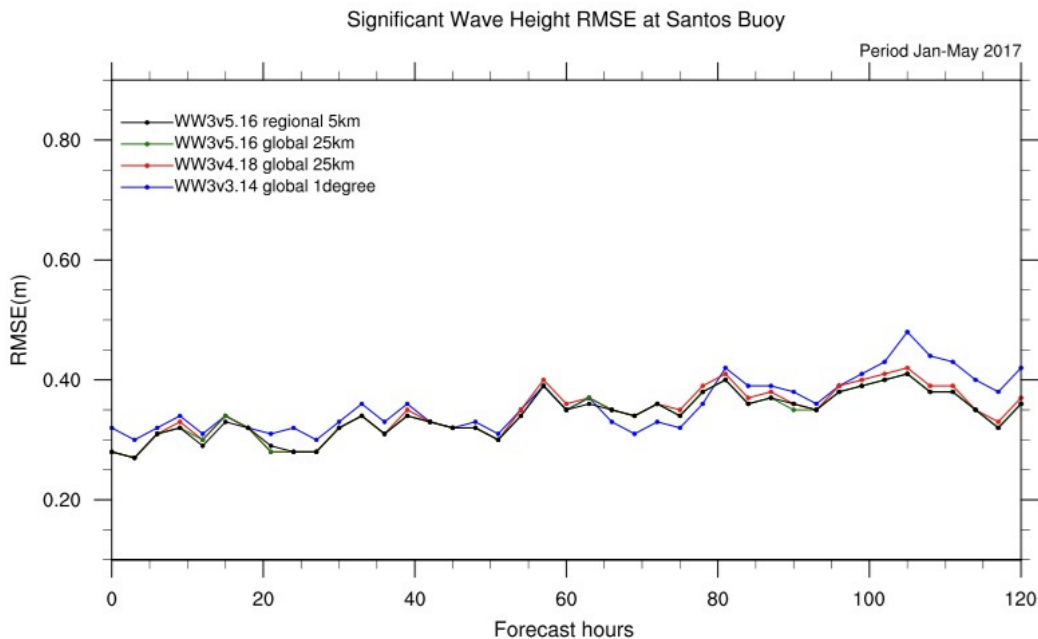


Figura 4: Exemplo do RMSE da altura significativa da onda em função do horizonte de previsão na Boia de Santos (Camayo et. al., 2018).

3.5 Erro em função da severidade

Campos (2018) reforça que analisar o erro calculando as métricas considerando todas as condições meteo-oceanográficas pode mascarar situações onde o modelo se comporta melhor ou pior. Avaliar o erro do modelo em função do estado do mar, principalmente nos eventos extremos, é o maior desafio em modelagem numérica.

As funções de densidade de probabilidade (PDF) e gráficos quantil-quantil (QQ-plots) serão construídos (Figura 5) para as variáveis Hs, V10 e Pk, comparando os dados do modelo de cada horizonte de previsão (00Z, 24Z,...,120Z) com os dados de cada bóia, assim como também, contrastando com os dados dos satélites. Estas análises são muito úteis para conhecer o skill do modelo em função do estado do mar. As métricas nos percentis 10°,

50°, 95° e 99° também poderão ser calculados. Os valores dos percentis 95° e 99° mostrará o erro durante eventos extremos.

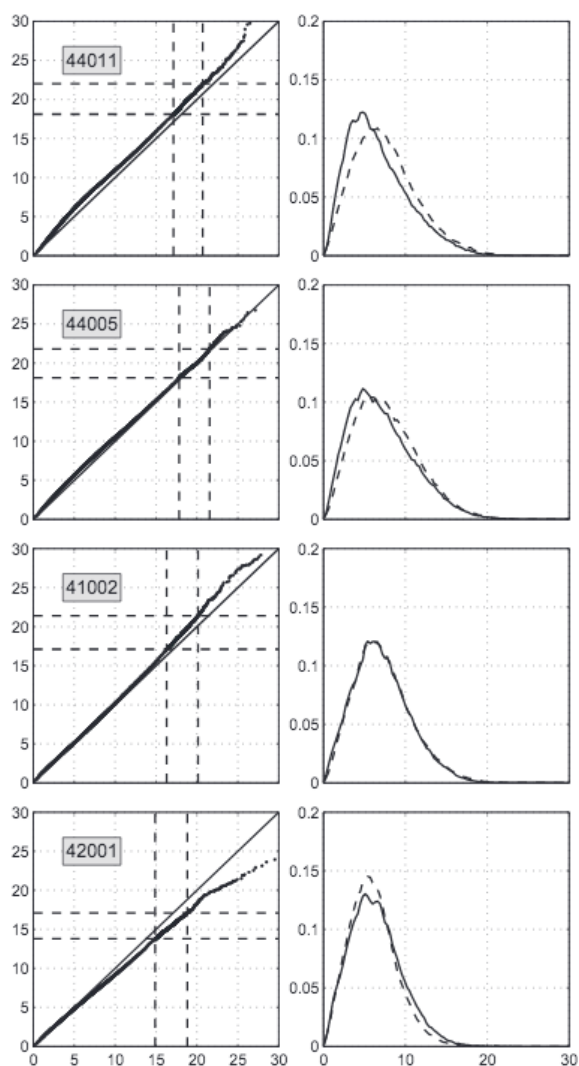


Figura 5. Exemplos de gráficos do tipo Q-Qplots (primeira coluna) e PDF (segunda coluna) para a velocidade do vento (m/s) nas boias selecionadas. Nos gráficos Q-Qplots, os valores observados in-situ encontram-se no eixo x e do modelo no eixo y. As linhas tracejadas na vertical (horizontal) representam os percentis 99° e 99.9° para os dados observados (modelo). Nos gráficos de PDF, as linhas sólidas representam os dados observados e as linhas tracejadas indicam o modelo. (Extraído de Chawla, 2013).

3.6 Calibração do modelo

Na calibração do modelo poderá se incluir análises dos gráficos PDF e Q-Qplots (Figura 5), junto com a análise do erro em função de determinados percentis e para os diferentes testes realizados (Figura 6), buscando alinhar os

dados do modelo com o observado. Campos (2019) realizou diferentes testes em função da:

- Forçante do vento.
- Resolução espacial e espectral.
- Calibração do termo fonte ST4 (Arduin et. al. 2010), incluindo os testes para diferentes parâmetros do Betamax.
- Versão do código do modelo WAVEWATCH III.

Stopa (2018) também sugere que outras variáveis como a longitude da rugosidade (z_a) ou incluso parâmetros no termo fonte de dissipação poderiam ser modificados para reduzir os erros associados a diferentes forçantes do vento.

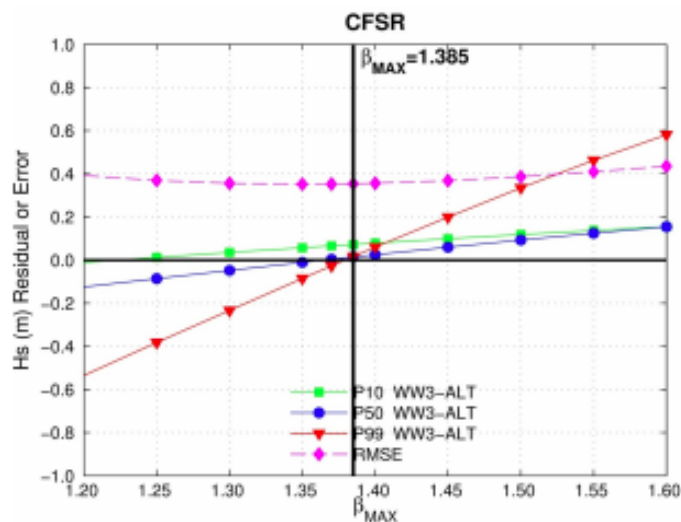


Figura 6. Exemplo da calibração dos ventos do CFSR modificando β_{max} e comparando Hs do modelo com dos altímetros. P10, P50 e P99 são os percentis 10°, 50° e 99°, respectivamente. O valor β_{max} escolhido é especificado com a linha vertical preta. Extraído de Stopa (2018).

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho visa estabelecer um protocolo para a descrição, validação e calibração para futuras versões do Sistema de Previsão de Ondas, baseado no modelo WAVEWATCH III, que serão implementados operacionalmente no ambiente computacional do INPE. O processo de validação do modelo inclui um processo básico de controle de qualidade dos dados das boias, altímetros e escaterômetros, tentando eliminar possíveis dados “espúrios” que possam ter resistido à anteriores processos de qualificação dos dados. A validação do modelo é realizada com o cálculo das métricas do erro, Diagramas de Taylor, Funções de Densidade de Probabilidade e gráficos do tipo Quantil-Quantil, buscando a comparação dos dados do modelo pareados no espaço-tempo com os dados das bóias e dos altímetros. Destaca-se também uma análise em função do horizonte de previsão e da severidade do estado do mar, principalmente, avaliando o skill do modelo durante eventos extremos. Sugere-se também uma metodologia para o processo de calibração do modelo.

Futuramente, uma nova versão do protocolo de validação deverá incluir análise do erro do espectro de energia das ondas e das partições do espectro. Outras variáveis, como a direção dos ventos e das ondas também poderão ser incluídas.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Amante, C. & Eakins, B. W. Etopo1 1 Arc Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. *NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24*, 2009.
2. Ardhuin, F., W. E. Rogers, A. V. Babanin, J. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. van der Westhuysen, P. Wuefflelou, J. Lefevre, L. Aouf & F. Collard. Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: Definition, calibration, and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 1917-1941, 2010.
3. Battjes, J. A. & J.P.F.M. Janssen. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, 569-587, 1978.
4. Cavaleri, L. & P. Malanotte-Rizzoli. Wind-wave prediction in shallow water: Theory and applications. *J. Geophys. Res.*, 86, 10961-10973, 1981.
5. Ferreira et al. Informações meteorológicas e oceanográficas para olimpíadas Rio 2016: Plano de contingência, sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/09.09.17.12-NTC, 2016.
6. Hasselmann, K. T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Muller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell & H. Walden. Measurements of wave-growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Erganzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A(8)*, 12, 1973.
7. Hasselmann, S. & K. Hasselmann. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1369-1377, 1985.
8. Innocentini, V. Sistema de Previsão de Ondas: Projeto para estudar a geração, propagação e dissipação da agitação marítima no litoral brasileiro. *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia*, vol. 25, n. 2, 15-19, Ago. 2001.
9. Miche, A. Mouvements ondulatoire de la mer en profondeus croissante ou décroissante. Forme limite de la houle lors de son déferlement. Application aux digues maritimes. Deuxième partie. Mouvements ondulatoires périodiques en profondeur régulièrement décroissante. *Annales des Ponts et Chaussées*, 114, 131-164, 270-292, 1944.
10. Rogers, W. E. & T. J. Campbell. Implementation of curvilinear coordinate system in the WAVEWATCH III model. *Report NRL/MR/7320-09-9193*, Naval Research Laboratory Stennis, 2009.

11. Roland, A. Development of WWM II: Spectral wave modelling on unstructured meshes. *PhD. Thesis, Technische Universitat Darmstadt, Institute of Hydraulic and Water Resources Engineering.*
12. The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG). User manual and system documentation of WAVEWATCH version 5.16. *NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 329*, 2016.
13. The WAVEWATCH IIIR Development Group (WW3DG). User manual and system documentation of WAVEWATCH IIIR version 6.07. *Tech. Note 333*, 2019.
14. Tolman, H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15. *NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 151*, 1997.
15. Tolman, H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. *NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 222*, 2002a.
16. Tolman, H. L. Alleviating the garden sprinkler effect in wind wave models. *Ocean Mod.* , 4, 269-280, 2002b.
17. Tolman, H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 3.14. *NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 276*, 2009.
18. Tolman, H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 4.18. *NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 316*, 2014a.
19. Tolman, H. L. WAVEWATCH III development best practices. *NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 286*, 2014b.
20. Ardhuin, F. et. al. Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: Definition, calibration, and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 1917-1941, 2010.