

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIA**

**SENSIBILIDADE DO MODELO DE ONDAS SWAN ÀS
FORÇANTES ATMOSFÉRICAS E CONDIÇÕES DE
CONTORNO: UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO
COSTEIRA DO SUL DO BRASIL**

NÍCOLAS DE ASSIS BOSE

ORIENTADOR - Prof. Dr. Leandro Farina

Porto Alegre, 2021.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIA**

**SENSIBILIDADE DO MODELO DE ONDAS SWAN ÀS
FORÇANTES ATMOSFÉRICAS E CONDIÇÕES DE
CONTORNO: UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO
COSTEIRA DO SUL DO BRASIL**

NÍCOLAS DE ASSIS BOSE

ORIENTADOR-Prof. Dr. Leandro Farina

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Junior - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) - Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceaniânica (CECO)

Prof. Dr. Nelson Violante de Carvalho - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Programa de Engenharia Oceânica (PEnO COPPE)

Prof. Dr. Felipe Mendonça Pimenta - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Centro de Ciências Físicas e Matemáticas (CFM)

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção de Título de Mestrado em Geociência.

Porto Alegre, 2021.

Ficha Catalográfica

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitor: Patrícia Helena Lucas Pranke

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Vice-Diretor: Tatiana Silva da Silva

Bose, Nícolas de Assis

Sensibilidade do modelo de ondas Swan às forçantes atmosféricas e condições de contorno: um estudo de caso na Região Costeira do Sul do Brasil. / Nícolas de Assis Bose. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2020.
[55 f.] il.

Dissertação (Mestrado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2020.

Orientador: Leandro Farina

1. Ondas oceânicas. 2. Modelagem de ondas. 3. Bancos de dados. 4. Litoral Sul do Brasil. Título.

CDU 551.468.1

Catalogação na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grun

CRB 10/1113

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS - Brasil

CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.

Fone: +55 51 3308-6569 Fax: +55 51 3308-6337

E-mail: bibgeo@ufrgs.br

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador Leandro Farina pelas longas discussões e acompanhamento durante estes anos, sempre disposto a me ajudar. Além disso contribuiu muito para o meu desenvolvimento científico, principalmente na área de previsão numérica de ondas.

Ao professor Elirio Toldo Jr. que sempre esteve disposto a me ajudar e pelos recursos computacionais no início do mestrado. Ao professor João Batista Da Paz Carvalho que no meio da pandemia ajudou nas instalações dos novos computadores no Laboratório Integrado de Computação Científica (LICC), que sem eles não seria possível concluir as simulações.

Aos amigos de trabalhos Marília Ramos, Claus Saidelles e ao Gustavo Correia gostaria de agradecer pelas amizades e que sempre contribuirão com as discussões e o desenvolvimento do projeto de mestrado. Em especial também aos amigos Lucas Matos, Helena Reichert e Orlando Matos que durante a minha estadia em Porto Alegre não mediram esforços para me ajudarem.

Gostaria de agradecer ao apoio da minha Família que sempre incentivaram a correr atrás dos meus objetivos e nunca a desistir.

Resumo

Este trabalho investiga a sensibilidade do modelo de ondas SWAN em relação à forçante atmosférica e às condições de fronteira. O modelo de ondas foi implementado e validado para o litoral do sul do Brasil e executado para o ano de 2015. Nove combinações de conjuntos de dados de ondas e ventos foram consideradas, com o objetivo de estabelecer as condições de contorno e forçantes atmosféricos que reproduzem os sistemas de ondas e ondas com maior acurácia. Os resultados do modelo de onda foram validados através de comparações com duas boias fundeadas em águas profundas e uma boia em águas rasas. Parâmetros integrados, como altura significativa de onda H_s , direção média de onda D_m e período de onda de pico T_p , foram calculados e comparados. Em geral, o modelo SWAN reproduz satisfatoriamente os campos de ondas distintos para todos os bancos de dados de vento e ondas utilizados. No entanto, a combinação de conjuntos de dados que produz maior acurácia na região estudada são os ventos do ERA5 com as condições de contorno das ondas do CAWCR.

Palavras-chave: Ondas oceânicas, modelagem de ondas, banco de dados, litoral sul do Brasil.

Abstract

This work investigates the sensitivity of the SWAN wave model with respect to state-of-the-art wave and wind datasets. The wave model was implemented and validated for the southern Brazilian nearshore environment and simulated for the year of 2015. Nine combinations of wave and wind datasets have been considered, aiming at establishing the boundary conditions and atmospheric forcing which best reproduce windsea and swell systems. The wave model results have been validated comparing against two buoys deployed in deep water and one buoy in shallow water. Bulk wave parameters such as significant wave height H_s , mean wave direction D_m and peak wave period T_p have been computed and compared. Overall, the performance of the SWAN wave model satisfactorily reproduce the distinct waves fields for all wind and wave databases. However, the combination of datasets that best represents the ocean waves in the region is the ERA5 winds with the CAWCR wave boundary conditions.

Keywords: Ocean waves, wave modelling, database analysis, southern Brazil nearshore

Lista de Figuras

1.1	Características básicas das ondas de superfície no oceano.	18
1.2	Exemplo de estado de mar complexo representado pela soma de várias ondas durante um evento de tempestade.	19
1.3	Análise do espectro de onda para o Mar do Norte quando um <i>swell</i> de norte formado na região mais ao norte se encontra com uma <i>wind sea</i> de leste próximo a costa da Holanda. Adaptado de Holthuijsen (2010).	22
1.4	O gráfico a esquerda representa o espectro de ondas totalmente desenvolvido proposto por Pierson e Moskowitz (1964) para cada velocidade do vento. Enquanto o gráfico a direita representa a evolução do espectro de onda para áreas limitadas no mar proposto por Hasselmann et al. (1973).	23
1.5	Diferença entre o espectro JONSWAP e Pierson-Moskowitz quando multiplicado por γ . Adaptado por Bouws et al. (1998)	24
1.6	a) Espectro bidimensional. b) Representação da distribuição de direção para uma frequência constante. Adaptado de Holthuijsen (2010). . . .	25
2.1	Map of the study area referring to the oceanic region of southern Brazil and Uruguay. Red dots correspond to wave buoys (i.e., Tramandaí, Itajaí and Rio Grande). Curvilinear grid spacing ranges from 72 to 180 arc-seconds. Bathymetry extracted from GEBCO database reaches up to 5000 m at a 15 arc-second interval.	32

2.2 Time series of measured and modeled H_s for the period of May 2015. The subplots show the different wind databases along the columns and the buoys of Rio Grande (RG), Itajaí (IT) and Tramandaí (TR), over the rows, from the left to the right, respectively. SWAN simulations with different wave boundary conditions (ERA5, WW3 and CAWCR) are represented with solid colored lines, while buoy measurements are defined as black dotted-lines. 41

2.3 Time series of measured and modeled D_m for the period of May 2015. The subplots show the different wind databases along the columns and the buoys of Rio Grande (RG), Itajaí (IT) and Tramandaí (TR), over the rows, from the left to the right, respectively. SWAN simulations with different wave boundary conditions (ERA5, WW3 and CAWCR) are represented with solid colored lines, while buoy measurements are defined as black dotted-lines. 44

2.4 Time series of measured and modeled T_p for the period of May 2015. The subplots show the different wind databases along the columns and the buoys of Rio Grande (RG), Itajaí (IT) and Tramandaí (TR), over the rows, from the left to the right, respectively. SWAN simulations with different wave boundary conditions (ERA5, WW3 and CAWCR) are represented with solid colored lines, while buoy measurements are defined as black dotted-lines. 46

Lista de Tabelas

2.1	SWAN physics, numerical configuration, and the computational grid information.	34
2.2	Wind dataset characteristics	36
2.3	Wave dataset characteristics	37
2.4	Coordinates, depth of anchoring and distance from the coast of the wave buoys used for the validation.	37
2.5	Summary statistics of the three buoys measurements before and after the retrieval of outliers. The labels mean, std, min, max stand for the mean value, standard deviation, minimum and maximum value, respectively.	38
2.6	Statistical analysis for each ensemble database at buoy location for significant wave height. The most accurate database are marked in bold.	40
2.7	Statistical analysis for each ensemble database at buoy location for mean wave direction. The most accurate database are marked in bold.	43
2.8	Statistical analyses for each ensemble database at buoy location for peak wave period. The most accurate database are marked in bold	45
2.9	Wave dataset characteristics.	48

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Contextualização	12
1.2	Motivação e Objetivos	16
1.2.1	Objetivo	16
1.3	Referencial teórico	16
1.3.1	Ondas irregulares no oceano	17
1.3.2	Parametrizações do espectro	23
1.3.3	Distribuição direcional e parâmetros integrados	24
1.3.4	Equação de balanço de ação	25
2	Assessing wind datasets and boundary conditions for wave hindcasting in the Southern Brazil nearshore	29
2.1	Introduction	30
2.2	Methodology	31
2.2.1	Study area	31
2.2.2	The wave model setup	32
2.2.3	Wind datasets	35
2.2.4	Wave boundary condition datasets	36
2.2.5	Observational data	37
2.2.6	Validation	38
2.3	Results	39
2.3.1	Wind and wave boundary database performance	39
2.4	Discussion	47
2.5	Conclusion	50

3 Considerações finais	55
3.1 Anexo Submissão	57

Introdução

1.1 Contextualização

A natureza aleatória das ondas de superfície do mar torna-as um dos fenômenos mais complexos e interessantes de se estudar. Ondas oceânicas são conhecidas por ser o principal agente na dinâmica costeira e constituindo-se na mais efetiva ameaça às obras costeiras, à segurança da navegação e às operações navais (Candella, 1997). Portanto, um bom conhecimento do clima de ondas e a capacidade de previsão do estado de agitação marítima para as regiões costeiras é de fundamental importância tanto para a engenharia costeira e oceânica, como também para o gerenciamento costeiro (Melo, 1993). Atualmente, as características das ondas oceânicas são estimadas principalmente por observações, medições em campo, modelos numéricos e sensoriamento remoto.

A melhor maneira de se obter um conjunto de informação reais do estado de agitação do mar é através de medições em campo. No entanto, redes que coletam informações das condições de ondas, geralmente envolvem equipamentos caros e com alto custo de manutenção, como boias oceanográficas, que nem sempre são viáveis em países em desenvolvimento. Além do mais, estas são medições pontuais, abrangendo somente uma pequena região e representando parcialmente o campo de ondas gerado pelas tempestades. Contudo, existem alternativas que buscam por meio de modelos matemáticos descrever a superfície marítima através do chamado espectro de onda, ou seja, por meio da equação do balanço do espectro pode-se obter características do estado de agitação do mar em vários pontos, em todos os oceanos (Komen et al., 1996). Dessa maneira, podemos obter informações dos diferentes campos de ondas gerados por tempestades, em termos de parâmetros como altura significativa,

direção de pico, energia da onda e outros. Esses modelos de previsão são conhecidos como modelos espectrais de ondas de terceira geração, sendo os mais utilizados, o WaveWatch-III (Tolman et al., 2002), SWAN (Booij et al., 1999: *Simulating Waves Nearshore*) e WAM (Komen et al., 1996: *Wave Model*).

Em vista disto, os modelos numéricos de ondas se tornaram uma ferramenta de grande importância para mitigar os riscos associados às condições do mar, sendo de interesse das autoridades por fornecerem subsídios para um melhor gerenciamento costeiro e para a segurança da navegação e da população (Bouws et al., 1998). De uma maneira geral, o uso de modelos numéricos de previsão de ondas pelos centros de previsões meteorológicas e oceanográficas oferecem informações das condições do estado do mar para diferentes setores da sociedade. Alguns centros de previsão prestam serviços de grande importância para empresas de extração de petróleo e gás na região da plataforma continental, enquanto outros para operações portuárias, navegação, torneios de pesca, competições de surf e para outros eventos em geral (Bouws et al., 1998). Desta forma, observa-se a grande importância das informações geradas pelos serviços de previsão na garantia do sucesso e da segurança das atividades em relação ao comportamento do mar. Por esse motivo, é necessário que as previsões numéricas de ondas sejam cada vez mais precisas, e isso têm avançando conjuntamente com o desenvolvimento de computadores de maior capacidade de processamento para o cálculo dos parâmetros físicos das ondas.

Atualmente, os modelos numéricos de ondas são amplamente utilizados por centros meteorológica e oceanográficos, como *European Centres for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF), *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) e outros, para realizar previsões do estado de agitação do mar. Muitos centros conseguem prever em média os parâmetros de onda para 10 dias na frente, mas nem sempre essas previsões correspondem com o real estado de mar, visto que, tanto os modelos atmosféricos e de ondas possuem incertezas. Geralmente, os erros são associados com a parametrização do modelo (e.g. Termos fontes e dissipadores de energia), com as condições de contorno e iniciais (e.g. Campo de Ventos, Batimetria, correntes e outros) e com as aproximações inerentes dos modelos (Bunney e Saulter, 2015). Em especial, os resultados dos modelos de ondas dependem fortemente da qualidade dos dados ventos utilizados como forçante. Desta forma, os modelos de ondas herdam a incerteza dos dados e

previsões atmosféricas (Osinski e Radtke, 2020)).

Muitos dos centros de previsão de tempo e clima produzem bancos de dados para longos períodos. O centro operacional ECMWF apresentou o banco de dados ERA5, sucessor do ERA-Interim em 2016. Este sistema apresenta registros completos das variáveis atmosféricas globais, superfície terrestre e de ondas oceânicas deste 1950 em diante. O ERA5 é baseado em um Sistema Integrado de Previsão (*Integrated Forecasting System*, IFS) Cy41r2 e apresenta uma melhora na resolução horizontal; atualmente de 31 km em contraste com 80 km do ERA-Interim, e saída de dados a cada 1 hora. Os dados de saída são processados passando por um esquema de assimilação de dados (4D-Var) observacionais, tais como de altimetria e de boia para melhorar a qualidade dos dados. O modelo utilizado para gerar os parâmetros de ondas é o WAM (Hersbach et al., 2020).

O NCEP também desenvolveu bancos de dados tanto de ventos como de onda, deste 1949 em diante. O modelo de onda WaveWatch-III, versão 4.15, é forçado globalmente com dados de GFS (Global forecast system) com resolução espacial de 0.5° tanto para latitude e longitude e com resolução temporal de 1 hora (<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/implementations.php>). O hindcast de ondas CAWCR (*Centre of Australian Weather and Climate Range*) é fornecido pela CSIRO com dados de vento de superfície CFSRv2 do NCEP com uma resolução espacial de $0,4^\circ$ e resolução temporal horária. Os dados de campo de vento do em Global Forecast System (GFS), fornecidos pelos Centros Nacionais de Predição Ambiental (NCEP), são caracterizados por resolução espacial de $0,5^\circ$ e resolução temporal de 3 horas (Durrant et al., 2013).

Um aspecto crucial na previsão de ondas é a representação de eventos extremos. A falta de informações sobre a eficiência de diferentes conjuntos de dados de vento e ondas usados como forçante e condição de contorno para a previsão de ondas no sul do Brasil pode levar ao baixo desempenho dos modelos de ondas, tornando-os incapazes de representar eventos extremos. Devido ao crescente número de atividades offshore que levam à vulnerabilidade costeira no sul do Brasil, o desenvolvimento de modelos numéricos de ondas mais acurados tornou-se necessário, especialmente para monitorar eventos de tempestade. De fato, para fornecer um bom sistema de previsão de ondas, é essencial que campos de vento de superfície confiáveis (a 10 m de altura) e condições de onda estejam disponíveis. Erros embutidos nos campos de vento ou ondas são suficientes para gerar estados de mar incertos que irão evoluir e

permanecer no tempo (Farina, 2002). Além disso, é importante - para modelos costeiros - levar em consideração o aspecto morfológico do fundo do oceano. Em ambientes próximos à costa, ao longo da plataforma sul brasileira, o fundo oceânico compreende uma combinação de plataformas extensa de inclinação suave (menor refração) como também apresenta partes das plataformas mais estreitas e íngremes (maior refração) e, portanto, devem ser contabilizadas, por exemplo, a inclinação do fundo variando de $0,06^\circ$ a $5,00^\circ$ ao longo da zona costeira (Short e Klein, 2016).

Em relação à modelagem oceânica para a zona costeira do sul do Brasil, apenas alguns trabalhos publicados abordam o impacto de diferentes bancos de dados na modelagem e previsão de ondas (Cecilio e Dillenburg, 2020; Guimarães et al., 2014; Siadatmousavi et al., 2016). Guimarães et al. (2014) investigaram eventos de ondas extremas no litoral sul do Brasil em um período de 10 anos, usando o modelo de ondas SWAN. Siadatmousavi et al. (2016) avaliam o desempenho modelo de ondas SWAN em Santa Catarina sob diferentes condições de ondas e ventos. Os conjuntos de dados atmosféricos avaliados nesse trabalho foram o GROW-Fine SAM (desenvolvido pela Oceanweather Inc.) e as reanálises do ERA-Interim (desenvolvido pela ECMWF). As condições de contorno de onda foram definidas com espectros de ondas direcionais da simulação do GROW-Fine e do WaveWatch III. Como resultado, eles descobriram que a campos do vento e os dados de fronteira de onda do GROW-Fine superam as simulações realizadas com ventos de ECMWF ERA-Interim, com as condições de fronteira de ondas do WaveWatch III. Mais recentemente, Cecilio e Dillenburg (2020) implementaram o modelo de ondas SWAN aninhado com o modelo WaveWatch III para analisar a climatologia de ventos e de ondas na região sul do Brasil próximo à costa.

Tendo em vista a necessidade de desenvolver um modelo de ondas que descreva com acurácia os diferentes sistemas de ondas presentes no sul do Brasil, este estudo tem como objetivo investigar e validar conjuntos de dados de ventos e ondas usando o modelo de ondas SWAN. Desse modo, selecionamos os dados de reanálise atuais, disponíveis publicamente por três centros operacionais conhecidos internacionalmente, ECMWF-ERA5 na Europa, NCEP-WW3 nos EUA e CSIRO na Austrália, para o ano de 2015 para a realização dos experimentos. Além disso, cada um dos três bancos de dados de vento e ondas foram validados, somando nove combinações distintas de condições.

1.2 Motivação e Objetivos

A carência de pesquisas sobre a sensibilidade de modelos numéricos de onda em relação as condições de vento como também sobre condições de fronteira de ondas, dificultam um entendimento mais profundo da natureza das ondas para a região costeira do sul do Brasil. Portanto, a consideração a análise de diferentes bancos de dados tornam-se necessárias. Tendo em vista isso, atualmente existem distintos centros meteorológicos e oceanográficos que fornecem um conjuntos de dados, tanto de ventos como de ondas. Cada um desses bancos de dados são gerados a partir de modelos atmosféricos e de ondas diferentes. Sendo assim, é de grande interesse analisarmos a qualidade desses bancos de dados em representar as distintas características das ondas. Além disso, as simulações numéricas de ondas para a região costeira do sul do Brasil dependem fortemente da qualidade das ondas prescritas nas fronteiras. Analisaremos o impacto nos resultados do modelo considerando parâmetros integrados de ondas (H_s , T_p e D_m) assim como o espectro direcional da onda $E(f, \theta)$. Deste modo, objetivamos estabelecer um sistema de previsão e hindcasting robusto para a região Sul do Brasil, com com os melhores bancos de dados disponíveis na atualidade.

1.2.1 Objetivo

A presente dissertação pretende estudar e investigar através da modelagem numérica a qualidade de três bancos de dados disponíveis pelos centros meteorológicos e oceanográficos ECMWF-ERA5, NCEP-WW3 e CSIRO-CAWCR, através de diferentes combinações entre eles. Especificamente, pretendemos estabelecer a a combinação que provê a maior acurácia na solução do modelo SWAN implementado na região Sul do Brasil.

1.3 Referencial teórico

Nesta subseção, descrevemos brevemente a teoria de ondas oceânicas de superfície, desde a sua descrição espectral até a equação do balanço de ação de ondas que governa o modelo SWAN.

1.3.1 Ondas irregulares no oceano

As ondas de superfície do mar são uma perturbação na interface oceano-atmosfera, resultante da energia transferida pelos ventos para o mar, e são a principal forma de transporte de energia no oceano (Young, 1999). A formação de ondas no oceano depende de três fatores intrinsecamente relacionados aos ventos: sua intensidade, sua duração e a extensão da pista sobre a qual atua (fetch) (Holthuijsen, 2010). Em vista disso, quanto maior for a velocidade do vento, a duração da tempestade e o tamanho da área de atuação do vento, maior será a transferência de energia para as ondas, gerando ondas de grande altura e de longos períodos (Young, 1999). Trabalhos experimentais como o de JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) contribuíram para melhor o entendimento do efeito do vento na dinâmica das ondas (Hasselmann et al., 1973). Esses autores analisaram uma série de levantamentos de dados de vento e de ondas realizados no mar do Norte ao longo dos anos de 1968 e 1969, com o objetivo de melhor compreender o processo de formação das ondas pelo vento. Como resultado, conseguiu-se estabelecer uma relação entre a velocidade e duração do vento com a formação da onda. Por exemplo, ventos de 15 m/s são capazes de produzir ondas com altura de 4 m depois de 12 horas e ondas de 5 m de altura após 24 horas.

O campo de ondas gerado por uma tempestade em um primeiro instante, dá origem a ondas irregulares, desorganizadas, que estão sob influência do campo de vento formador, essas ondas são conhecidas como vagas (ou *wind sea*, em inglês) (Young, 1999). Conforme essas ondas se propagam para fora da zona de geração, elas adquirem um comportamento mais regular e se agrupam em diferentes campos de ondas, os quais vão apresentar características semelhantes de altura, comprimento e período, essas ondas são conhecidas como ondulações (swell). Essas ondas não estão mais sob influência do vento que as gerou e seu principal agente modelador são transformações não lineares entre diferentes grupos de ondas.

Os parâmetros mais importantes para descrever as ondas são o comprimento L , a altura H e a profundidade d da água sobre a qual estão se propagando. A Figura 1.1 apresenta as principais características das ondas de superfície no oceano. O comprimento de onda é representado como a distância horizontal entre duas cristas de ondas sucessivas, ou seja, entre os pontos mais altos da onda, o cavado é o ponto mais baixo da onda e a altura é a distância entre a crista e o cavado.

Outros parâmetros tais como o período T , a amplitude $a = H/2$, a velocidade

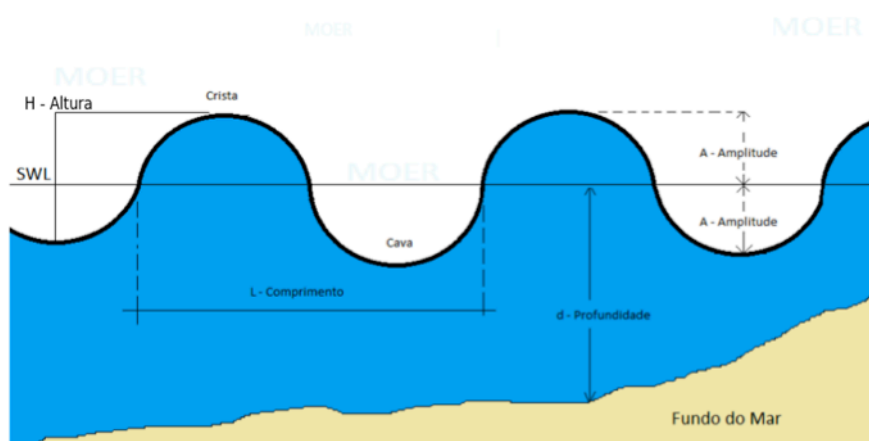


Figura 1.1: Características básicas das ondas de superfície no oceano.

da onda $c = L/T$, a frequência $f = 1/T$, o número de onda $k = 2\pi/L$ e a frequência angular $\omega = 2\pi/T$, podem ser determinados teoricamente a partir das características básicas da onda. O período da onda é o tempo requerido para duas cristas ou cavas sucessivas passarem pelo mesmo ponto.

De acordo com a teoria linear das ondas de superfície, a velocidade de propagação da onda em oceano profundo depende da frequência (inverso do período) ou do comprimento de cada grupo de onda (Holthuijsen, 2010). Portanto, as ondas de comprimento mais longos se propagam mais rapidamente do que as ondas mais curtas, ocorrendo dispersão. Esse processo é representado pela relação de dispersão da onda linear, dada por

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (1.1)$$

De fato, o caráter dispersivo em águas profundas faz com que as ondas com diferentes características se propaguem independentemente, sendo a velocidade de fase da onda dependente do período. No entanto, a medida que as ondas se propagam para águas rasas começam a sofrer alterações em suas propriedades e perdem o caráter dispersivo (Holthuijsen, 2010). A onda se modifica a partir do momento que começa a sentir o fundo. Isso ocorre quando a profundidade é igual a metade do comprimento de onda. Alterações do campo de onda em águas rasas ocorrem devido aos processos tais como refração, de empolamento e de difração (Holthuijsen, 2010). No empolamento ocorre mudança na altura da onda, sem mudança na direção. O processo de refração ocorre quando uma onda encontra uma variação de uma profundidade oblíqua ao sentido de propagação. A onda, neste caso, encontrará profundidades diferentes que faz com que a parte da onda que se encontra em águas profundas tenha veloci-

dade maior do que a parte em águas mais rasas, portanto, resultando na mudança de direção de acordo com a segunda lei de Snell. A difração é o fenômeno que ocorre quando as ondas passam ao redor de ilhas e quebra-mares. Nesse processo, a energia da onda é transferido pela crista para as regiões de sombra produzido por ilhas ou quebra-mares.

De modo geral, a superfície do mar η pode ser caracterizada pela sobreposição de várias ondas lineares propagando livremente no plano horizontal dado por x e y , com diferentes direções θ , amplitudes a , frequências ω e vetor de onda $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$ (Young, 1999). Temos como exemplo a Figura 1.2 onde A) mostra um estado de mar complexo durante tempestade, enquanto, enquanto B) exemplifica a soma de diferentes ondas para um mesmo intervalo de tempo. Sendo assim, podemos descrever uma

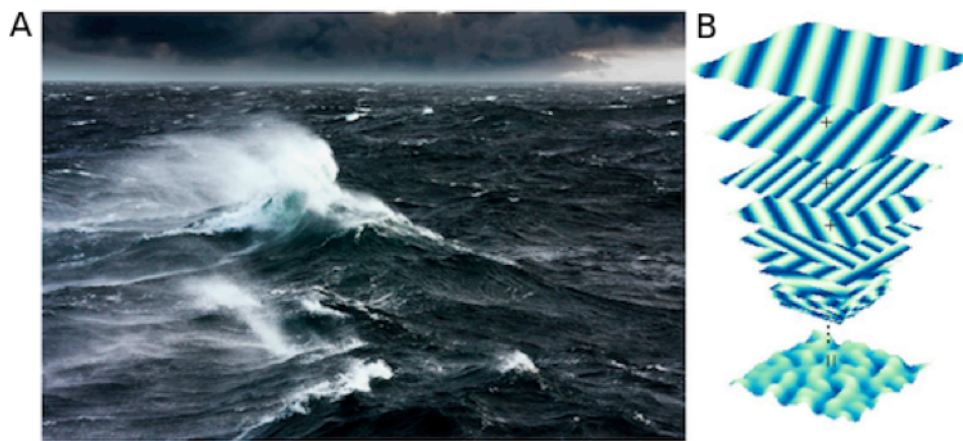


Figura 1.2: Exemplo de estado de mar complexo representado pela soma de várias ondas durante um evento de tempestade.

única onda harmônica na superfície do mar por

$$\eta(x, y, t) = a \cos(\omega t - kx \cos \theta - ky \sin \theta + \alpha) \quad (1.2)$$

ou podemos descrever a superfície no mar como um somatório de várias ondas harmônicas (Holthuijsen, 2010), conhecido também como espectro de amplitude $a(\omega)$:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t - k_i x \cos \theta - k_i y \sin \theta + \alpha_i), \quad (1.3)$$

onde α é a fase onda. O índice i representa cada onda no somatório e N representa o número total de ondas na série num ponto fixo no espaço de propagação da onda em x e y . No entanto, uma forma mais usual de representar o espectro de amplitude é pela densidade do espectro de variância, ou seja, considerar a variância $\frac{1}{2}a_i^2$ em vez

da amplitude a_i . Também temos que lembrar que tanto o espectro de amplitude e de variância estão relacionado a uma frequência, portando devemos distribuir a variância $\frac{1}{2}a_i^2$ sobre um intervalo de frequência Δf , usando f em vez de ω para representar a frequência já que $\omega = 2\pi f$. Sendo assim, a densidade do espectro de variância é representada pela equação

$$E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \frac{1}{2} \overline{a_i^2}, \quad (1.4)$$

onde a barra superior denota média no tempo. Contudo, a variância da elevação da superfície $\eta(t)$ é por definição a média ao quadrado da elevação da superfície em torno da média $\overline{\eta^2}$. Para uma onda harmónica com uma amplitude a , a variância é $\overline{\eta^2} = \frac{1}{2}a^2$. Dessa maneira a variância $\overline{\eta^2}$ total da superfície do mar é a soma da variância para todas frequências do espectro:

$$\overline{\eta^2} = \int_0^{\infty} E(f) df \quad (1.5)$$

Além disto, a energia da onda pode ser expressa em termos de variância da superfície do mar, em vista que, a energia de uma onda harmónica é igual a média ao quadrado na elevação do mar vezes a aceleração da gravidade g e a densidade da água ρ . Logo a energia total (soma de toda as componente de ondas por area de oceano) é

$$E_{\text{total}} = g\rho\overline{\eta^2}. \quad (1.6)$$

Agora podemos portanto multiplicar o espectro de densidade de variância $E_{\text{variância}} = E(f)$ por $g\rho$ e obter o espectro de densidade de energia, como

$$E_{\text{energia}}(f) = g\rho E_{\text{variância}}(f). \quad (1.7)$$

Devido à relação acima, devemos ter cuidado ao usar a palavra espectro. Visto que pode ser referido tanto para o espectro de variância como também para espectro de energia. Todavia, o espectro de variância serve para descrever os aspectos estatísticos das ondas, enquanto o espectro de densidade de energia é usado para descrever os aspectos físicos das ondas. Pelo fato de depender apenas da frequência, estes espectros, como definidos acima são conhecidos como espectros unidimensionais.

Contudo, na natureza quando olhamos para um ponto no oceano para um intervalo de tempo, observamos que existe uma conjunto de sistemas de ondas que apresentam diferentes características de amplitude a , direção θ , fase α e frequência f (Fig.1.2). Considere um número infinito de ondas propagando em direções aleatórias

em um plano horizontal dados por x e y . Assumimos $k_{ij} = (k_i \cos \theta_j, k_i \sin \theta_j)$, sendo θ_j a direção de propagação de cada uma das ondas. Assim, podemos generalizar a equação 1.3 como

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{i,j} \cos(\omega_i t - k_i x \cos \theta_j - k_i y \sin \theta_j + \alpha_{i,j}), \quad (1.8)$$

onde os índices i e j se referem a frequência e direção, respectivamente. Por fim, temos um espectro de amplitude $a(f, \theta)$, bidimensional que descreve a caótica superfície do mar para todas direções de propagações de ondas com diferentes características. Seguindo a mesma ideia de antes, podemos transformar o espectro bidimensional de amplitude em espectro contínuo de densidade de variância $E(f, \theta)$:

$$E(f, \theta) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{\Delta \theta \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f \Delta \theta} \frac{1}{2} a_i^2, \quad (1.9)$$

que pode ser escrito em termos de ω com

$$E(\omega, \theta) = \frac{1}{2\pi} E(f, \theta) \quad (1.10)$$

A Figura 1.3 é um exemplo de como observar o estado de mar para um ponto no oceano através do espectro de onda. No espectro bidimensional $E(f, \theta)$ (*two-dimensional spectrum*) podemos ver que existe dois tipos de ondas, *wind sea* e *swell*. A energia do *swell* se concentra numa banda de frequência f baixas e direções θ mais restritas, pois não esta mais sobre a influência do vento que a gerou e teve tempo de se organizar conforme foi se avastandado da zona de geração (Eq.1.1). Por outro lado, o *wind sea*, que ainda esta sob influência do vento apresenta sua energia distribuida sobre uma banda mais larga de frequências f (altas frequências) e direção θ . Semelhantemente, podemos representar as características do mar com o espectro unidirecional $E(f)$ (*one-dimensional spectrum*) através da seguinte equação

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (1.11)$$

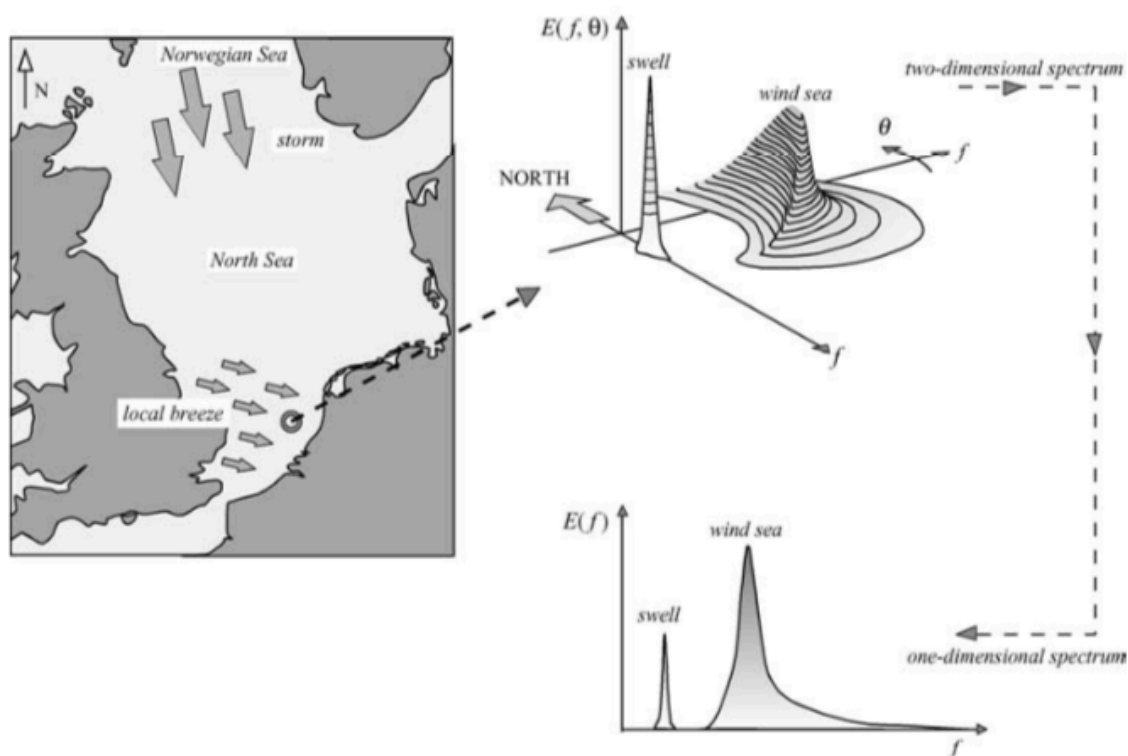


Figura 1.3: Análise do espectro de onda para o Mar do Norte quando um *swell* de norte formado na região mais ao norte se encontra com uma *wind sea* de leste próximo a costa da Holanda. Adaptado de Holthuijsen (2010).

1.3.2 Parametrizações do espectro

Pierson e Moskowitz (1964) e Hasselmann et al. (1973) investigaram, através de observações, a transferência de energia dos ventos para superfície oceânica. Em particular, Pierson e Moskowitz (1964) consideraram em seu experimento a atuação do vento de forma constante por uma grande área do Atlântico Norte, ou seja, para uma pista de vento ilimitado. Dessa forma, analisaram a evolução do espectro para um mar completamente desenvolvido para situações onde os ventos sopraram ininterruptamente entre 20 e 40 knots (10.3 e 20.58 m/sec, Fig. 1.4 gráfico esquerdo). Em seguida, eles propuseram a seguinte fórmula para descrever o espectro de onda em função da velocidade do vento em oceano profundo.

$$E_{\text{Pierson-Moskowitz}}(f) = \frac{\alpha_p g^2}{(2\pi)^2 f^5} e^{-0.74 \left(\frac{g}{2\pi U f}\right)^4}, \quad (1.12)$$

onde α_p representa a escala de energia adimensional de valor constante igual a 0.0081, U é a velocidade do vento à 19.5 m e g é aceleração da gravidade.

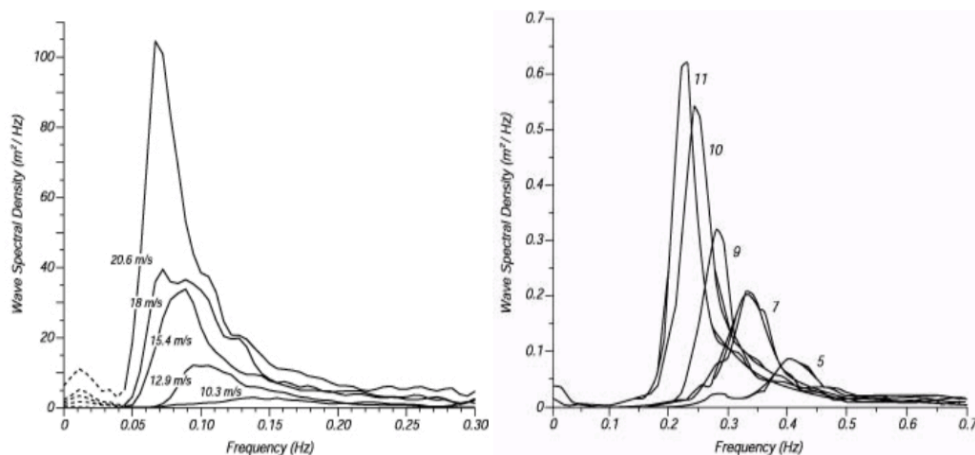


Figura 1.4: O gráfico a esquerda representa o espectro de ondas totalmente desenvolvido proposto por Pierson e Moskowitz (1964) para cada velocidade do vento. Enquanto o gráfico a direita representa a evolução do espectro de onda para área limitada no mar proposto por Hasselmann et al. (1973).

Mais tarde, Hasselmann et al. (1973), trabalhando no *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP), descobriram que o estado de mar nunca está totalmente desenvolvido. Portanto, o espectro de ondas continua a se desenvolver por interações não-lineares onda-onda, mesmo quando as ondas já não estão sobre a influência do vento que as geraram (Fig. 1.4 gráfico direito). Eles assim, propuseram uma parametrização

do espectro na forma

$$E_{\text{JONSWAP}}(f) = \frac{\alpha_p g^2}{(2\pi)^2 f^5} e^{-1.25(\frac{f}{f_p})^4} \gamma R \quad (1.13)$$

onde

$$R = e^{\left(\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right)}. \quad (1.14)$$

Portando γ é adicionado na parametrização do espectro a fim de ajustar o pico de energia do espectro; ele acaba funcionando com intensificador de pico. O parâmetro σ representa a largura de espalhamento do espectro, sendo $\sigma = \sigma_a$ para $f \leq f_p$ e $\sigma = \sigma_b$ para $f > f_p$. A relação entre os espectros JONSWAP e Pierson-Moskowitz pode ser observada na figura 1.5.

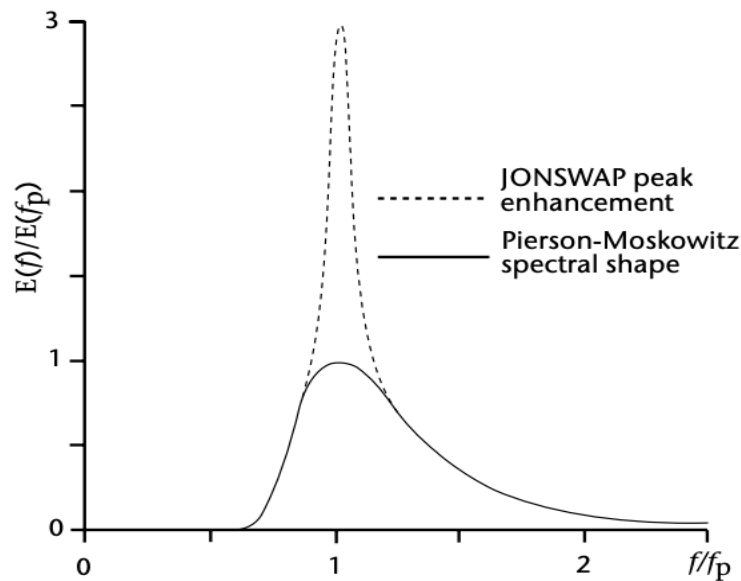


Figura 1.5: Diferença entre o espectro JONSWAP e Pierson-Moskowitz quando multiplicado por γ . Adaptado por Bouws et al. (1998)

1.3.3 Distribuição direcional e parâmetros integrados

Podemos pensar em uma distribuição de energia $D(\theta)$ através do conceito de largura direcional (Fig. 1.6) e defini-la como (Young, 1999):

$$D(\theta) = \frac{E(f, \theta)}{E(f)} \quad (1.15)$$

Outra forma de representar as características do estado de mar é por meio dos parâmetros integrados. Os mais conhecidos e usados são altura significativa (H_s),

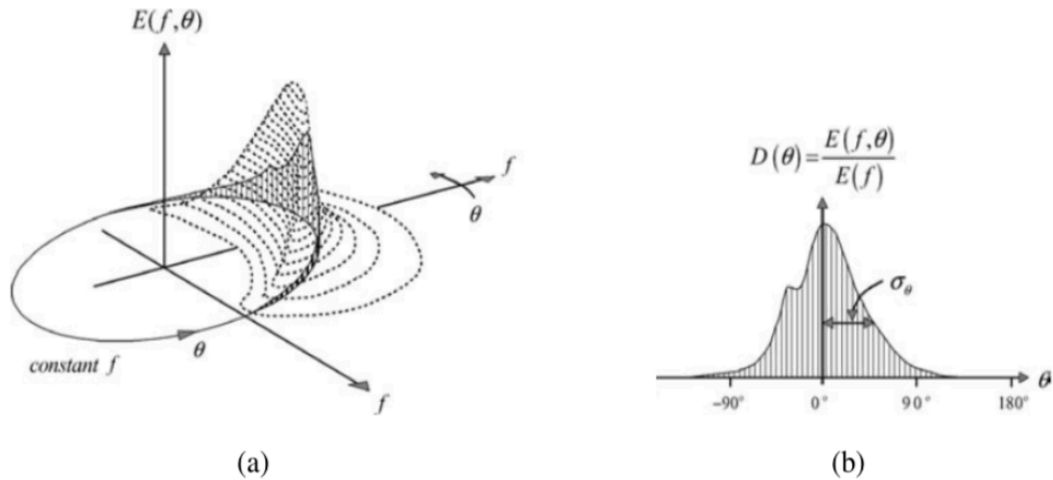


Figura 1.6: a) Espectro bidimensional. b) Representação da distribuição de direção para uma frequência constante. Adaptado de Holthuijsen (2010).

Período de pico (T_p) e Direção de pico (D_p). Todos eles, são obtidos através espectro de onda ($E(f, \theta)$), como abaixo.

Altura significativa (H_s)

H_s definido como terço maior das alturas das ondas e é estimado através da integral do espectro de densidade de energia:

$$H_s = 4 \sqrt{\int \int E(f, \theta) df d\theta}. \quad (1.16)$$

Período de pico (T_p)

T_p representa o período de onda onde o espectro é máximo é calculado pelo inverso da frequência de pico (f_p).

$$T_p = \frac{1}{f_p}. \quad (1.17)$$

Direção de pico (D_p)

D_p representa a direção de propagação para as componentes de ondas com maior energia e é dado em graus ou radianos.

1.3.4 Equação de balanço de ação

A evolução do espectro de onda é descrita nos modelos de previsões de onda por meio da equação de balanço de ação. Modelos de ondas como WaveWatch-III, SWAN, WAM e outros descrevem a propagação ou evolução da densidade de energia para

cada componente da onda no domínio de f e θ . Esta equação é resolvida pelo espectro de densidade de ação de onda bidimensional $N(\sigma, \theta, \phi, \lambda, t)$ que é uma função da frequência angular relativa σ , direção da onda θ , latitude ϕ , longitude λ e tempo t . O espectro de densidade de ação é definido como espectro de densidade de energia $E(\sigma, \theta, \phi, \lambda, t)$ dividido pela frequência angular relativa estimada por um referencial em movimento com as correntes oceânicas, ou seja, $N(\sigma, \theta, \phi, \lambda, t) = E(\sigma, \theta, \phi, \lambda, t)/\sigma$. Diante disso as propriedades da onda são conservadas no espectro de densidade de ação para casos de variação da profundidade e da corrente no tempo, enquanto que o espectro de energia não (Tolman et al., 2002). A equação do balanço espectral de densidade de ação de ondas em coordenadas esféricas e dada como (Holthuijsen, 2010)

$$\frac{d}{dt}N + \frac{1}{\cos\phi} \frac{d}{d\phi}(c_\phi \cos\phi N) + \frac{d}{d\lambda}(c_\lambda N) + \frac{d}{d\sigma}(c_\sigma N) + \frac{d}{d\theta}(c_\theta N) = \frac{S}{\sigma}, \quad (1.18)$$

onde

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{tr} + S_{ds} + S_{bf} + S_{br}. \quad (1.19)$$

O primeiro termo à esquerda da equação (1.18) representa a variação do espectro no tempo, o segundo e o terceiro termos, a propagação do espectro de ação no espaço geográfico com velocidades c_ϕ e c_λ para as respectivas latitudes e longitudes. O quarto termo representa transformação da frequência relativa devido à mudança de profundidade e corrente (com velocidade c_σ no espaço σ) e o quinto termo descreve a refração induzida pela batimetria e corrente, com velocidade de propagação c_θ no espaço θ . O termo $S = S(\sigma, \theta, \phi, \lambda, t)$ à direita da equação representa a fonte geradora e dissipadora expressa em densidade de energia. Portanto, a soma dos termos fonte representa o efeito gerador do vento (S_{in}), a interação não-linear ondas, quadrupletos (S_{nl}) e tripletos (S_{tr}), a dissipação por *whitecapping* (S_{ds}), o atrito com o fundo (S_{df}), e a quebra da onda induzida pela profundidade (S_{br}).

Bibliografia

- Booij, N., Ris, R. C. & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666.
- Bouws, E., Draper, L., Shearman, E., Laing, A., Feit, D., Mass, W., Eide, L., Francis, P., Carter, D. & Battjes, J. (1998). Guide to Wave analysis and forecasting. WMO-No. 702. *World Meteorological Organization*.
- Bunney, C. & Saulter, A. (2015). An ensemble forecast system for prediction of Atlantic–UK wind waves. *Ocean Modelling*, 96, 103–116.
- Candella, R. N. (1997). Estudo de casos de ondas no Atlântico Sul através de modelagem numérica. *Rio de Janeiro*, 93.
- Cecilio, R. & Dillenburg, S. (2020). An ocean wind-wave climatology for the Southern Brazilian Shelf. Part I: Problem presentation and model validation. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 89, 101101.
- Durrant, T., Hemer, M., Trenham, C. & Greenslade, D. (2013). CAWCR wave hindcast extension jan 2011-may 2013. v4. *Data Collection, CSIRO*.
- Farina, L. (2002). On ensemble prediction of ocean waves. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 54(2), 148–158.
- Guimarães, P., Farina, L. & Toldo Jr, E. (2014). Analysis of extreme wave events on the southern coast of Brazil. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(12), 3195–3205.
- Hasselmann, k., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselman, D., Kruseman, P. et al. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft 8-12*.

- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D. et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
- Holthuijsen, L. H. (2010). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge university press.
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. & Janssen, P. (1996). *Dynamics and modelling of ocean waves*.
- Melo, E. (1993). The Sea Sentinels project: watching waves in Brazil. *Coastal Zone'93*, 505–517.
- Osinski, R. D. & Radtke, H. (2020). Ensemble hindcasting of wind and wave conditions with WRF and Wavewatch III® driven by ERA5. *Ocean Science*, 16(2), 355–355.
- Pierson, W. J. & Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii. *Journal of geophysical research*, 69(24), 5181–5190.
- Short, A. D. & Klein, A. H. d. F. (2016). *Brazilian beach systems* (Vol. 17). Springer.
- Siadatmousavi, S. M., Jose, F. & da Silva, G. M. (2016). Sensitivity of a third generation wave model to wind and boundary condition sources and model physics: A case study from the South Atlantic Ocean off Brazil coast. *Computers & Geosciences*, 90, 57–65.
- Tolman, H. L., Balasubramaniyan, B., Burroughs, L. D., Chalikov, D. V., Chao, Y. Y., Chen, H. S. & Gerald, V. M. (2002). Development and implementation of wind-generated ocean surface wave Modelsat NCEP. *Weather and forecasting*, 17(2), 311–333.
- Young, I. R. (1999). *Wind generated ocean waves*. Elsevier.

Assessing wind datasets and boundary conditions for wave hindcasting in the Southern Brazil nearshore

Nícolas de A. Bose¹, Marília S. Ramos¹, Gustavo S. Correia¹, Claus W. Sidelles¹, Leandro Farina^{1,2}, Claudia K. Parise³, João L. Nicolodi⁴

Abstract

This work investigates the sensitivity of the SWAN wave model with respect to state-of-the-art wave and wind datasets. The wave model was implemented and validated for the southern Brazilian nearshore environment and simulated for the year of 2015. Nine combinations of wave and wind datasets have been considered, aiming at establishing the boundary conditions and atmospheric forcing which best reproduce windsea and swell systems. The wave model results have been validated comparing against two buoys deployed in deep water and one buoy in shallow water. Bulk wave parameters such as significant wave height H_s , mean wave direction D_m and peak wave period T_p have been computed and compared. Overall, the performance of the SWAN wave model satisfactorily reproduce the distinct waves fields for all wind and wave databases. However, the combination of datasets that best represents the ocean waves in the region is the ERA5 winds with the CAWCR wave boundary conditions.

Keywords— Ocean wave, Wave modelling, Database analysis, Southern Brazil nearshore

¹Institute of Geosciences, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil

²Institute of Mathematics and Statistics, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil

³Laboratory for Climate Studies and Modelling, Department of Oceanography and Limnology, Federal University of Maranhão, São Luís, MA, Brazil

⁴Institute of Oceanography, Federal University of Rio Grande, Rio Grande, RS, Brazil

17 **2.1 Introduction**

18 Numerical wave models are a tool of great importance to mitigate the risks associated
19 with severe sea conditions, being of interest of authorities as it provides subsidies for
20 better coastal management, industrial offshore activities and for navigation and popu-
21 lation safety. In general, meteorological and oceanographic forecasting centres use
22 wave models to provide information on ocean wave conditions for different sectors of
23 society. Some forecasting centres provide services of great importance to oil and gas
24 extraction companies in the continental shelf region, while others provide information
25 to port operations and navigation. Furthermore, ocean wave forecasting can be used
26 to describe the coastal dynamics as well as to issue early alarms for potential wave
27 hazards and coastal inundation.

28 A crucial component in wave forecasting is the representation of extreme events.
29 The lack of information about the efficiency of different wind and wave datasets used as
30 forcing parameters for wave forecasting in southern Brazil can lead to under-performance
31 of wave models, making them unable to represent extreme events. Due to the growing
32 number of offshore activities that lead to coastal vulnerability in southern Brazil, the
33 development of accurate wave models have become necessary, especially to monitor
34 storm events. Wind and wave data serve as forcing and boundary conditions for regio-
35 nal wave models. In order to deliver a good wave prediction system, it is essential that
36 reliable surface wind fields (at 10 m height) and wave conditions are available. Errors
37 embedded in the wind or wave fields are sufficient to generate uncertain sea states
38 which will evolve and remain in time (Farina, 2002). Also, it is important - for coastal
39 ocean models - to take into account the morphological aspect of the ocean bottom. The
40 nearshore environment across the south Brazilian shelf comprehend a combination of
41 broad and gradual sloping shelves (lower refraction) and very narrow and steep shel-
42 ves (higher refraction) that should be accounted, for instance, varying from 0.06° - 5.00°
43 along nearshore zone (Short e Klein, 2016).

44 Regarding ocean modelling for the south Brazilian nearshore zone, only a few
45 published works address the impact of different databases in wave modelling and pre-
46 diction (Cecilio e Dillenburg, 2020; Guimarães et al., 2014; Lima et al., 2020; Siadat-
47 mousavi et al., 2016). Guimarães et al. (2014) investigate extreme waves events on
48 the Southern coast of Brazil in a 10 years period, using the SWAN wave model. Sia-
49 datmousavi et al. (2016) assess the performance of a third-generation wave model in

50 Santa Catarina under different wave and wind conditions. The wind datasets evalua-
51 ted in that work were the GROW-Fine SAM (developed by Oceanweather Inc.) and the
52 ERA-Interim reanalyses (developed by ECMWF). The wave boundary conditions were
53 set with directional wave spectra from GROW-Fine simulation and from WaveWatch III.
54 As a result, they found that both wind forcing and wave boundary data from GROW-Fine
55 outperform the ECMWF ERA-Interim winds with WaveWatch III wave boundary condi-
56 tions. Further, Cecilio e Dillenburg (2020) implemented the SWAN wave model nested
57 with WaveWatch III model to analyse the wind and wave climatology in the Southern
58 Brazil nearshore.

59 Recently, Viitak et al. (2020) assessed the performance of the wave model
60 SWAN for the NW Iberian Peninsula coast, under six distinct datasets of wind fields,
61 mixing older and up-to-date sets.

62 This study aims to investigate and validate ensemble of wind and wave boun-
63 dary datasets for the Southern Brazilian coast, using the wave model SWAN. Thereby,
64 we selected the current reanalysis data, publicly available by three operational centres,
65 namely, ECMWF-ERA5 in Europe, NCEP/WW3 in USA and CSIRO in Australia, for the
66 year 2015 to carry out the experiments. Moreover, each of the three wind and wave da-
67 tabases were cross validated, summing nine distinct combinations of conditions. This
68 paper is structured as follows: in Section 2, the methodology is introduced; in Section
69 3, the results are presented. Section 4 discusses the results while the conclusions of
70 the study are presented in Section 5.

71 **2.2 Methodology**

72 **2.2.1 Study area**

73 The study area encompasses the nearshore zone between Uruguay and Paraná state
74 (Brazil) waters in the Subtropical Atlantic Ocean, as shown in Figure 2.1. Both Uruguay
75 and the south of the Brazilian shelves present a wide (100–200 km), shallow (100–200
76 m) and gentle slope (Alonso et al., 2015; Dillenburg et al., 2004). Their coastline do-
77 main presents changes in orientation and in morphological characteristics, where the
78 southernmost portion is characterised by an extensive, uniform and undulating sand
79 beach coastline with a SW-NE orientation (Dillenburg et al., 2004). In contrast, the
80 northernmost portion has a SE-NW orientation and presents different morphology fea-
81 tures, including enclosed bays, small islands, promontories and sand beaches (Short

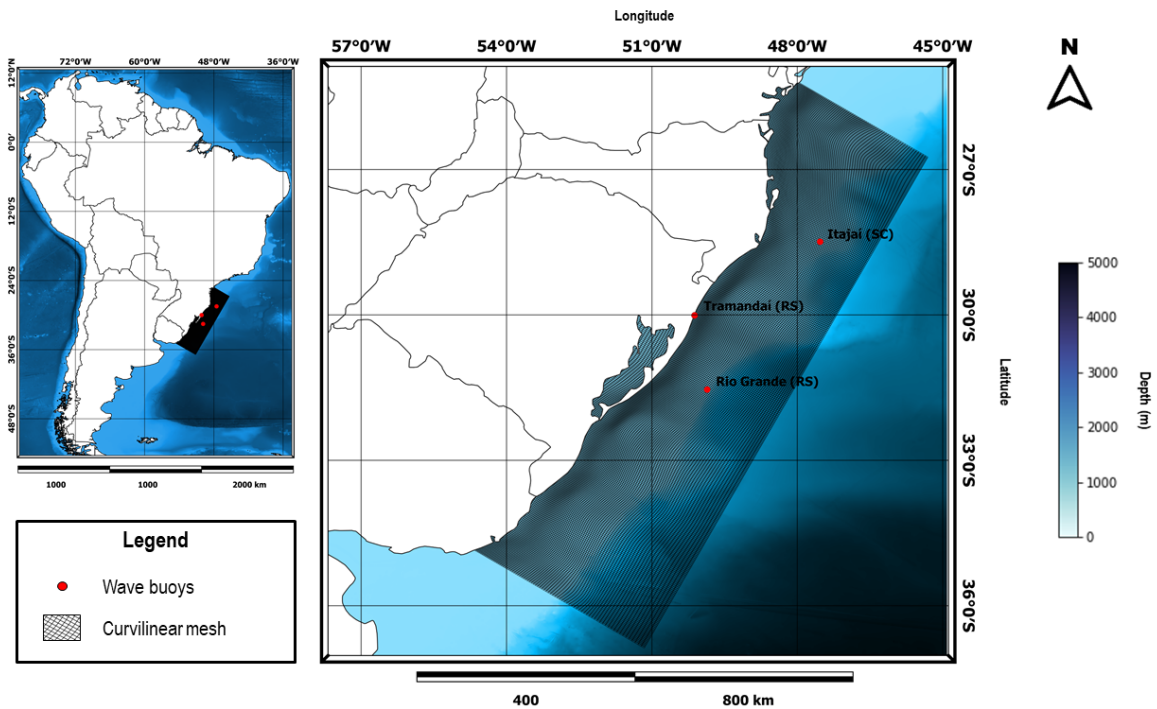


Figure 2.1: Map of the study area referring to the oceanic region of southern Brazil and Uruguay. Red dots correspond to wave buoys (i.e., Tramandaí, Itajaí and Rio Grande). Curvilinear grid spacing ranges from 72 to 180 arc-seconds. Bathymetry extracted from GEBCO database reaches up to 5000 m at a 15 arc-second interval.

82 e Klein, 2016).

83 The most energetic wave systems found in the region are those associated
 84 with the extra-tropical cyclone season which occur during the austral autumn and winter
 85 periods (Guimarães et al., 2014). During a storm event in 2006, maximum wave height
 86 over 9 m was recorded, with wave period of 12-14 seconds from E-SE. Further, Cecilio e
 87 Dillenburg (2020) identified a gradient of wave energy between the Cape Santa Marta
 88 (Santa Catarina state, 28.6°S) and the Cape Polonio (Uruguay, 34.4°S). The authors
 89 suggested that the asymmetry in wave energy is due to the shelf morphology, indicating
 90 a vigorous wave refraction process.

91 2.2.2 The wave model setup

92 Wave modelling was performed by running a third-generation wave model developed
 93 by Delft University of Technology: SWAN (Simulating Waves Nearshore) model version
 94 number 41.31 (Booij et al., 1999). This model describes waves governed by the two-
 95 dimensional wave action density spectrum, even when nonlinear phenomena dominate
 96 (e.g., in the surf zone), for obtaining realistic estimates of wave parameters in coastal

97 areas, lakes, and estuaries from given wind, bottom, and current conditions (Booij et
98 al., 1999; Ris et al., 1999; SWAN et al., 2020).

99 It is possible to predict with reasonable accuracy the spectral distribution of the
100 second-order moment of the waves even under nonlinear conditions. In the presence of
101 ocean currents, the action density is conserved whereas energy density is not. Thus,
102 the action density spectrum $N(\mathbf{x}, \sigma, \theta, t)$ is considered rather than the energy density
103 spectrum $E(\mathbf{x}, \sigma, \theta, t)$. The independent variables are the \mathbf{x} , defined on a physical water
104 domain D , the relative frequency σ , observed in a frame of reference moving with the
105 current velocity, the wave direction θ , the direction normal to the wave crest of each
106 spectral component and $t \in \mathcal{T}$, over a period of time \mathcal{T} . The action density is equal to
107 the energy density divided by this relative frequency, $N = E/\sigma$.

108 The governing equation of SWAN, in the absence of current, is given as the
109 wave balance equation

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\mathbf{x}} \cdot (\mathbf{c}_{\mathbf{g}} N) + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = S_{tot}/\sigma, \quad (2.1)$$

110 where $\mathbf{c}_{\mathbf{g}}$ is the group velocity vector, c_{σ} and c_{θ} are the propagation velocities in spectral
111 space (σ, θ) and $S_{tot} = S_{tot}(E, \mathbf{u})$ is the non-conservative total source/sink term that
112 represents physical processes which generate, dissipate, or redistribute wave energy,
113 by nonlinear resonant interactions, at a point. $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ is the surface wind vector.
114 See SWAN et al. (2020) and Leo H Holthuijsen (2010) for further details. The ordinary
115 frequency, measured in hertz, is given by $f = \sigma/2\pi$.

116 Simulations were performed on a curvilinear grid (Figure 2.1) built using the
117 Delft3D RGFGRID software (RGFGRID, 2018). The grid was developed to cover the
118 continental shelf and the oceanic region adjacent to southern Brazil and part of Uruguay,
119 with grid spacing ranging between 0.02° (close to the coastline) and 0.05° (offshore).
120 The spatial resolution used in the curvilinear grid is acceptable for deep and shallow
121 water environment as suggested by (Cavaleri et al., 2007).

122 The numerical grid and physical parameters are the same for the all experi-
123 ments. We provide, in table 2.1, the physics and numerical parameters used in our
124 SWAN runs.

125 The bottom conditions used in the model were the product of the interpolation
126 of three bathymetric databases; one of which, global and two regional ones. The glo-
127 bal database used was the General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO, 2019).
128 This is a continuous, global terrain model for ocean and land, with a spatial resolution

Tabela 2.1: SWAN physics, numerical configuration, and the computational grid information.

Run Model	NonStationary	
Time Step	15 min	
Frequency bins	24	0.05-1.0 hertz
Directional space	36	10°-360°
Number of experiments	9	
Spin up period	5 day previous	
Physical parameters		
	Gen3	Komen
	WindGrowth	Activated
	Quadrupled wave-wave interaction	Full explicit peer sweep
	Triad wava-wave interaction	Activated
	Friction	JONSWAP
	WhiteCapping	Komen
	Depth induced breaking	Constant 1.0 0.73
	Propagation scheme	BSBT
	Number of interaction	15
Numerical Grid		
	Class	curvilinear grid
	Spacing	0.02°-0.05°
	Wind forcing	CAWCR, ERA5 & NCEP/WW3
	Wave boundary	CAWCR, ERA5 & NCEP/WW3
	Bathymetric	GEBCO, Pinho (2015) & SMC-Brazil

129 of 15 arc-seconds. The grid is based on a fusion of land topography with measured
 130 and estimated seafloor topography, obtained from satellite data (i.e., SRTM15+ and
 131 SRTM30+). This dataset is augmented with the gridded bathymetric data sets develo-
 132 ped by the four Seabed 2030 Regional Centers. The published data were recalculated
 133 on a cell-registered grid for use by GEBCO. The main geological features of the Pello-
 134 tas Basin (e.g., Valleys of Rio Grande, Cone of Rio Grande, Terrace of Rio Grande and
 135 Terrace of Florianópolis) were generated by Pinho (2015) from the integration of acous-
 136 tic data and satellite altimetry. The echosound SIMRAD EK500 was used to capture
 137 these acoustic data, operating at a frequency of 38 kHz, on board scientific cruises,
 138 with varying spacing between transects (on average 20 m). The third bathymetric da-
 139 tabase used was obtained from the SMC-Brazil Project. The data from this base were
 140 divided into three sectors (i.e., North, Central and South) according to the tidal range
 141 of the Brazilian coast, as proposed by Vellozo e A. Alves (2005). For the Southern
 142 sector, 43 maple leaves (from research carried out in partnership between Bampetro,
 143 the Hydrography Center of the Navy and the University of the State of Sao Paulo) and

144 43 nautical charts from the Directorate of Hydrography and Navigation of the Brazilian
145 Navy (DHN) that best represented the region were selected. These were edited in such
146 a way that there is no overlapping of charts and/or maple leaves in the common areas
147 between them, thus avoiding data interpolation errors. Letters or sheets with greater
148 detail of the area were always kept. The data have the WGS84 horizontal datum and
149 DHN vertical datum.

150 All bathymetric data were input at the Delft3D QUICKIN (RGFGRID, 2018) soft-
151 ware and interpolated at the points of the curvilinear grid using the grid cell averaging
152 method, with a spherical coordinate system.

153 **2.2.3 Wind datasets**

154 The 10 m height wind field is the main driving force of ocean surface gravity waves.
155 The use of accurate wind fields in wave modelling is crucial so the model output does
156 not inherit uncertainties from the atmospheric model, which may prompt to inaccurate
157 wave forecast. In this study, the surface wind fields used to force the SWAN model
158 were acquired from three different atmospheric databases: (1) Climate Forecast Sys-
159 tem Reanalysis (CFSR), obtained from the Centre of Australian Weather and Climate
160 Range (CAWCR) wave hindcast, (2) ERA5 reanalysis (ERA5), and (3) Global Forecast
161 System Analysis (GFS-ANL), obtained from the WaveWatch III v6.07 (WW3) dataset.
162 See details of these datasets at Table 2.2.

163 The CAWCR wave hindcast is provided by CSIRO (Commonwealth Scientific
164 and Industrial Research Organisation) with NCEP CFSR surface wind data on a 0.4° re-
165 gular grid spacing and hourly temporal resolution. Wind field data from Global Forecast
166 System (GFS), provided by the National Centers for Environmental Prediction (NCEP),
167 is characterized by 0.5° grid spacing and 3-hour temporal resolution. The ERA5 rea-
168 nalysis, developed by the Copernicus Climate Change Service and processed by the
169 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), supplies wind fi-
170 elds hourly with a 0.25° grid cell size. Furthermore, the atmospheric reanalysis product
171 is enhanced by using the state-of-art data assimilation technique 4D-Var (Hersbach et
172 al., 2020). All datasets above include the time period of 1979-present.

Tabela 2.2: Wind dataset characteristics

Dataset	Temporal resolution	Spatial resolution	Time coverage
CAWCR Wave hindcast	1 h	$0.40^\circ \times 0.40^\circ$	1979-present
ERA5 reanalysis	1 h	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	1979-present
GFS-ANL	3 h	$0.50^\circ \times 0.50^\circ$	1979-present

173 2.2.4 Wave boundary condition datasets

174 In order to obtain a reliable wave simulation in a nearshore zone, an accurate wave
 175 dataset as boundary condition could be even more important than good quality wind
 176 forcings (Viitak et al., 2020). Our wave boundary data were also obtained from (1)
 177 CAWCR Wave Hindcast, (2) ERA5 reanalysis, and (3) WaveWatch III v6.07 datasets.
 178 Wave spectra were calculated from the wave partitions provided by CAWRC, by ap-
 179 plying the JONSWAP spectrum parametrization. The wave spectra are discretised over
 180 25 frequencies and 36 directions with 10° directional resolution. For the WaveWatch III
 181 and ERA5 datasets, spectra were not calculated, as only bulk wave parameters were
 182 selected. Table 2.3 shows the databases details for wave boundary conditions.

183 CAWCR wave outputs product gridded with 0.4° spatial resolution and hourly
 184 temporal was estimated by using WaveWatch III wave model. Four wave partitions are
 185 available, one partition for windsea and three partitions for swell. They provide infor-
 186 mation regarding the following bulk parameters: significant wave height, mean wave
 187 direction, peak wave period and directional spreading which were then used to recons-
 188 truct the directional wave spectra.

189 ERA5 wave data is available hourly with a 0.5° grid spacing using WAM wave
 190 model. Significant wave height, mean wave period and mean wave direction were used
 191 to generate the wave boundary conditions.

192 The spectral wave model WaveWatch III Multigrid Production (Tolman et al., 2009)
 193 operated by NCEP, generates wave parameters as model output. The bulk wave pa-
 194 rameters cover the entire globe with $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ grid spacing and a temporal resolution
 195 of 1 hours.

Tabela 2.3: Wave dataset characteristics

Dataset	Temporal resolution	Spatial resolution	Input format
CAWCR Wave hindcast	1 h	$0.40^\circ \times 0.40^\circ$	Directional wave spectrum
ERA5 reanalysis	1 h	$0.50^\circ \times 0.50^\circ$	bulk parameters
WaveWatch III	1 h	$0.50^\circ \times 0.50^\circ$	bulk parameters

196 2.2.5 Observational data

197 In situ buoys

198 We selected three wave buoys (Figure 2.1, Table 2.4) for validating the model outputs.
 199 The data from Rio Grande (RS) and Itajaí (SC) were obtained from the *Programa Nacio-*
 200 *nal de Boias* (PNBoia), measured using the directional wave sensor Triaxys™ equipped
 201 with three accelerometers and three angular sensors. These sensors allow to accura-
 202 tely measure acceleration in orthogonal axes x , y and z , as well as pitch, heave and roll
 203 movements (CHM, 2020). Tramandaí (RS) data were obtained from the *Rede Ondas*
 204 database measured by the AWAC equipment moored in shallow water. This equipment
 205 measures wave height and period using Acoustic Surface Tracking (AST). Wave direc-
 206 tion is calculated by combining AST and orbital velocity measurements in a matrix close
 207 to the surface (RedeOndas, 2020). All buoy record data are stored in 1-hour intervals.

208 Unfortunately, each wave buoy have different time coverage in different years.
 209 Therefore, we selected the year of 2015 because it provides the largest intersection
 210 among the three wave buoys available data. Rio Grande buoy presents the largest
 211 time series, including one whole year record (2015/01/01 to 2015/12/31), while Itajaí
 212 buoy has data in the period 2015/01/01 to 2015/10/29. The bouy of Tramadaí presents
 213 only five months of records (2015/01/01 to 2015/05/31). However, for all buoys there
 214 are glitches for some periods due to buoy repairs. The parameter N in Table 2.4 stands
 215 for the number of data acquisitions.

Tabela 2.4: Coordinates, depth of anchoring and distance from the coast of the wave buoys used for the validation.

Wave Buoy	Latitude (S)	Longitude (W)	Depth	Distance from the coast	N
Tramandaí - RS	30° 00' 39"	51° 07' 12"	11 m	1.2 km	1726
Rio Grande - RS	31° 36' 00"	49° 54' 00"	200 m	100 km	7319
Itajai - SC	28° 30' 36"	47° 23' 24"	200 m	113 km	4247

216 2.2.6 Validation

217 We have filtered out outliers arisen due to measurement errors, by using the k-Nearest
 218 Neighbours algorithm from the PyOD python toolbox (Zhao et al., 2019). In Table 2.5
 219 we present an analysis of the bouys data over the entire period of their data availabi-
 220 lity, namely Itajaí, 2009–2019; Tramandaí, 2014–2016 and Rio Grande, 2009–2019.
 221 We observe that the buoy of Itajaí presents noticeably more erroneous measurements
 222 when compared to the other two bouys.

Tabela 2.5: Summary statistics of the three bouys measurements before and after the retrieval of outliers. The labels mean, std, min, max stand for the mean value, standard deviation, minimum and maximum value, respectively.

Wave buoy	Variable	Before retrieval of outliers			After retrieval of outliers			% outliers
		H_s	T_p	D_p	H_s	T_p	D_p	
Itajaí	# observations	28810	28810	28810	24629	24629	24629	14.5%
	mean	2.66	11.7	138.86	1.98	9.48	124.74	
	std	3.51	6.44	79.58	0.69	2.32	59.51	
	min	0	0	0	0.65	4	0	
	max	20.47	33.3	381	5.31	16.7	359	
Tramandaí	# observations	1764	1764	1764	1727	1727	1727	2.1%
	mean	1.32	9.13	108.3	1.32	9.1	108.25	
	std	0.71	2.12	18.79	0.54	2.09	18.73	
	min	-9	3.84	49.51	0.41	4.01	49.51	
	max	4.14	15.11	178.98	3.94	14.32	178.98	
Rio Grande	# observations	35674	35674	35674	35082	35082	35082	1.6%
	mean	2.21	9.1	123.59	2.13	9.06	122.67	
	std	1.24	2.38	57.52	0.79	2.23	56.17	
	min	0	0	0	0.57	3.5	0	
	max	20.47	25.5	381	5.92	16.8	359	

223 To evaluate the SWAN model performance among different wind fields and
 224 wave boundary conditions, we select three bulk wave parameters: significant wave
 225 height H_s , mean wave direction D_m and peak wave period T_p . We compared the output
 226 from the nine SWAN runs with buoy measurements by goodness-of-fit tests by using
 227 Mean Bias Error (MBE), Pearson correlation coefficient r , Root Mean Square Error
 228 (RMSE) and non-dimensional Scatter Index (SI).

229 Since the time window between the bouys varies, we selected two storm events
 230 that were recorded on all bouys for the period of May 2015 to analyse the time series.

231 **2.3 Results**

232 **2.3.1 Wind and wave boundary database performance**

233 **2.3.1.1 Significant wave height**

234 We present statistical results for H_s in Table 2.6 and time series in Figure 2.2. A small
235 difference in H_s magnitude is reproduced when using different combinations of data-
236 bases. Depending on the location, the wave model results are either overestimated or
237 underestimated. For deep water locations such as at Rio Grande and Itajaí, all dataset
238 combinations return little underestimation, while for shallow water, at Tramandaí, the
239 results are largely overestimated, which leads to a large RMSE. The best set for H_s
240 at Rio Grande - which represents the southernmost portion of the numerical grid - is
241 obtained with ERA5 winds and CAWCR wave boundary conditions. In this location, the
242 statistical results show a RMSE of 0.41 m, a correlation coefficient of 0.91 and a SI of
243 0.21. For the northernmost part of the numerical domain, represented by Itajaí, the best
244 set of database is likewise prescribed with ERA5 winds and CAWCR wave boundaries.
245 The results show a RMSE of 0.33 m, a SI of 0.18 and $r = 0.91$ (Table 2.6). However,
246 similar results are also achieved with GFS winds and CSIRO wave boundary.

247 On the contrary of previous regions, for the Tramandaí buoy, the best perfor-
248 mance is obtained with GFS winds and CAWCR wave boundary conditions. In this
249 location, statistical results return the lowest Bias (-0.58 m), a RMSE of 0.65 m, a SI of
250 0.35 and r coefficient of 0.86. Nonetheless, a close result is also obtained with ERA5
251 winds and CAWCR boundary data.

252 For all the three locations, CAWCR winds deliver the worst results indepen-
253 dently of the chosen wave boundary condition. The statistical analysis for all locations
254 present a RMSE that vary from 0.36 m to 0.82 m, SI from 0.19 to 0.40 and r coefficient
255 from 0.64 to 0.87.

Tabela 2.6: Statistical analysis for each ensemble database at buoy location for significant wave height. The most accurate database are marked in bold.

Significant wave height							
Location	Wind Database	Wave Database	Mean	MBE	SI	r	RMSE
RG-PNBOIA			2.13				
	ERA5	WW3	1.92	0.26	0.24	0.86	0.45
		CAWCR	1.92	0.29	0.21	0.91	0.41
		ERA5	2.00	0.13	0.22	0.83	0.44
	GFS	WW3	1.85	0.32	0.28	0.84	0.47
		CAWCR	1.85	0.35	0.25	0.89	0.46
		ERA5	0.93	0.20	0.26	0.81	0.48
	CAWCR	WW3	1.90	0.23	0.25	0.84	0.48
		CAWCR	1.91	0.22	0.23	0.88	0.44
		ERA5	1.82	0.29	0.37	0.64	0.67
ITJ-PNBOIA			2.0				
	ERA5	WW3	1.94	0.15	0.19	0.87	0.36
		CAWCR	1.87	0.16	0.18	0.91	0.33
		ERA5	2.00	0.00	0.17	0.86	0.35
	GFS	WW3	1.92	0.15	0.20	0.86	0.38
		CAWCR	1.85	0.17	0.19	0.90	0.34
		ERA5	1.99	0.01	0.18	0.85	0.36
	CAWCR	WW3	1.97	0.03	0.19	0.85	0.39
		CAWCR	1.90	0.10	0.20	0.88	0.36
		ERA5	1.93	0.07	0.24	0.76	0.46
TR-RedeOndas			1.31				
	ERA5	WW3	2.01	-0.70	0.39	0.83	0.79
		CAWCR	1.91	-0.60	0.35	0.86	0.67
		ERA5	2.07	-0.66	0.40	0.87	0.82
	GFS	WW3	1.99	-0.68	0.39	0.83	0.77
		CAWCR	1.89	-0.58	0.35	0.86	0.65
		ERA5	2.04	-0.73	0.39	0.87	0.80
	CAWCR	WW3	2.2	-0.89	0.39	0.83	0.79
		CAWCR	2.00	-0.69	0.35	0.86	0.68
		ERA5	2.07	-0.75	0.40	0.87	0.82

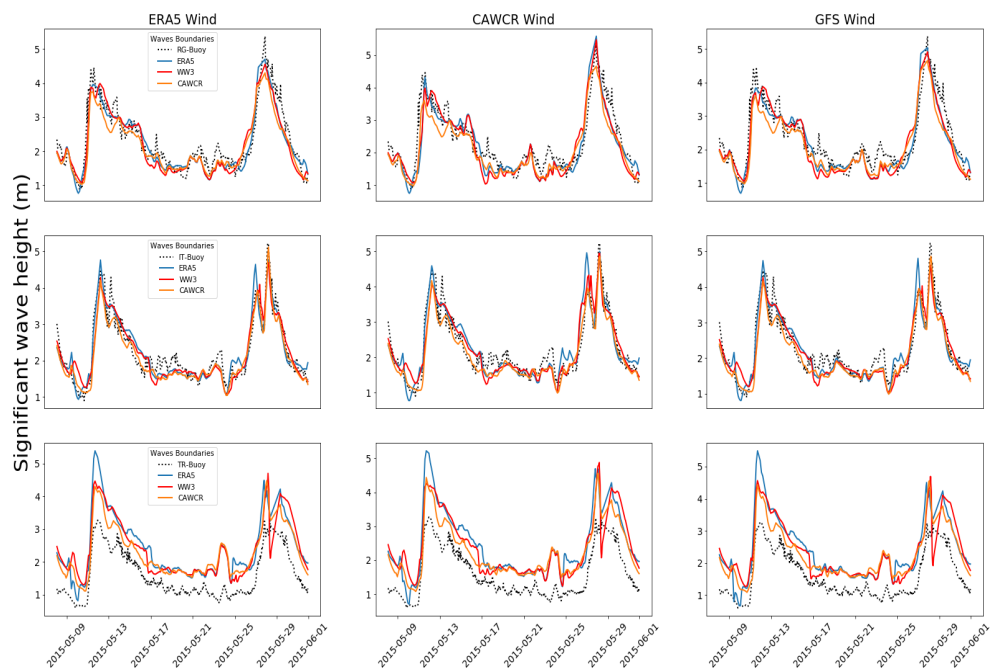


Figure 2.2: Time series of measured and modeled H_s for the period of May 2015. The subplots show the different wind databases along the columns and the buoys of Rio Grande (RG), Itajaí (IT) and Tramandaí (TR), over the rows, from the left to the right, respectively. SWAN simulations with different wave boundary conditions (ERA5, WW3 and CAWCR) are represented with solid colored lines, while buoy measurements are defined as black dotted-lines.

256 2.3.1.2 Mean wave direction

257 We show the statistical analysis for the mean wave direction on Table 2.7. Satisfac-
258 tory results are achieved for all database combinations; nonetheless, small variations
259 on statistical results indicate the best ensemble of wind and wave boundary condi-
260 tions for each region. Based on the location and combination of database, D_m can be
261 overestimated or underestimated (Figure 2.3).

262 The best set of databases at Rio Grande buoy location is represented by both
263 CAWCR winds and CAWCR wave boundary condition. The statistical results show a
264 RMSE of 28.13, a SI of 0.25 and a r coefficient of 0.87. Meanwhile, the wave model
265 performance also presents valid results when ERA5 winds and CAWCR wave data are
266 used. For other databases, the RMSE is in the range 29.37 – 42.39 and the r coefficient
267 varies in 0.60 – 0.85.

268 For the Itjaí location, the best set of databases is the combination of ERA5
269 winds with CAWCR boundary condition. The statistical analysis demonstrates a RMSE
270 of 40.26, a SI of 0.35 and a r coefficient of 0.79. However, these results are just slightly
271 better than those with the combination of GFS or CAWCR winds with CAWCR wave
272 data. Similarly to H_s , the numerical wave model best performance for D_m at the Tra-
273 mandaí buoy is achieved when GFS winds and CAWCR wave data are used. In this
274 location, statistical results show a RMSE of 37.59, a SI of 0.35 and a r coefficient of
275 0.62.

Tabela 2.7: Statistical analysis for each ensemble database at buoy location for mean wave direction. The most accurate database are marked in bold.

Mean wave direction							
Location	Wind Database	Wave Database	Mean	MBE	SI	r	RMSE
RG-PNBOIA			121.14				
	ERA5	WW3	114.95	6.19	0.27	0.81	31.60
		CAWCR	111.39	9.75	0.26	0.85	29.37
	GFS	ERA5	116.61	4.53	0.27	0.80	32.55
		WW3	115.51	5.63	0.30	0.77	34.61
		CAWCR	111.89	9.25	0.27	0.84	30.11
	CAWCR	ERA5	117.10	4.04	0.29	0.77	34.11
		WW3	115.49	5.65	0.27	0.82	31.04
		CAWCR	111.83	9.31	0.25	0.87	28.13
		ERA5	125.34	-4.20	0.33	0.60	42.39
ITJ-PNBOIA			119.95				
	ERA5	WW3	125.87	-5.92	0.38	0.70	47.73
		CAWCR	115.65	4.30	0.35	0.79	40.26
		ERA5	119.80	0.10	0.37	0.72	46.00
	GFS	WW3	126.56	-6.61	0.39	0.68	48.98
		CAWCR	116.88	3.07	0.35	0.78	41.09
		ERA5	124.15	-4.20	0.39	0.71	47.00
	CAWCR	WW3	126.03	-6.03	0.38	0.69	48.32
		CAWCR	116.09	3.86	0.35	0.78	40.83
		ERA5	124.90	-4.85	0.38	0.76	47.36
TR-RedeOndas			107.13				
	ERA5	WW3	116.67	-9.54	0.44	0.60	51.27
		CAWCR	106.14	0.99	0.36	0.61	38.74
		ERA5	112.63	-0.96	0.42	0.64	47.72
	GFS	WW3	118.22	-11.09	0.44	0.60	51.59
		CAWCR	106.8	0.33	0.35	0.62	37.59
		ERA5	113.65	-6.43	0.42	0.65	47.62
	CAWCR	WW3	117.43	-10.30	0.44	0.59	52.18
		CAWCR	107.17	-0.04	0.37	0.60	39.53
		ERA5	113.56	-6.43	0.42	0.64	48.65

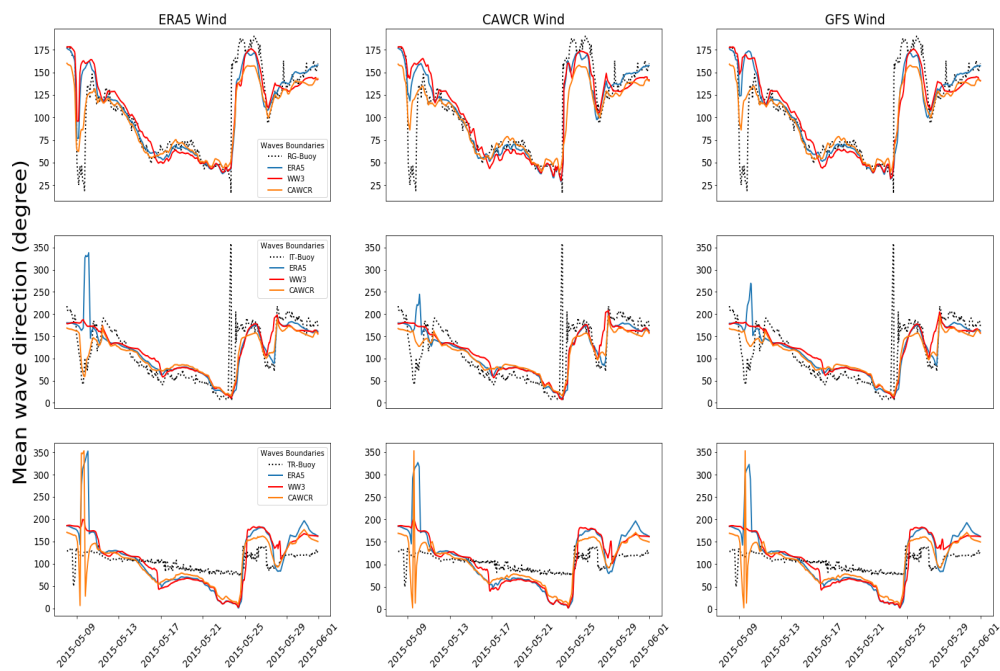


Figure 2.3: Time series of measured and modeled D_m for the period of May 2015. The subplots show the different wind databases along the columns and the buoys of Rio Grande (RG), Itajaí (IT) and Tramandaí (TR), over the rows, from the left to the right, respectively. SWAN simulations with different wave boundary conditions (ERA5, WW3 and CAWCR) are represented with solid colored lines, while buoy measurements are defined as black dotted-lines.

276 **2.3.1.3 Peak wave period**

277 In Table 2.8 and Figure 2.4 the numerical model results are presented. Overall, T_p is
 278 overestimated only for deep water locations and with ERA5 wave boundary data.

Tabela 2.8: Statistical analyses for each ensemble database at buoy location for peak wave period. The most accurate database are marked in bold

Peak wave period							
Location	Wind Database	Wave Database	Mean	Bias	SI	Cor	RMSE
RG-PNBOIA			9.03				
	ERA5	WW3	8.84	0.19	0.19	0.62	1.71
		CAWCR	8.88	0.15	0.18	0.69	1.56
		ERA5	9.24	-0.21	0.20	0.56	1.84
	GFS	WW3	8.91	0.12	0.20	0.60	1.77
		CAWCR	8.97	0.06	0.18	0.67	1.60
		ERA5	9.30	-0.27	0.20	0.56	1.87
	CAWCR	WW3	8.91	0.12	0.19	0.61	1.72
		CAWCR	8.97	0.06	0.18	0.68	1.58
		ERA5	9.27	-0.25	0.20	0.54	1.90
ITJ-PNBOIA			9.29				
	ERA5	WW3	8.99	0.30	0.21	0.60	1.87
		CAWCR	9.09	0.20	0.19	0.65	1.76
		ERA5	9.41	-0.12	0.18	0.64	1.77
	GFS	WW3	8.98	0.31	0.21	0.60	1.87
		CAWCR	9.17	0.12	0.19	0.65	1.76
		ERA5	9.42	-0.13	0.18	0.66	1.73
	CAWCR	WW3	8.99	0.30	0.21	0.60	1.87
		CAWCR	9.15	0.14	0.19	0.65	1.76
		ERA5	9.45	-0.16	0.20	0.69	1.77
TR-RedeOndas			9.08				
	ERA5	WW3	8.51	0.57	0.26	0.45	2.20
		CAWCR	8.86	0.22	0.23	0.52	2.05
		ERA5	9.05	0.03	0.22	0.52	1.98
	GFS	WW3	8.51	0.57	0.26	0.45	2.20
		CAWCR	8.87	0.23	0.23	0.51	2.08
		ERA5	9.07	0.01	0.22	0.54	1.99
	CAWCR	WW3	8.50	0.58	0.26	0.45	2.20
		CAWCR	8.87	0.23	0.23	0.51	2.07
		ERA5	9.05	0.03	0.22	0.55	1.99

279 The statistical results are very close, among the locations; therefore, the best
 280 performance presents little improvement. Alike H_s , at Rio Grande buoy, numerical
 281 wave model returns more accurate T_p with ERA5 winds and CAWCR wave boundary
 282 conditions. In this location, statistical results show a RMSE of 1.56 s, a SI of 0.18 and

283 r coefficient of 0.69. On the other hand, at Itajaí buoy, the best group of databases are
 284 represented by GFS winds and ERA5 wave boundaries. Statistical results demonstrate
 285 a RMSE of 1.73 s, a SI of 0.18, and a r coefficient of 0.66.

286 For shallow water, the best ensemble of databases are distinct from those for H_s
 287 and D_m . The finest results are reproduced with GFS winds and ERA5 wave boundaries
 288 at Tramandaí buoy. In this location, statistical results present a RMSE of 1.99 s, a SI
 289 of 0.22 and a r coefficient of 0.54.

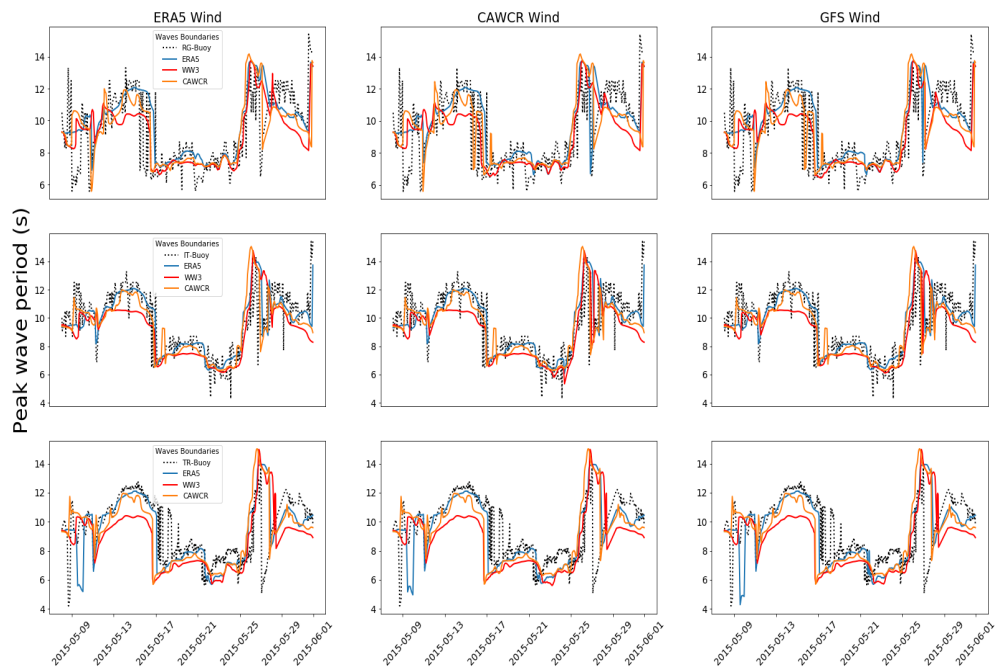


Figura 2.4: Time series of measured and modeled T_p for the period of May 2015. The subplots show the different wind databases along the columns and the buoys of Rio Grande (RG), Itajaí (IT) and Tramandaí (TR), over the rows, from the left to the right, respectively. SWAN simulations with different wave boundary conditions (ERA5, WW3 and CAWCR) are represented with solid colored lines, while buoy measurements are defined as black dotted-lines.

290 2.4 Discussion

291 Although there are not outstanding differences among the numerical wave model soluti-
 292 ons, depending on the location and the bulk wave parameters analysed, we can identify
 293 sets of wind and wave boundary conditions which provide more accurate results.

294 Despite the small differences between wind database products in spacial and
 295 temporal resolutions, it must be noted that ECMWF ERA5 winds positively stand out in
 296 almost all simulations. If the wind time step and spatial resolution are insufficient, rapid
 297 changes in wind direction and wind speeds are not properly incorporated in the wave
 298 model. The ERA5 spatial and temporal resolutions are the highest, among the three
 299 dataset analysed (Table 2.2) and this could indicate the reason for its superiority in the
 300 statistical results.

301 The wave lateral boundary conditions, particularly in nearshore, are usually
 302 more crucial for the wave modeling than the wind field conditions. We observed parti-
 303 cularly accurate results obtained when using CAWCR data on the domain boundary. In
 304 some situations, as for instance, in Figure 2.3 which shows the D_m time series for the
 305 Itajaí buoy, the CAWCR run captures the actual wave direction rapid variation measu-
 306 red by the buoy. The reason for this could be explained by the fact that the directional
 307 wave spectrum $E(\mathbf{x}, f, \theta, t)$ has been used for the CAWCR model runs, while bulk wave
 308 parameters (H_s, D_m, T_p) and directional spread have been employed in the WW3 and
 309 ERA5 simulations. This demonstrates the possible need for using a more complete
 310 description of the sea state, by means of the wave spectrum, in the southern Brazil
 311 region where multi-modal sea states usually occurs.

312 The differences in statistical results observed could be related to the nature of
 313 each bulk wave parameter and how they are computed. For instance, the significant
 314 wave height H_s and the wave mean direction D_m are estimated through the integrals of
 315 the wave energy density over the spectral domain. The peak wave period T_p is a local
 316 quantity, influenced mostly by directional and frequency arguments of the wave spec-
 317 trum. Further, as mentioned before, uncertainties in the wind speed and direction can
 318 impact on the air-sea momentum transfer and may influence peak frequency shifts on
 319 the spectrum (Van Vledder e L. Holthuijsen, 1993). Inadequate frequency discretization
 320 in the spectral grid resolution can negatively influence the model accuracy.

321 In Table 2.9, we show a comparison of some of the statistical parameters we
 322 used with those in the works by Guimarães et al. (2014), Siadatmousavi et al. (2016)

323 and Cecilio e Dillenburg (2020). The results presented in this study show an impro-
 324 vement in the hindcasting accuracy of the wave model SWAN, particularly with the
 325 ERA5/CAWCR input data, when compared to similar results within the same geographic
 326 region, despite the impossibility of a direct comparison, given the different setups and
 327 implementations employed in the previous works. Besides the wind and wave datasets
 328 used, factors such buoy locations, grid resolution and type are relevant in this compa-
 rative study.

Tabela 2.9: Wave dataset characteristics.

	Guimarães et al. (2014)	Siadatmousavi et al. (2016)	Cecilio e Dillenburg (2020)	This study
Wind	NCEP/WW3	GROW-Fine and ERA-Interim	NCEP/NOAA	several
Wave	NCEP/WW3	GROW-Fine and NCEP/WW3	WW3	several
Model	SWAN	SWAN	SWAN	SWAN
<hr/>				
H_s				
r	0.78	0.76-0.90	0.65-0.77	0.64-0.91
RMSE	-	0.35-0.42	0.33-0.58	0.33-0.82
<hr/>				
D_m				
r	-	-	-	0.60-0.87
RMSE	-	-	-	29.37-52.18
<hr/>				
T_p				
r	0.73	0.33-0.66	0.61-62	0.45-0.69
RMSE	-	1.81-2.72	1.85-2.03	1.56-2.20

329

330 Each of these works has its on particularity, but as the aim here is to compare
 331 simulations with the same wave model, all of then use the SWAN model to investigate
 332 the windsea and swell system within the region of study

333 Guimarães et al. (2014) used wind and wave data from NCEP/WW3 model
 334 version 4.18 as input, with spatial resolution of 1.25° in longitude and 1.00° in latitude,
 335 and temporal resolution of 3 hours. In order to characterize the wave dynamics in
 336 nearshore, the authors used two computation domains with spatial resolutions of 1.5
 337 km and 500 m. Their results were compared with wave data measured by a buoy near
 338 Tramandaí city, at a 17 m water depth.

339 Siadatmousavi et al. (2016) employed winds from GROW-Fine SAM (Oce-
 340 anweather Inc.) and ERA-Interim; both dataset present spatial resolution of 0.125° ,
 341 while, temporal resolution from GROW-Fine is 3 hours and for ERA-Interim is 6 hours.
 342 Note that the ERA-interim data provide a higher resolution than its successor ERA5
 343 (0.25°) by means of a bilinear interpolation technique applied to the original wind, which

344 are generated with an original spatial resolution of 0.75° . The numerical domain is dis-
345 cretized in an unstructured grid, with a spatial resolution that varies from 10 km in open
346 ocean to less than 2 km near the coast. Moreover, directional wave spectrum are pres-
347 cribed through open boundary using two dataset, GROW-Fine and NCEP/WW3. The
348 wave data from GROW-Fine are prescript every 3 hours and with spatial resolution
349 approximately to 1° both in longitude and latitude, while for the NCEP/WW3, the time
350 step is 3 hours with a spatial resolution of 1.25° in longitude and 1° in latitude. The
351 authors compared the results with measured wave data by a buoy close to the city of
352 Florianópolis, at approximately 80 m depth, and with satellite SAR data.

353 More recently, Cecilio e Dillenburg (2020) implemented a set of nested grids
354 to simulate waves nearshore in Southern Brazil using WW3 and SWAN model for a
355 period of 23 years (1990 to 2012). The WW3 model was globally run by surface wind
356 field from data available at NCEP/NOAA Reanalysis R1 (www.esrl.noaa.gov/psd) every
357 6 hours with a spatial resolution of 1.90° . From the global grid (1°), an one-way nesting
358 technique provides wave boundary condition for the Southern Atlantic grid (0.4°), which
359 in turn, feed other numerical grids with higher spatial resolution (such as 0.1° , 2 km and
360 400 m). Moreover, the SWAN model is run with a curvilinear grid which has variable
361 spatial resolution of 400 m –1.2 km. The results were compared with orbital altimetry
362 and with measurements of two shallow water buoys, at depths of 17 m and 17.5 m, in
363 Rio Grande and Tramandaí, respectively.

364 The above works give us the context where the present investigation lies in
365 and provide the previous state-of-art with respect to input data sensibility in regional
366 wave modeling in our domain of interest. We thus, update this knowledge with a com-
367 prehensive set of experiments using nine combinations of some of the most relevant
368 and current atmospheric forcing and wave boundary datasets. Furthermore, unlike the
369 works above, our analysis is made with wave data measured by buoys at the interme-
370 diate/deep water regimes.

371 To complement the analysis above, we could cite a very recent article by Lima et
372 al. (2020) in which the sensibility of hydrodynamic model ADCIRC coupled with SWAN
373 is assessed, using three different wind datasets as forcings: ERA5, the Climate Fore-
374 cast System Version 2 (CFSv2), and the Global Forecast System (GFS). The last two
375 reanalysis are provided in $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ and $0.2045^\circ \times 0.2045^\circ$ grid resolutions, respectively.
376 Wave results are compared with a buoy in shallow water near the city of Rio Grande,
377 and when available, also with the Rio Grande and Itajaí buoys used in the present work

378 plus a buoy in the continental shelf near Santos, in the state of São Paulo. Although
379 the focus is estimating storm surges and total water level, interesting information is also
380 provided on the waves, with their RMSE in the range 0.38-0.951. Kirinus et al. (2018)
381 simulated ocean currents and waves in a area which included the Southern Brazil, with
382 the models Telemac-3d and TOMAWAC. Using 4 buoys they estimated significant wave
383 height RMSE between 0.46 m and 0.57 m.

384 **2.5 Conclusion**

385 This study assess the influence of several datasets of wind and wave used by the wave
386 model SWAN to generate a hindcast in the Southern Brazil nearshore.

387 The model results did not show major statistical differences among the combi-
388 nations of datasets and in general, we observe that the simulations forced with ERA5
389 winds combined with CAWCR wave boundary conditions provided the highest accu-
390 racy.

391 We demonstrate the importance of using accurate wave boundary condition in
392 southern Brazil coastal region and that the input of CAWCR directional wave spectrum
393 on the lateral boundaries contributes significantly to improve wave hindcasts. Further-
394 more, the numerical domain described with a curvilinear grid is a relevant factor to
395 effectively describe the propagation of waves from open ocean to the shore.

396 The higher spatial and temporal resolution of ERA5 winds somewhat contribu-
397 tes for the improvement in the wave hindcast, as assessed by similar studies using its
398 dataset predecessor, ERA-Interim (Viitak et al., 2020).

399 The results presented are the first at considering the main current wave and
400 wind reanalysis datasets available simultaneously as input in a regional wave model
401 hindcast. Further, comparison with the only two wave buoys in deep water available
402 in southern Brazil confirm the reliability and adequacy of the results. The knowledge
403 acquired here will be essential of future investigations on long term high resolution wave
404 hindcasting in southern Brazil as well as being instrumental as a dynamical downscaling
405 for establishing the wave climate and future scenarios in this geographic region.

406 **Authorship statement**

407 **Nícolás A. Bose** performed Data analysis, Numerical modelling and Writing; **Marília**
408 **S. Ramos** Data analysis, Numerical modelling and Writing; **Gustavo S. Correia** Data
409 analysis, Numerical grid construction, Bathymetric interpolation and Writing; **Claus W.**
410 **Saidelles** Data analysis and Writing; **Leandro Farina** Project coordinator, Supervision
411 and Writing; **Claudia K. Parise** Supervision and help perform the analysis with cons-
412 tructive discussion and review; **João L. Nicolodi** Supervision and help perform the
413 analysis with constructive discussion and review.

414 **Acknowledgements**

415 The authors would like to thank Professor João Batista Da Paz Carvalho and the Inte-
416 grated Laboratory of Scientific Computing (LICC) at Federal University of Rio Grande
417 do Sul (UFRGS) for providing computational support during this research.

418 NAB, MSR, GSC and CWS acknowledge financial support by CAPES, Brazil.
419 This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal
420 de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. We acknowledge support from
421 the project ROAD-BESM – REGIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC DOWNSCA-
422 LING/CAPES (88881.146048/2017-01). This work has been partially funded by the
423 Office of Naval Research Global, under the contract no. N629091812124.

424 Bibliografia

- 425 Alonso, R., Solari, S. & Teixeira, L. (2015). Wave energy resource assessment in Uru-
426 guay. *Energy*, 93, 683–696.
- 427 Booij, N., Ris, R. C. & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for
428 coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Re-*
429 *search: Oceans*, 104(C4), 7649–7666.
- 430 Cavaleri, L., Alves, J.-H., Arduin, F., Babanin, A., Banner, M., Belibassakis, K., Benoit,
431 M., Donelan, M., Groeneweg, J., Herbers, T. et al. (2007). Wave modelling—the
432 state of the art. *Progress in Oceanography*, 75(4), 603–674.
- 433 Cecilio, R. & Dillenburg, S. (2020). An ocean wind-wave climatology for the Southern
434 Brazilian Shelf. Part I: Problem presentation and model validation. *Dynamics of*
435 *Atmospheres and Oceans*, 89, 101101.
- 436 CHM, C. d. H. d. M. (2020). Programa Nacional de Boias (PNBOIA) [Accessed: 2020-
437 08-02].
- 438 Dillenburg, S., Tomazelli, L. J. & Barboza, E. G. (2004). Barrier evolution and placer
439 formation at Bujuru southern Brazil. *Marine Geology*, 203(1-2), 43–56.
- 440 Farina, L. (2002). On ensemble prediction of ocean waves. *Tellus A: Dynamic Meteo-*
441 *rology and Oceanography*, 54(2), 148–158.
- 442 GEBCO, B. O. D. C. (2019). The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO).
- 443 Guimarães, P., Farina, L. & Toldo Jr, E. (2014). Analysis of extreme wave events on the
444 southern coast of Brazil. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(12),
445 3195–3205.
- 446 Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Ni-
447 colas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D. et al. (2020). The ERA5 global rea-
448 nalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–
449 2049.

- 450 Holthuijsen, L. H. [Leo H]. (2010). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge
451 university press.
- 452 Kirinus, E. P., Oleinik, P. H., Costi, J. & Marques, W. C. (2018). Long-term simulations
453 for ocean energy off the Brazilian coast. *Energy*, 163, 364–382.
- 454 Lima, A. d. S., Khalid, A., Will Miesse, T., Cassalho, F., Ferreira, C., Eymael Garcia
455 Scherer, M. & Bonetti, J. (2020). Hydrodynamic and Wave Responses During
456 Storm Surges on the Southern Brazilian Coast: A Hincast Study. *Water*, 12,
457 3538.
- 458 Pinho, M. P. (2015). *Inter-relações entre variáveis bióticas e abióticas e os potenci-
459 ais conflitos na exploração de recursos renováveis e não-renováveis da bacia
460 de Pelotas* (tese de dout.). Programa de Pós Graduação em Oceanografia Quí-
461 mica, Física e Geológica. Universidade Federal de Rio Grande. Rio Grande, Rio
462 Grande do Sul.
- 463 RedeOndas. (2020). Rede Ondas, Universidade Federal de Rio Grande (FURG) [Ac-
464 cessed: 2020-08-01].
- 465 RGFGRID, D. (2018). *Delft3D-RGFGRID User Manual. Generation and manipulation
466 of structured and unstructured grids, suitable for Delft3D-FLOW, Delft3D-WAVE
467 or D-Flow Flexible Mesh*. Versão 5.00. Deltares.
- 468 Ris, R., Holthuijsen, L. & Booij, N. (1999). A third-generation wave model for coas-
469 tal regions: 2. Verification. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4),
470 7667–7681.
- 471 Short, A. D. & Klein, A. H. d. F. (2016). *Brazilian beach systems* (Vol. 17). Springer.
- 472 Siadatmousavi, S. M., Jose, F. & da Silva, G. M. (2016). Sensitivity of a third generation
473 wave model to wind and boundary condition sources and model physics: A case
474 study from the South Atlantic Ocean off Brazil coast. *Computers & Geosciences*,
475 90, 57–65.
- 476 SWAN, T. et al. (2020). Scientific and technical documentation, SWAN Cycle III version
477 41.31A [Delft University of Technology, Department of Civil Engineering: Delft,
478 The Netherlands]. <https://www.swan.tudelft.nl>
- 479 Tolman, H. L. et al. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH
480 III version 3.14. *Technical note, MMAB Contribution*, 276, 220.
- 481 Van Vledder, G. P. & Holthuijsen, L. (1993). The directional response of ocean waves
482 to turning winds. *Journal of physical oceanography*, 23(2), 177–192.

- 483 Vellozo, T. & Alves, A. (2005). Características gerais do fenômeno da maré no Brasil.
484 *An. Hidrogr*, 61, 121–129.
- 485 Viitak, M., Avilez-Valente, P., Bio, A., Bastos, L. & Iglesias, I. (2020). Evaluating wind
486 datasets for wave hindcasting in the NW Iberian Peninsula coast. *Journal of*
487 *Operational Oceanography*, 1–14.
- 488 Zhao, Y., Nasrullah, Z. & Li, Z. (2019). PyOD: A Python Toolbox for Scalable Outlier
489 Detection. *Journal of Machine Learning Research*, 20(96), 1–7. [http://jmlr.org/](http://jmlr.org/papers/v20/19-011.html)
490 [papers/v20/19-011.html](http://jmlr.org/papers/v20/19-011.html)

Considerações finais

Este trabalho analisou a sensibilidade do modelo de terceira-geração SWAN em reproduzir as diferentes características de ondas para a região sul do Brasil. Foi analisado para o ano de 2015 três bancos de dados disponibilizados por grandes centros de previsões climáticas - ECMWF-ERA5, NCEP-WW3 e CSIRO-CAWCR. De modo geral, a análise permitiu investigar a capacidade do modelo numérico quando forçado com novos conjuntos de dados de ventos e de ondas, visando o melhor desempenho.

Ficou claro a importância do uso de condições de contorno de onda acuradas na região costeira do sul do Brasil, caracterizada por apresentar mares bimodais (*swell* e *windsea*). Com o uso do espectro direcional de onda $E(f, \theta)$ do CAWCR nas fronteiras laterais, observamos uma contribuição significativa na melhora do hindcast das ondas. Somado a isso, o domínio numérico descrito com uma grade curvilínea com alta resolução foi um fator importante para descrever efetivamente a propagação das ondas do oceano aberto para a costa.

Em relação aos ventos, a resolução espacial e temporal mais alta dos campos do ERA5 contribuiu de alguma forma para a melhoria na qualidade dos campos de ondas, conforme avaliado por estudos semelhantes usando seu predecessor do conjunto de dados, ERA-Interim (Viitak et al., 2020).

Os resultados do modelo não mostraram grandes diferenças estatísticas entre as combinações de conjuntos de dados. Contudo podemos observar que as simulações forçadas com ventos ERA5 combinados com condições de contorno de onda CAWCR forneceram a maior precisão.

Este trabalho é o primeiro a considerar e analisar os principais conjuntos de dados de reanálises de ondas e ventos disponíveis simultaneamente como entrada em um modelo de ondas regional. Além disso, a comparação com as duas únicas bóias

de ondas em águas profundas disponíveis no sul do Brasil confirma a confiabilidade e adequação da análise e dos resultados. O conhecimento adquirido aqui será essencial para futuras investigações no *hindcasting* de ondas em alta resolução de longo prazo no sul do Brasil, além de ser útil para a execução de um refinamento dinâmico com o objetivo de estabelecer o clima das ondas e os cenários futuros nesta região geográfica.

3.1 Anexo Submissão

☆ **Computers and Geosciences** Inbox - Google 12 January 2021 11:55 CG

Confirming submission to Computers and Geosciences

To: Nicolas De Assis Bose,
Reply-To: Computers and Geosciences

This is an automated message.

Assessing wind datasets and boundary conditions for wave hindcasting in the Southern Brazil nearshore

Dear Mr Bose,

We have received the above referenced manuscript you submitted to Computers and Geosciences.

To track the status of your manuscript, please log in as an author at <https://www.editorialmanager.com/cageo/>, and navigate to the "Submissions Being Processed" folder.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,
Computers and Geosciences

More information and support

You will find information relevant for you as an author on Elsevier's Author Hub: <https://www.elsevier.com/authors>

FAQ: How can I reset a forgotten password?
https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/28452/supporthub/publishing/
For further assistance, please visit our customer service site:
<https://service.elsevier.com/app/home/supporthub/publishing/>
Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions, and learn more about Editorial Manager via interactive tutorials. You can also talk 24/7 to our customer support team by phone and 24/7 by live chat and email

In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time. (Use the following URL: <https://www.editorialmanager.com/cageo/login.asp?a=r>). Please contact the publication office if you have any questions.

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
SENSIBILIDADE DO MODELO DE ONDAS SWAN ÀS FORÇANTES ATMOSFÉRICAS E CONDIÇÕES DE CONTORNO: UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO COSTEIRA DO SUL DO BRASIL
Área de Concentração: Geologia Marinha
Autor: Nicolas de Assis Bose
Orientadora: Prof. Dr. Leandro Farina
Examinador: Prof. Dr. Felipe Mendonça Pimenta
Data: 05/03/2021
Conceito: B (BOM)
PARECER:
<p>O presente parecer refere-se a avaliação da dissertação de Mestrado de Nicolas de Assis Bose junto ao Programa de Pós Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O título da dissertação é "Sensibilidade do modelo de ondas SWAN às forçantes atmosféricas e condições de contorno: um estudo de caso na região costeira do sul do Brasil". A dissertação apresenta uma Introdução ao problema abordado e um capítulo de resultados na forma de artigo científico. Está bem escrita, organizada e condensada - o que facilita muito a sua leitura. A Introdução realiza uma revisão de estudos correlatos de modelagem de ondas e da região de estudo, explorando o problema a ser tratado e apresentando claramente seu objetivo. O Referencial Teórico oferece um texto útil para estudantes interessados na área de modelagem de ondas espectral. O artigo principal explora o efeito de diferentes reanálises oceânicas (ondas) e atmosféricas (ventos) sobre a modelagem de ondas para costa do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. O modelo utilizado, SWAN, representa o estado da arte em modelagem espectral, incluindo os fenômenos de geração, interações não-lineares, dissipação por <i>whitecapping</i>, dissipação com o fundo, além da refração, <i>shoaling</i> e quebra das ondas. Como modelo regional, o SWAN considera a propagação de ondas longínquas e a geração local pelos ventos. Sendo assim, o modelo é sensível tanto à prescrição das condições de contorno quanto aos campos de ventos. No artigo os autores exploram esta sensibilidade do modelo, comparando os resultados do SWAN com séries temporais de três ondógrafos, sendo duas boias meteoceanográficas de águas profundas e um ADCP de águas rasas. Foi um prazer ler a dissertação e o artigo. Os resultados alcançados serão muito úteis a toda comunidade brasileira envolvida na modelagem de ondas na costa Brasileira e/ou interessada no desenvolvimento de produtos para segurança de operações navais e costeiras. Por outro lado, outros aspectos poderiam ter sido mais explorados na dissertação. Deixo estes listados como sugestões ao aprimoramento do artigo ou para o desenvolvimento de trabalhos futuros. O primeiro seria quanto a exposição inicial dos resultados. Acredito que a descrição do evento coberto pelas séries temporais, ilustrado com campos de ventos e ondas</p>

teria dado uma conotação "*oceanográfica*" ao trabalho. Os produtos de reanálise atmosférica também poderiam ter sido comparados com dados de velocidade e direção dos ventos das boias da marinha.

A questão do impacto da resolução espacial da reanálise atmosférica poderia ter sido explorada reduzindo-se a resolução do ERA5 ou utilizando produtos de refinamento atmosférico a partir do ERA5. De maneira semelhante, o produto CAWCR poderia ter sido testado com a prescrição de condições de contorno bulk (Dm, Tp e Hs) de forma a se testar o ganho da prescrição espectral nas condições de contorno. A direção das ondas poderia ter sido comparada com observações através de histogramas direcionais. Os espectros em frequência poderiam ter sido apresentados em comparação aos modelos. Por fim, a superestimação do modelo SWAN em águas rasas foi um resultado interessante, que merecia novos experimentos. Como a modificação da rugosidade de fundo e outros parâmetros do modelo afetam tais resultados? Porque a altura significativa das ondas é superestimada em águas rasas? Fiz pequenas sugestões e perguntas no texto do artigo submetido, de forma a auxiliar sua revisão e aprimoramento. Erros de digitação estão marcados no PDF. Com votos de sucesso a carreira do pesquisador Nicolas de Assis Bose, agradeço pelo convite para participar desta banca de avaliação do Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFRGS. Atenciosamente,

Assinatura:

Data: 05/03/2021.

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

SENSIBILIDADE DO MODELO DE ONDAS SWAN ÀS FORÇANTES ATMOSFÉRICAS E CONDIÇÕES DE CONTORNO: UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO COSTEIRA DO SUL DO BRASIL

Área de Concentração: Geologia Marinha

Autor: **Nicolas de Assis Bose**

Orientadora: Prof. Dr. Leandro Farina

Examinador: Prof. Dr. Nelson Violante de Carvalho

Data: Rio de Janeiro, 24 março 2021

Conceito: A

PARECER:

Assinatura: _____



_____ Data: 24 março 2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I

Título: Sensibilidade do Modelo de Ondas SWAN às Forçantes Atmosféricas e Condições de Contorno: Um Estudo de Caso na Região Costeira do Sul do Brasil

Autor: Nícolas de Assis Bose

Orientador: Prof. Leandro Farina

Examinador: Prof. Elírio E. Toldo Jr

Data: 11/03/2021

Conceito: A

O Plano da Dissertação tem objetivo avaliar o modelo SWAN no estudo dos padrões de ondas, a partir de 03 bancos de dados disponíveis pelos centros meteorológicos e oceanográficos ECMWF ERA5, NCEP WW3 e CSIRO CAWCR.

O candidato demonstrou que possui capacidade técnica e conhecimento para o desenvolvimento do Plano da Dissertação, e também, interesse pelo tema de estudo. Também, demonstrou domínio dos métodos utilizados e descritos no capítulo 2.2 do artigo.

O tema da Dissertação é bastante original e contribui ao estudo da sensibilidade do modelo de ondas SWAN em relação às forçantes atmosféricas e às condições de fronteira.

Tendo em consideração as correlações obtidas entre os dados de ondas modelados com a bóia de Tramandaí, seguem algumas sugestões:

- 1- Embora não seja habitual, é possível correlacionar a série de dados de ventos modelados ERA5, com as séries históricas de ventos das estações meteorológicas do INMET de Mostardas e Tramandaí?
- 2- O modelo utilizado (SWAN), contempla todas as deformações das ondas em águas rasas, antes da quebra?

A bóia de Tramandaí fundeado entre 11 e 14 m (dependendo do ano do fundeio), se encontra em bar aberto, mas muito próxima da zona de quebra. Exceto esta deformação, as demais são desenvolvidas completamente (shoaling/empolamento, difração e refração), o que poderia auxiliar na análise entre os dados medidos e modelados.

Melhorar a legibilidade das figuras 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4, praticamente incompreensíveis. A informação batimétrica na figura 2.1 não possui contraste nem legenda para visualização da morfologia submarina regional, nem da grade.

O manuscrito não contém informações gerais sobre a morfologia de fundo, nem sobre o tipo de sedimentos que compõe a plataforma continental, superfície por onde a onda se propaga e se deforma. Recomendo uma revisão das publicações (artigos e mapas) de Corrêa, I.C.S.

Os dados de ondas da bóia de Tramandaí foram adquiridos através de séries de fundeios realizados pelo Laboratório de Oceanografia e Geofísica Marinha

(LOGMAR/CECO/UFRGS), sendo que a Rede Ondas disponibiliza tais dados, rede da qual o LOGMAR está associado. Portanto, recomendo que seja citada esta informação nos agradecimentos.



Prof. Elírio Toldo Jr.