

# Condições extremas de agitação marítima ao largo de Rio Grande a partir do modelo WW3

Eloi Melo F<sup>01</sup>, Marco A.R. Romeu<sup>1</sup>; Guilherme R. Hammes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Engenharia Costeira, Escola de Engenharia, FURG, Rio Grande, RS

melo.eloi@gmail.com & mar7surf@hotmail.com

<sup>2</sup> Acad. Curso de Eng. Contr. Automação, UFSC, Florianópolis, SC - guihammes@gmail.com

## RESUMO

O modelo *Wave Watch III* forçado com ventos do banco de dados da NOAA foi usado para reconstituir o estado do mar num ponto ao largo (prof. 100 m) de Rio Grande por um período de 30 anos. A existência de medições de campo no local, feitas pela bóia Minuano-PNBÓIA, possibilitou a aferição e posterior correção de resultados do modelo para eliminar o viés encontrado para o parâmetro  $H_s$ . A massa de dados (corrigida) foi usada para identificar os eventos “extremos” nos quais  $H_s$  excedeu o valor 6 m. Os parâmetros básicos do estado de mar ( $H_s$ ,  $T_p$  e  $D_p$ ) e as datas correspondentes aos 40 eventos identificados são apresentados, juntamente com as condições meteorológicas associadas aos 5 eventos mais intensos. Uma comparação de resultados para 4 eventos extremos monitorados pela bóia Minuano indica que os valores de  $H_s$  previstos pelo modelo, mesmo após a correção, ainda tendem a superestimar um pouco os valores medidos.

**PALAVRAS CHAVE** – Ondas em Rio Grande, eventos extremos de mar, medições de onda, WW3, Ciclones Extra-Tropicais

## ABSTRACT

Wave Watch III model forced with winds from NOAA's data base was used to reconstruct sea states in a location off Rio Grande (depth 100 m) for a period of 30 years. The existence of field measurements at the site, performed by the Minuano-PNBOIA buoy, allowed the verification and further correction of model results to eliminate the bias found for  $H_s$ . The bulk of the data (after correction) was used to identify extreme events in which  $H_s$  exceeded 6 m. The basic sea state wave parameters ( $H_s$ ,  $T_p$  and  $D_p$ ) and the dates corresponding to the 40 extreme events identified are presented, along with the meteorological conditions associated with the 5 most intense events. A comparison of results for the 4 extreme events monitored by the Minuano buoy indicates that the values of  $H_s$  predicted by the model, even after correction, tend yet to slightly overestimate the measurements.

**KEY WORDS** – Waves at Rio Grande, extreme sea states, wave measurements, WW3, Extra-Tropical Cyclones

## 1. INTRODUÇÃO

Toda obra de engenharia deve ser dimensionada para suportar com segurança e economia os esforços aos quais ela estará sujeita durante sua vida útil. Nos ramos da engenharia que lidam com o mar (e.g. naval, oceânica, costeira, portuária, etc) muitas obras são dimensionadas em função de situações limites de carga definidas a partir de condições extremas de mar. Nesse contexto, o conhecimento preciso das condições extremas de agitação marítima prováveis de ocorrer durante a vida útil duma obra torna-se vital para o sucesso do

projeto. Em obras com tempo de vida prolongado costuma-se usar como parâmetro de projeto uma condição extrema de mar com tempo de recorrência de 100 anos: a chamada “onda centenária”.

Usualmente, informações sobre o clima de ondas disponíveis cobrem períodos menores que a vida útil da obra forçando o engenheiro a recorrer a métodos estatísticos próprios para estabelecer as condições de projeto (ver, por ex., refs. [2] e [6]). Para fornecer resultados confiáveis, esses métodos estatísticos necessitam ser alimentados por um conjunto de dados de condições extremas que cubram uma fração significativa – normalmente da ordem de 30% - do período de retorno desejado. Por exemplo, no caso da onda centenária, seria necessário dispor de uma série de dados sobre eventos extremos que cobrisse um período de cerca de 30 anos.

Idealmente, essa base de dados de condições extremas deveria vir de medições de campo. No Brasil, as campanhas de medição de ondas, quando existentes, cobrem, usualmente, períodos reduzidos o que praticamente inviabiliza uma determinação confiável de condições de projeto com base em dados medidos. Mesmo em locais onde há medições mais prolongadas é comum que os instrumentos apresentem problemas exatamente quando eles são mais necessários: em condições extremas. Em ambos os casos, o uso de modelos de geração de ondas para sintetizar uma base de dados longa o suficiente torna-se extremamente atrativo e na vasta maioria dos casos, se constitui na única alternativa viável.

O presente estudo aborda a questão do uso da modelagem do clima de ondas para o estabelecimento de uma base de dados confiável de condições extremas com duração de 30 anos para a região *offshore* de Rio Grande.

## 2. METODOLOGIA PARA RECONSTITUIÇÃO DO ESTADO DO MAR COM O MODELO WW3

O modelo de geração de ondas usado no presente estudo é o modelo “*Wave Watch III*”, (WW3) na versão 2.2, utilizado pela NCEP/NOAA americana cujo código, de domínio público, encontra-se acessível via internet. Uma descrição detalhada do modelo, incluindo suas equações e o método numérico utilizado, pode ser encontrada em Tolman [6], aqui nos limitaremos apenas a fazer uma brevíssima descrição das suas principais características.

Admitindo, para simplificar, o caso particular (e de interesse no presente trabalho) de ausência de correntes, o WW3 resolve a equação de conservação da densidade espectral de

energia ( $F$ ) em termos do número de onda ( $k$ ) e da direção de onda ( $\theta$ ) como funções que

variam lentamente no espaço ( $x$ ) e no tempo ( $t$ ). Essa equação admite implicitamente que as escalas espacial e temporal das ondas em si sejam muito menores que as escalas de variação correspondentes do espectro e das profundidades (e correntes, quando consideradas).

$$\frac{DF(k, \theta, x, t)}{Dt} = S(k, \theta, x, t) = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (1)$$

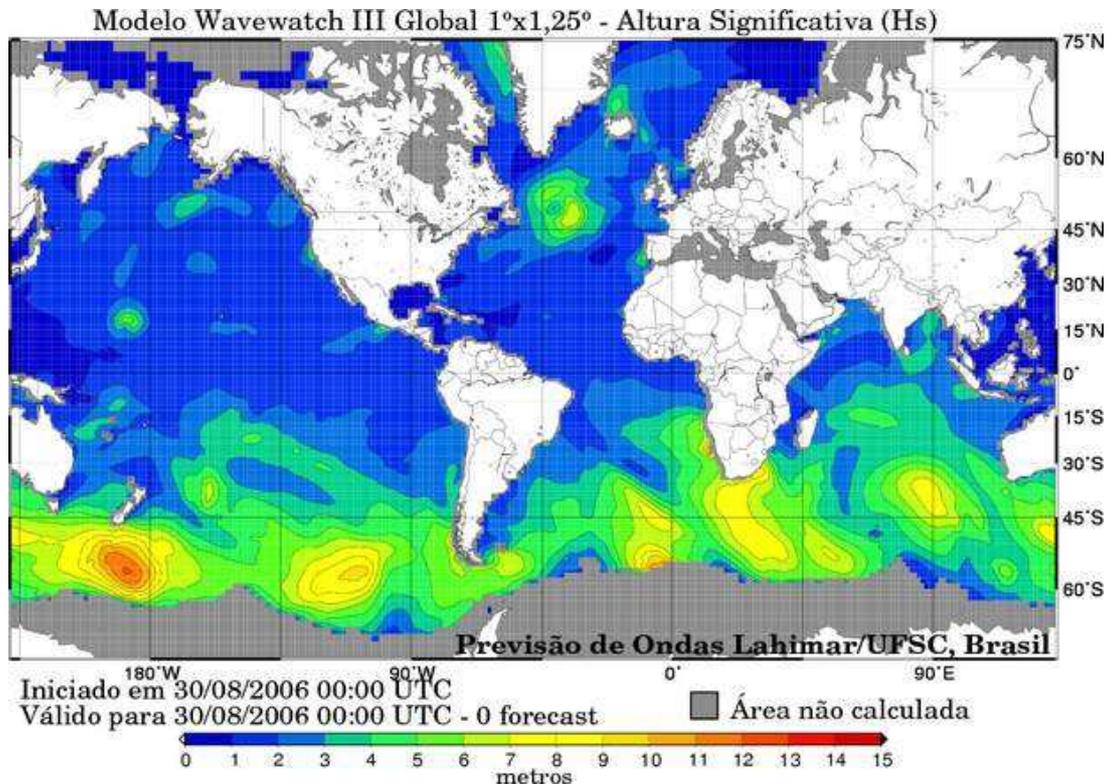
O lado esquerdo da eq. (1) representa mudanças em  $F$  devidas à propagação da energia de componentes espectrais individuais que viajam com velocidade de grupo obtida da relação de dispersão linear. O lado direito representa uma combinação de fontes e sumidouros (não conservativos) devidos ao input pelo vento ( $S_{in}$ ), à dissipação ( $S_{ds}$ ) causada pela arrebentação em águas profundas (“white-capping”) e pelo atrito com o fundo e ainda a transferência de energia (conservativa) entre componentes espectrais devidas a efeitos não-lineares ( $S_{nl}$ ).

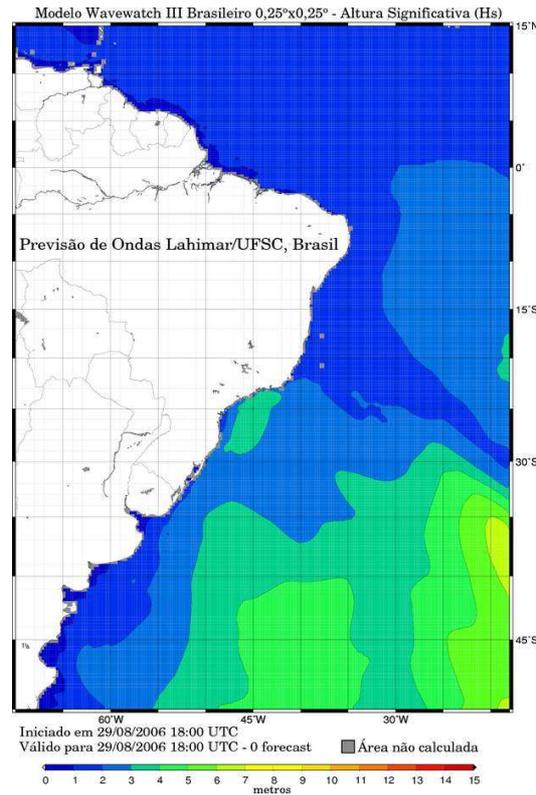
Portanto, o WW3 determina a evolução de  $F$ , o conhecido *Espectro Direcional* do campo de ondas, o qual mostra como a energia presente na superfície do mar se distribui em termos da frequência e direção das componentes. Entretanto, é prática corrente utilizar uma forma mais simples para especificar as condições de mar baseada em *três* informações básicas: uma sobre a *altura significativa* das ondas, outra sobre seu *período* (correspondente ao pico do espectro) e, uma terceira, sobre sua *direção*. (igualmente associada ao pico do espectro). Essa prática será adotada neste trabalho.

Os campos de vento utilizados para forçar o modelo foram também obtidos diretamente do banco de dados de domínio público da NOAA via internet. O vento utilizado foi o chamado vento “reanalizado” o qual pode ser entendido como um diagnóstico “aperfeiçoado”, corrigido a partir de dados medidos em campo. Obviamente, o uso de ventos reanalizados só é possível quando se deseja fazer uma reconstituição de eventos pretéritos como neste caso. O campo de ventos é fornecido a cada 3 horas com resolução espacial de  $1.00^\circ$  de latitude  $\times$   $1.25^\circ$  de longitude.

Na edição anterior do SEMENGO, Melo e colaboradores [4] apresentaram um estudo comparando diferentes implementações do modelo WW3 para o litoral brasileiro. O estudo confirmou que o uso de uma grade local aninhada numa grade global produz resultados mais precisos trazendo ainda o benefício de possuir um número maior de pontos de grade para coletar saídas do modelo sem a necessidade de recorrer a interpolação. Assim, no presente estudo, o modelo WW3 foi executado em duas grades numéricas aninhadas de acordo com:

- a) Grade “global” - usa o campo de ventos global para fazer previsões de onda igualmente globais com resolução de  $1^\circ \times 1.25^\circ$  (ver figura 1).
- b) Grade “local” - focaliza o Oceano Atlantico Sul com resolução de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (Ver figura 1) usando condições obtidas da grade global nas fronteiras





**Figura 1** - Exemplo de saída para Altura Significativa de Ondas ( $H_s$ ) do modelo WW3 para a grade “global” (painel superior) e “local” do Atlântico Sul (painel inferior)

A reconstituição do estado do mar foi iniciada no dia *01/Jan/1979* e conduzida ininterruptamente até o dia *31/Dez/2008*, sendo o campo de ventos utilizado nos cálculos atualizado a cada 3 horas. Observa-se que o modelo WW3, versão 2.2, foi executado com todos os seus parâmetros no modo padrão (“default”) o qual discretiza o espectro em 24 setores direcionais (i.e.  $\Delta\theta = 15^\circ$ ) juntamente com batimetria ETOPO [4].

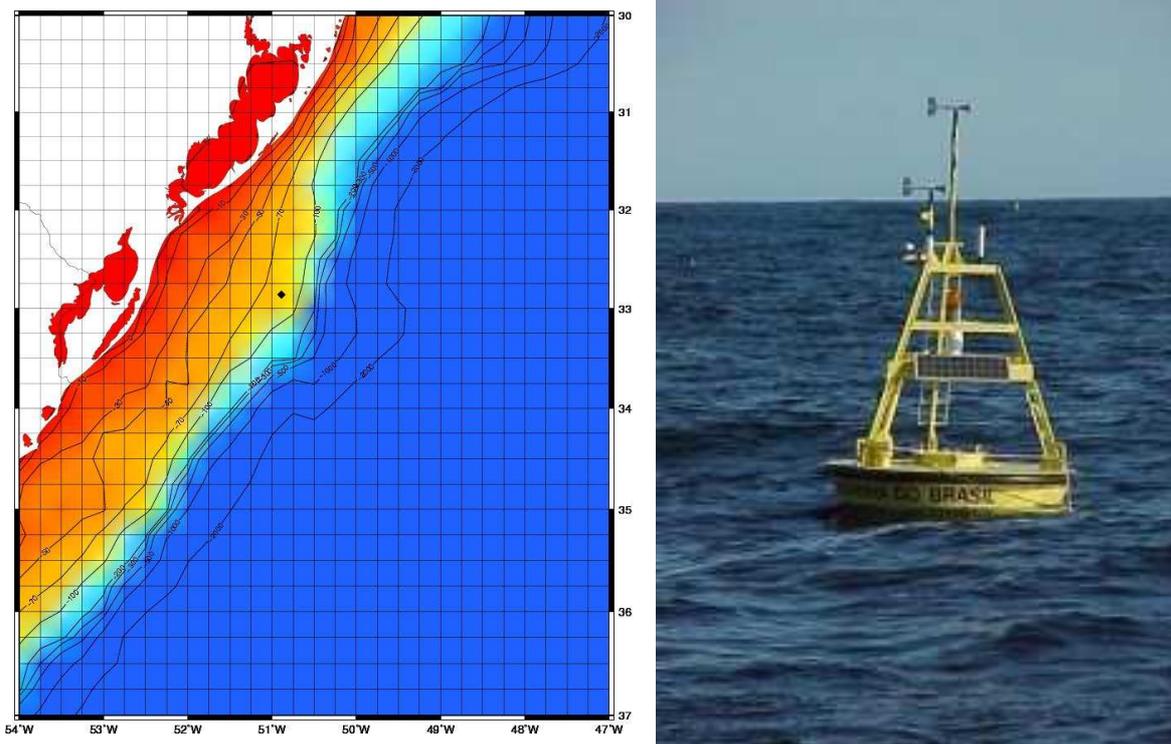
A metodologia descrita acima possibilitou recriar (sem lacunas) as condições de agitação marítima *ao largo* de toda a costa brasileira e, em particular da costa do Rio Grande do Sul, por um período de 30 anos (*1979 a 2008*) com resultados a cada 3 horas, totalizando 29 225 saídas do modelo. Essa massa de dados constituiu a matéria prima do presente estudo.

### 3. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO WW3 PARA RIO GRANDE

Uma avaliação criteriosa dos resultados do modelo é um passo crucial em qualquer trabalho de modelação. Usualmente, essa avaliação é feita através da comparação dos resultados modelados com dados medidos em campo. No presente caso, os dados de campo foram coletados pela bóia “Minuano” ao largo de Rio Grande durante cerca de 2 anos e meio, conforme descrito nessa seção.

#### 3.1 Comparação *modelo x medições*

Uma importante campanha de monitoramento meteo-oceanográfico foi realizada dentro do Programa Nacional de Bóias (PNBÓIA) ao largo do litoral sul do Brasil. O equipamento utilizado foi uma bóia do tipo ARGUS, batizada de “Minuano”, a qual ficou fundeada em  $32^\circ 54' S$ ;  $50^\circ 48' W$  num local com cerca de 100 m de profundidade bem ao largo de Rio Grande (ver figura 2). O monitoramento cobriu os períodos de *01/Maio/2001 a 30/Jun/2002* e de *01/Set/2002 a 13/Jan/2004*.



**Figura 2** - Local de fundeio (32°54'S; 50° 48' W) e fotografia da bóia Minuano-PNBOIA em ação ao largo de Rio Grande

No que concerne o monitoramento de ondas, a bóia fazia medições horárias apenas da altura significativa ( $H_s$ ) e do período de pico ( $T_p$ ) do campo de ondas, a direção das ondas, lamentavelmente, não foi medida. Da mesma forma, o espectro de ondas também não estava disponível.

Uma avaliação *quantitativa* da qualidade da modelação em Rio Grande foi feita utilizando-se os mesmos parâmetros estatísticos usados por Melo et al [4], os quais estão listados, por comodidade, na tabela 1. ( Leitores interessados numa descrição desses parâmetros, podem consultar a ref. [4] )

**Tabela 1** – Parâmetros estatísticos usados na comparação *modelo x medições*

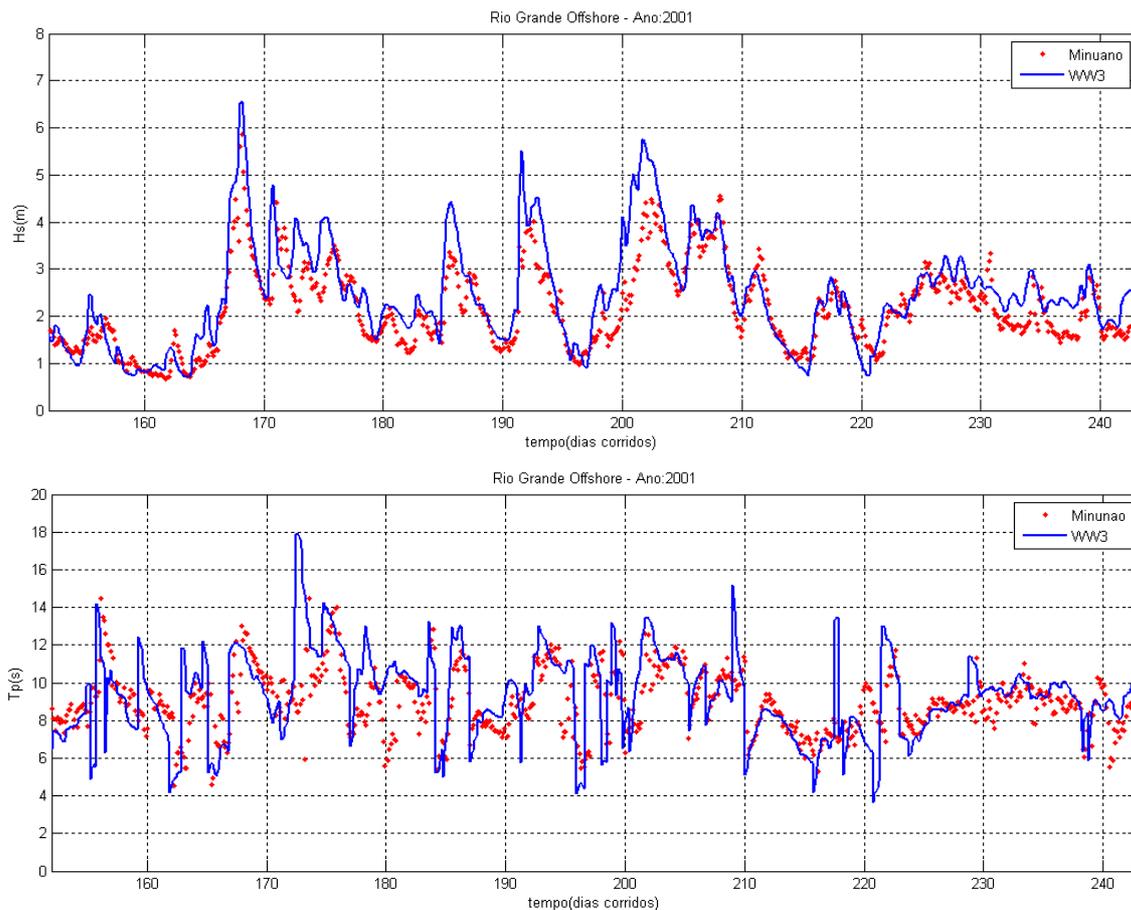
Parâmetro	Expressão Matemática
Valor médio das medições ( $\bar{o}$ )	$\bar{o} = \frac{\sum_{i=1}^N o_i}{N}$
Desvio padrão das medições ( $s_o$ )	$s_o = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2}{N}}$
Valor médio do modelo ( $\bar{m}$ )	$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{N}$
Desvio padrão do modelo ( $s_m$ )	$s_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2}{N}}$
Viés (V)	$V = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - o_i)}{N} = \bar{m} - \bar{o}$

<b>Viés Relativo</b>	$\frac{V}{\bar{\sigma}} = \frac{\bar{m}}{\bar{\sigma}} - 1$
<b>Erro Médio Quadrático (RMSE)</b>	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - \sigma_i)^2}{N}}$
<b>Índice de Espalhamento (SI)</b>	$SI = \frac{RMSE}{\bar{\sigma}}$
<b>Inclinação Quadrática Média (SS)</b>	$SS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N m_i^2}{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}}$

Na tabela,  $m$  = resultados do modelo,  $\sigma$  = medições (ou observações) e  $N$  = número de pontos.

### 3.2 Avaliação da modelação - modelo “bruto”

A título de ilustração, a figura 3 compara  $H_s$  e  $T_p$  medidos pela bóia Minuano ao largo de Rio Grande e calculados pelo WW3 para o ponto de fundeio da bóia durante os meses de Jun/Jul/Ago de 2001. Nesse caso, as medições correspondem a médias de 3 horas para manter a compatibilidade com as saídas do WW3 (a cada 3 hs).



**Figura 3** - Comparação de medições de  $H_s$  e  $T_p$  feitas pela bóia Minuano-PNBOIA com resultados do modelo WW3 (“bruto”) para Rio Grande

Uma rápida inspeção visual das séries temporais indica que, em geral, o modelo WW3 conseguiu reproduzir razoavelmente bem os parâmetros medidos. Desempenho similar do WW3 foi relatado por Melo et al. [4] na comparação com dados medidos ao largo da Ilha de Santa Catarina.

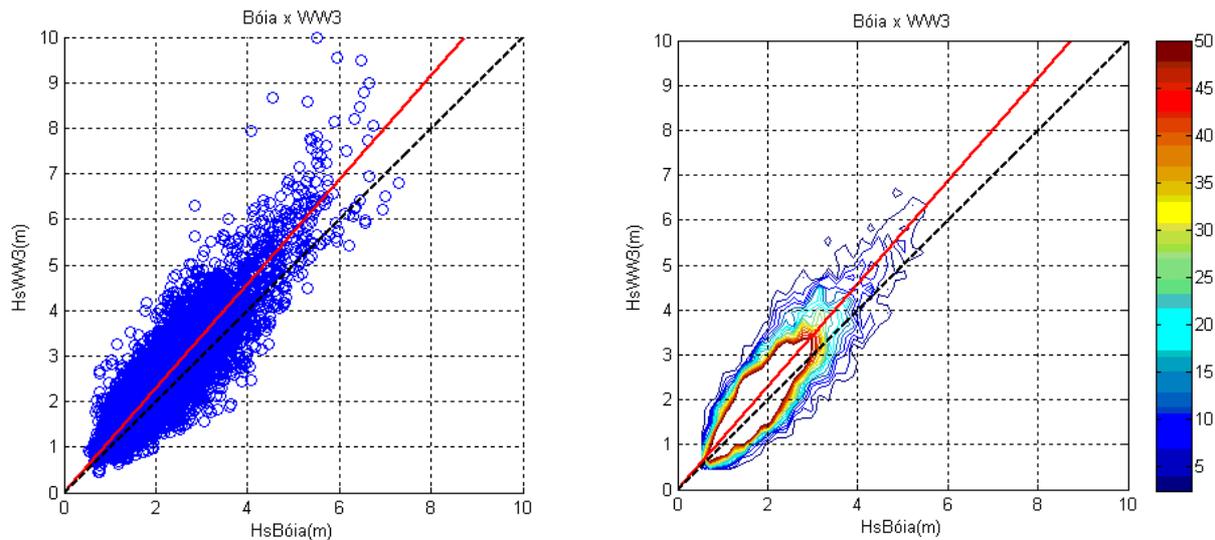
A tabela 2 mostra os valores dos parâmetros estatísticos calculados para toda a campanha da bóia “Minuano”.

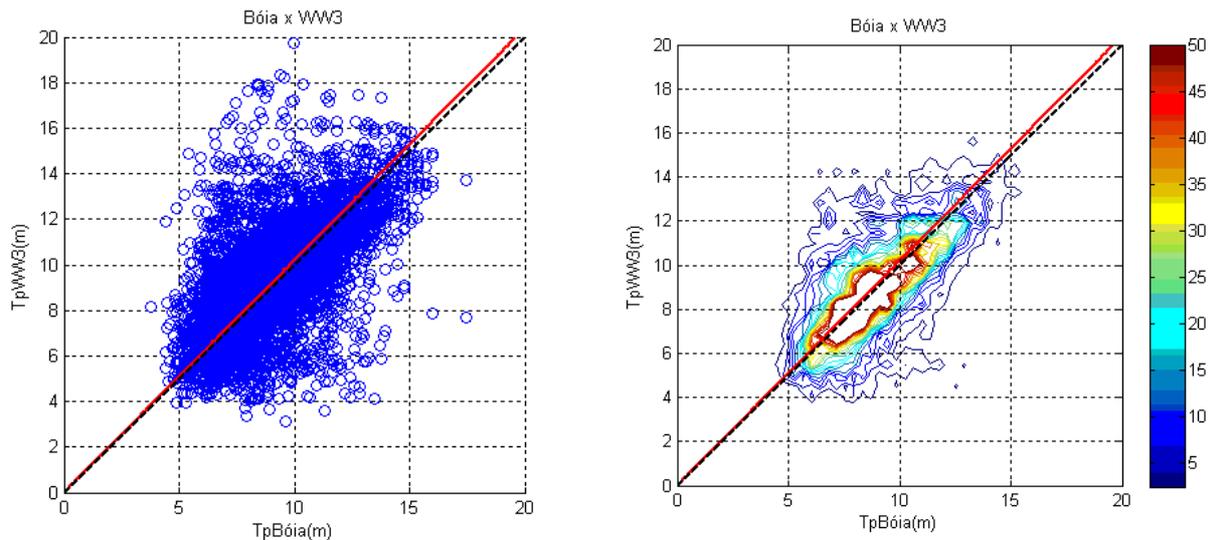
**Tabela 2** – Parâmetros estatísticos para (toda) a campanha da bóia Minuano

Bóia Minuano – PNBOIA ( 7216 pts. )													
Parâmetro	$\bar{o}$	$S_o$	$O_{max}$	$O_{min}$	$\bar{m}$	$S_m$	$m_{max}$	$m_{min}$	V	$\frac{V}{\bar{o}}$	RMSE	SI	SS
Hs	2.219 (m)	0.924 (m)	7.283 (m)	0.530 (m)	2.518 (m)	1.108 (m)	10.087 (m)	0.444 (m)	0.300 (m)	13.5%	0.608	0.274	1.145
Tp	9.127 (s)	2.044 (s)	17.48 (s)	3.78 (s)	9.256 (s)	2.259 (s)	19.76 (s)	3.145 (s)	0.129 (s)	1.4%	1.881	0.206	1.019

A exemplo da ref. [4], uma percepção *visual* da precisão do modelo pode ser conseguida através dos gráficos mostrados na figura 4. Os gráficos a esquerda são *diagramas de dispersão* (“*scatter plots*”) entre medições (eixo-x) e resultados do modelo (eixo-y). Cada ponto nesses diagramas correspondem a  $[(Param.)_{obs}, (Param.)_{mod}]$  e a reta a 45° (tracejada) marca o que seria um ajuste “perfeito”. A reta contínua foi traçada com a inclinação quadrática média (SS) passando pela origem. Os gráficos à direita correspondem a *histogramas de densidade de ocorrências*, que mostram o número de pontos presentes numa certa “área” do plano  $[(Param.)_{obs}, (Param.)_{mod}]$  e, portanto, são mais adequados que os diagramas de dispersão no caso de grande quantidade de pontos [4]. As retas traçadas são idênticas às dos “*scatter plots*”.

**Bóia Minuano - PNBOIA**





**Figura 4** – Esquerda: Diagramas de dispersão; Direita: Histogramas de densidade de ocorrências; Retas contínuas: traçadas com inclinação dada pela inclinação quadrática média ( $SS$ ) passando pela origem. Retas pontilhadas: traçadas a  $45^\circ$  passando pela origem (apenas para referência). Parâmetros indicados nas próprias figuras.

De maneira geral os parâmetros estatísticos confirmam o desempenho razoavelmente satisfatório do modelo. Por exemplo, a inclinação da reta dada por  $SS$  (última coluna na tabela) mostra valores próximos a  $1.0$  indicando um bom ajuste entre modelo e medições. A dispersão de resultados do modelo para os 2 parâmetros, medida pelo **Índice de Espalhamento** atingiu valores entre 20% a 30%, situando a presente reconstituição numa faixa de precisão comparável às encontradas na literatura para *hindcasts* de ondas geradas pelo vento (ver, por exemplo, Melo et al, [4] e Alves et al [1] )

Analisando a tabela com mais detalhe, verifica-se que os valores para o **Viés Relativo** e para a **Inclinação Média Quadrática** (grifados em verde) para o parâmetro  $H_s$  mostram que o modelo, em média, tende a *superestimar* sistematicamente em pouco mais de 10% as observações de altura significativa da bóia Minuano. Para  $T_p$ , os resultados do modelo se mostram bastante satisfatórios.

Curiosamente, Melo et al. [4] observaram uma tendência de superestimação de  $H_s$  da *mesma magnitude* ao comparar os resultados do WW3 (mesma reconstituição usada nesse trabalho) com dados medidos em Santa Catarina. Esse comportamento do modelo, observado em duas campanhas de medição independentes e em locais diferentes, sugere que a *superestimação* da energia do campo de ondas seja uma faceta do WW3 quando aplicado à região oceânica sul brasileira.

De fato, a superestimação de  $H_s$  pelo modelo WW3 foi também reportada por Alves et al. [1] num estudo do clima de ondas nas regiões *S* e *SE* brasileira. A avaliação do desempenho do modelo em [1] foi feita utilizando medições realizadas pela Petrobras na Baía de Campos, RJ, juntamente com os dados do PIC [3] em SC usados por Melo et al [4]. Como o acervo de dados da Baía de Campos incluía medições de vento, Alves et al [1] puderam comparar ventos medidos no local com os ventos usados no modelo de ondas concluindo que estes últimos superestimavam os ventos observados. Alves et al [1] procuraram amenizar o problema da superestimação de  $H_s$  aplicando uma correção prévia do campo de ventos da NOAA, usando como referencia os ventos medidos na baía de Campos.

O trabalho de Alves et al [1], portanto, indica uma possível explicação para a superestimação de  $H_s$  encontrada no presente trabalho e em Melo et al [4]: a raiz do problema

pode residir numa superestimação dos ventos reais pela reanálise da NOAA para o Atlântico Sul e não apenas (ou necessariamente) em deficiências do modelo WW3.

### 3.4 Correção do viés de $H_s$ no modelo WW3

Uma análise crítica dos resultados acima mostrou que a reconstituição feita com o modelo WW3, apesar de apresentar bons resultados gerais, mostra uma indesejável tendência de superestimação de  $H_s$ , um parâmetro chave em projetos de engenharia oceânica/costeira. Essa é uma questão que merece atenção, particularmente no caso da reconstituição de *eventos extremos*, uma vez que são esses eventos que definirão as condições de projeto de estruturas marítimas. Em muitos casos práticos, uma imprecisão da ordem de 10% em  $H_s$ , por exemplo, pode levar a projetos menos econômicos e até elevar riscos em operações marítimas.

No intuito de melhorar ao máximo a capacidade do WW3 em prever o parâmetro  $H_s$ , resolveu-se aproveitar a existência de dados de boa qualidade para se proceder a uma correção de resultados do modelo. Nesse ponto, uma possibilidade seria seguir o caminho usado por Alves et al [1] e corrigir o campo de ventos que força o modelo de ondas. Essa opção, obviamente, implicaria em refazer toda a análise duplicando o enorme esforço computacional já realizado. Além disso, uma eventual alteração no campo de ventos poderia afetar o período das ondas com o risco de deteriorar os bons resultados já conseguidos para esse parâmetro. Assim sendo, no presente trabalho optou-se por seguir um caminho alternativo e efetuar uma correção diretamente no parâmetro  $H_s$ .

A correção teve por objetivo específico *eliminar o viés do modelo na previsão do parâmetro  $H_s$* . Em termos práticos, a eliminação do viés faz com que o modelo, em média, reproduza as medições, uma vez que  $V = 0 \rightarrow (\bar{H}_p)_{mod} = (\bar{H}_p)_{obs}$ . A metodologia utilizada para tal é descrita a seguir.

Da definição de viés e do valor calculado na tabela acima, tem-se:

$$\frac{\bar{m} - \bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} = 0.135 \quad \therefore \quad \frac{\bar{m}}{\bar{\sigma}} = 1.135 \quad (2)$$

Onde  $\bar{m}$  = média dos resultados do modelo para  $H_s$  e  $\bar{\sigma}$  = média das observações de  $H_s$

Fazendo  $m_c = \alpha m$ , onde  $m_c$  = resultado do modelo (para  $H_s$ ) corrigido e  $\alpha$  = constante, o que se deseja é que:

$$\frac{\bar{m}_c - \bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} = 0 \quad \therefore \quad \alpha \frac{\bar{m}}{\bar{\sigma}} - 1 = 0 \quad \therefore \quad \alpha = \frac{1}{1.135} = 0.865 \quad (3)$$

Portanto, para que os resultados do modelo para  $H_s$  se tornem não-tendenciosos basta re-escalar cada um dos  $H_s$  modelados por  $\alpha=0.865$ , ou seja, a operação de correção consiste, simplesmente, em:

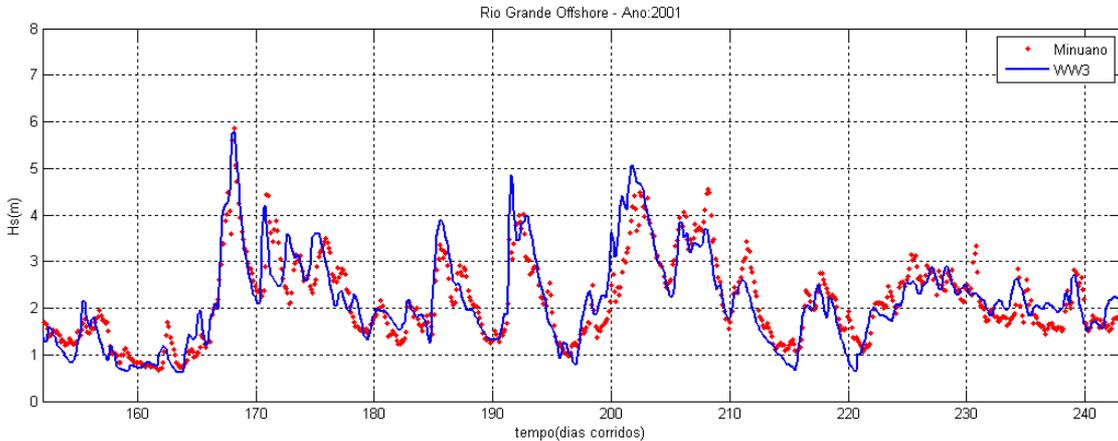
$$(H_s)_{corrigido} = 0.865 H_s \quad (4)$$

Observa-se que essa correção admite implicitamente que a tendência de superestimação de  $H_s$  pelo modelo *independe* do valor de  $H_s$ . Em outras palavras, está-se admitindo que o modelo superestima valores pequenos, médios e grandes de  $H_s$  na mesma proporção. Essa hipótese pode ser eurísticamente justificada observando o histograma de densidade de ocorrência para  $H_s$  (figura 4) o qual *aparenta* ser aproximadamente simétrico em relação a reta com inclinação  $SS$  em toda a faixa de valores de  $H_s$ . Caso assim não fosse, a correção acima poderia ser aplicada sequencialmente a setores de  $H_s$ . Contudo, no presente caso, esse

procedimento mais elaborado não foi utilizado e a correção foi feita aplicando a eq.(4) a toda a massa de dados, indiscriminadamente.

### 3.5 Avaliação da modelação - modelo com $H_s$ “corrigido”

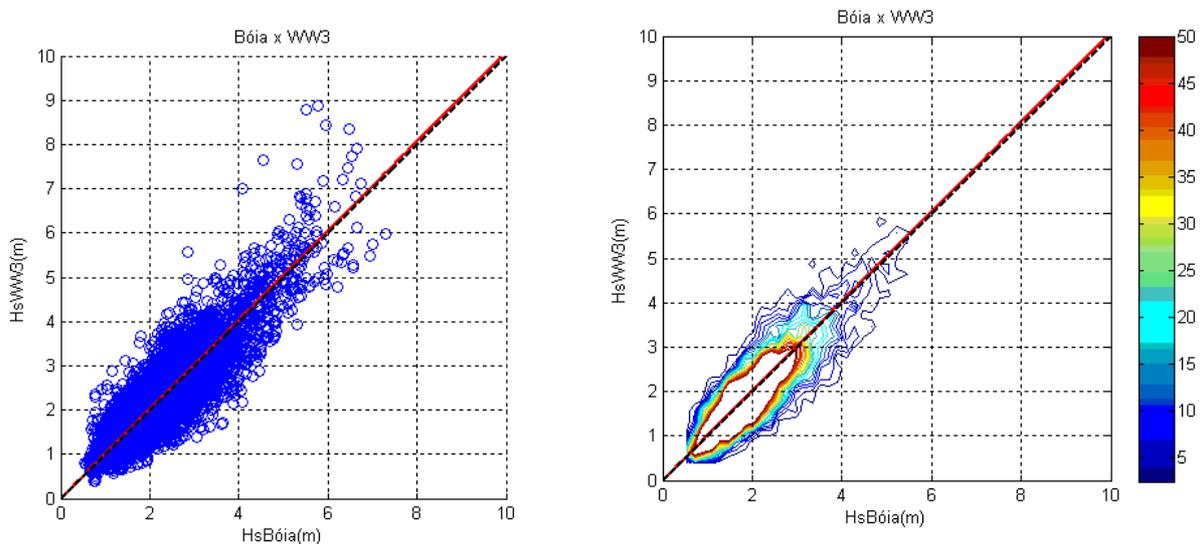
Como ilustração da correção do modelo, a figura 5 mostra o mesmo trecho de série temporal de  $H_s$  da bóia Minuano mostrado na figura 3 após a calibração indicada pela eq. (4).



**Figura 5** - Comparação de  $H_s$  medido pela bóia Minuano com resultados do modelo WW3 após correção de  $H_s$

O diagrama de dispersão e o histograma de densidade de ocorrências para  $H_s$  após a correção estão mostrados na figura 6.

#### Bóia Minuano – PNBOIA (modelo “corrigido”)



**Figura 6** – Diagramas de dispersão e de densidade de ocorrências para modelo “corrigido”

O efeito da correção de  $H_s$  nos parâmetros estatísticos está mostrado na tabela 3 abaixo, juntamente com os valores anteriores à correção para facilitar a comparação.

**Tabela 3** - Parâmetros estatísticos para (toda) a campanha da bóia Minuano *sem* e *com* correção

Bóia Minuano – PNBOIA ( 7216 pts. )													
Parâmetro	$\bar{o}$	$s_o$	$o_{max}$	$o_{min}$	$\bar{m}$	$s_m$	$m_{max}$	$m_{min}$	$V$	$\frac{V}{\bar{o}}$	RMSE	SI	SS
Hs “Bruto”	2.219 (m)	0.924 (m)	7.283 (m)	0.530 (m)	2.518 (m)	1.108 (m)	10.087 (m)	0.444 (m)	0.300 (m)	0.135	0.608	0.274	1.145
Hs “Corrigido”	2.219 (m)	0.924 (m)	7.283 (m)	0.530 (m)	2.219 (m)	0.976 (m)	8.887 (m)	0.391 (m)	0.000 (m)	0.000	0.469	0.211	1.008

Comparando os valores dos parâmetros antes e depois da correção verifica-se que a correção do viés de  $H_s$  promoveu uma *melhora generalizada* em todos os parâmetros, não apenas no viés. A evidência mais significativa dessa melhora é traduzida pelo “*scatter index*” ( $SI$ ) e pelo “*symmetric slope*” ( $SS$ ). Esse último igualou-se a 1 enquanto  $SI$ , mais surpreendentemente, passou de 0.274 para 0.211, numa diminuição de 23% no espalhamento dos pontos.

No contexto do presente estudo, observa-se também que a correção melhorou a previsão do valor máximo de  $H_s$  modelado que passou de 10.1 m para 8.9 m, após a correção, valor este mais próximo do valor máximo medido que foi de 7.3 m (ver tabela 3). [ Notar que trata-se de um resultado estatístico e, portanto, o máximo  $H_s$  modelado pode não corresponder ao mesmo evento que produziu o máximo  $H_s$  medido ]

#### 4. Condições extremas de agitação em Rio Grande ocorridas entre 01/Jan/1979 e 31/Dez/2008

Finalmente, com o modelo WW3 devidamente aferido, nessa seção, o acervo de 30 anos de dados (Jan/1979 a Dez/2008) gerados pelo modelo WW3 (com  $H_s$  corrigido), foi utilizado para investigar as características dos *eventos extremos* ocorridos ao largo de Rio Grande (local de fundeio da bóia “Minuano”). Por evento “extremo” entende-se um evento no qual a altura significativa do mar tenha excedido um certo limite pré-estabelecido. A definição desse limite é um tanto arbitrária e varia de local para local. Já prevendo uma utilização futura desses resultados na estimativa de eventos centenários, escolheu-se um valor de  $H_s$  limite que produzisse algumas dezenas de realizações no período reconstituído. Assim sendo, no presente trabalho estabeleceu-se como valor limite  $H_s = 6.0$  m

Sob essa hipótese, os eventos extremos, expressos em termos dos 3 parâmetros básicos ( $H_s$ ,  $T_p$  e  $D_p$ ), estão listados em ordem decrescente de  $H_s$  na tabela 4 abaixo.

**Tabela 4** - Listagem de eventos extremos ( $H_s > 6.0$ m) ocorridos entre Jan/79 e Dez/2008 em ordem decrescente de  $H_s$ 

Ranking	Ano/Mês/Dia	Hora	Hs(corrigido) (m)	$T_p$ (s)	$D_p$ (°N)
1	2006/06/27	0:00	8.79	14.68	174.1
2	2003/05/25	12:00	8.73	16.23	153.5
3	1985/06/07	3:00	8.48	14.09	167.6
4	1994/04/07	18:00	7.92	12.38	159.9

5	1999/06/29	18:00	7.85	12.63	161.6
6	1988/08/10	0:00	7.59	12.42	167.9
7	2002/02/02	9:00	7.50	15.24	164.9
8	2000/05/18	0:00	7.34	11.61	122.8
9	1991/10/06	15:00	7.24	10.62	148.7
10	2006/09/04	0:00	7.13	13.91	176
11	1999/05/30	3:00	7.03	11.22	210.3
12	2004/11/12	9:00	7.01	12.45	146.2
13	1987/08/18	0:00	6.97	14.71	169.2
14	1979/12/31	18:00	6.97	12.24	163.8
15	1996/07/21	6:00	6.81	13.81	180.2
16	1993/06/10	3:00	6.78	13.95	178.6
17	2002/09/01	18:00	6.77	15.04	164.1
18	1999/05/20	6:00	6.76	11.79	150.7
19	1980/06/14	0:00	6.76	11.20	202.8
20	2008/05/25	15:00	6.69	13.79	147.3
21	1980/09/04	18:00	6.61	14.97	185.9
22	1997/04/05	0:00	6.60	14.71	190.7
23	2005/09/02	21:00	6.59	12.18	169
24	1997/05/23	0:00	6.54	13.59	203.2
25	1984/05/30	9:00	6.53	10.97	224.3
26	2007/08/20	15:00	6.51	11.36	185.3
27	1981/06/17	21:00	6.49	12.52	200.9
28	1996/03/05	15:00	6.48	12.18	90.7
29	1981/07/17	21:00	6.33	11.43	154
30	1998/05/15	21:00	6.32	10.47	112.9
31	1993/07/31	21:00	6.31	10.75	189.5
32	2004/05/26	15:00	6.29	11.17	205.6
33	2000/04/18	21:00	6.21	10.29	88.4
34	2006/07/29	15:00	6.20	13.11	188.5
35	1998/03/25	21:00	6.14	12.95	188.9
36	1989/07/06	0:00	6.13	12.67	191
37	1984/06/27	6:00	6.11	10.46	223.3
38	1999/04/18	0:00	6.08	12.95	152.7
39	1994/07/09	9:00	6.07	11.16	195
40	2001/10/08	12:00	6.02	10.49	80.2

Para facilitar a utilização dos resultados, a tabela 5 mostra o mesmo conjunto de dados em ordem cronológica.

**Tabela 5** – Listagem de eventos extremos ( $H_s > 6.0m$ ) ocorridos entre Jan/79 e Dez/2008 em ordem cronológica. [OBS. (\*) representa eventos monitorados pela bóia Minuano ]

Ranking	Ano/Mês/Dia	Hora	Hs(corrigido) (m)	Tp (s)	Dp (°N)
14	1979/12/31	18:00	6.97	12.24	163.8
19	1980/06/14	0:00	6.76	11.20	202.8
21	1980/09/04	18:00	6.61	14.97	185.9
27	1981/06/17	21:00	6.49	12.52	200.9
29	1981/07/17	21:00	6.33	11.43	154
25	1984/05/30	9:00	6.53	10.97	224.3
37	1984/06/27	6:00	6.11	10.46	223.3
3	1985/06/07	3:00	8.48	14.09	167.6
13	1987/08/18	0:00	6.97	14.71	169.2
6	1988/08/10	0:00	7.59	12.42	167.9
36	1989/07/06	0:00	6.13	12.67	191
9	1991/10/06	15:00	7.24	10.62	148.7
16	1993/06/10	3:00	6.78	13.95	178.6
31	1993/07/31	21:00	6.31	10.75	189.5
4	1994/04/07	18:00	7.92	12.38	159.9
39	1994/07/09	9:00	6.07	11.16	195
28	1996/03/05	15:00	6.48	12.18	90.7
15	1996/07/21	6:00	6.81	13.81	180.2
22	1997/04/05	0:00	6.60	14.71	190.7
24	1997/05/23	0:00	6.54	13.59	203.2
21	1998/03/25	21:00	6.14	12.95	188.9
35	1998/05/15	21:00	6.32	10.47	112.9
38	1999/04/18	0:00	6.08	12.95	152.7
18	1999/05/20	6:00	6.76	11.79	150.7
11	1999/05/30	3:00	7.03	11.22	210.3
5	1999/06/29	18:00	7.85	12.63	161.6
33	2000/04/18	21:00	6.21	10.29	88.4
8	2000/05/18	0:00	7.34	11.61	122.8
40	2001/10/08(*)	12:00	6.02	10.49	80.2
7	2002/02/02(*)	9:00	7.50	15.24	164.9
17	2002/09/01(*)	18:00	6.77	15.04	164.1
2	2003/05/25(*)	12:00	8.73	16.23	153.5
32	2004/05/26	15:00	6.29	11.17	205.6
12	2004/11/12	9:00	7.01	12.45	146.2
23	2005/09/02	21:00	6.59	12.18	169
1	2006/06/27	0:00	8.79	14.68	174.1

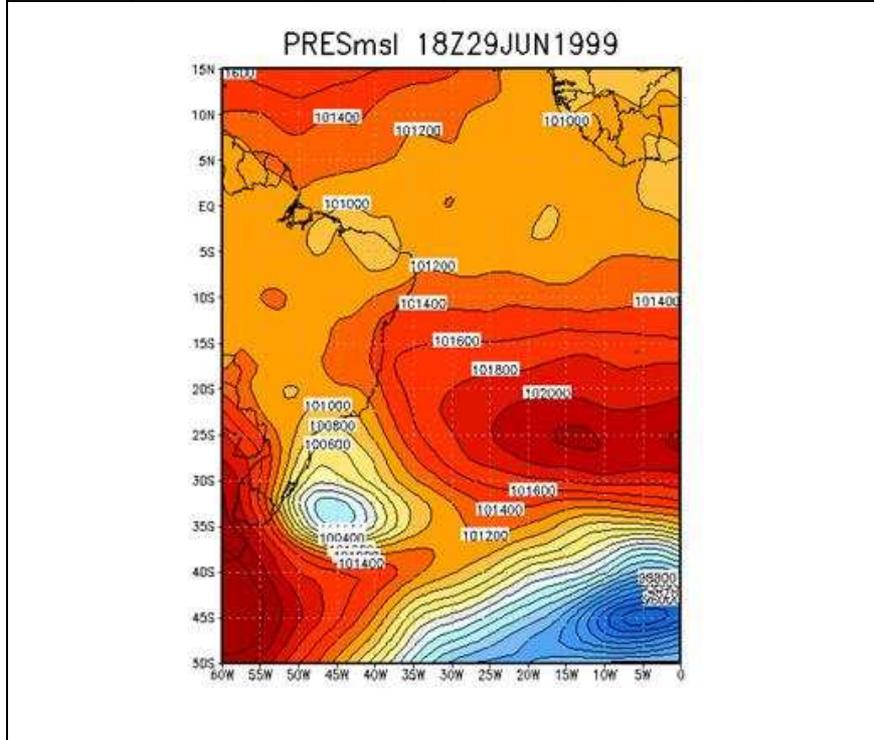
<b>34</b>	<b>2006/07/29</b>	<b>15:00</b>	<b>6.20</b>	<b>13.11</b>	<b>188.5</b>
<b>10</b>	<b>2006/09/04</b>	<b>0:00</b>	<b>7.13</b>	<b>13.91</b>	<b>176</b>
<b>26</b>	<b>2007/08/20</b>	<b>15:00</b>	<b>6.51</b>	<b>11.36</b>	<b>185.3</b>
<b>20</b>	<b>2008/05/25</b>	<b>15:00</b>	<b>6.69</b>	<b>13.79</b>	<b>147.3</b>

Conforme indicado nas tabelas 4 e 5, foram encontrados 40 eventos extremos (i.e. com  $H_s > 6.0 m$ ) nos 30 anos reconstituídos.

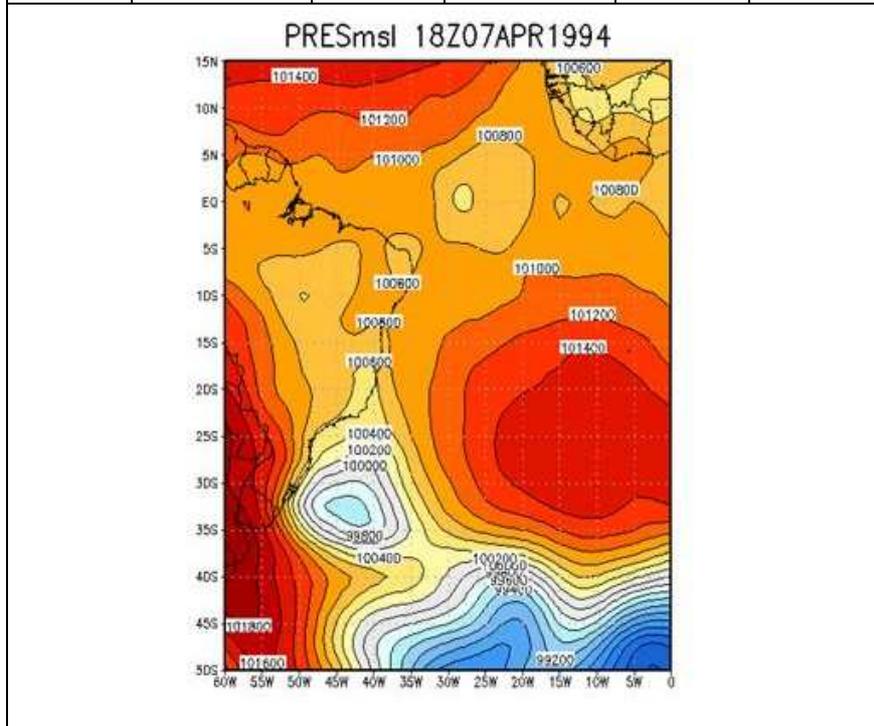
#### **4.1 Cenários meteorológicos dos cinco eventos mais intensos – análise simplificada**

Apresentam-se a seguir as cartas sinóticas de pressão atmosférica ao nível do mar correspondentes aos cinco eventos mais intensos previstos pelo modelo WW3. As cartas foram obtidas do banco de dados da NOAA.

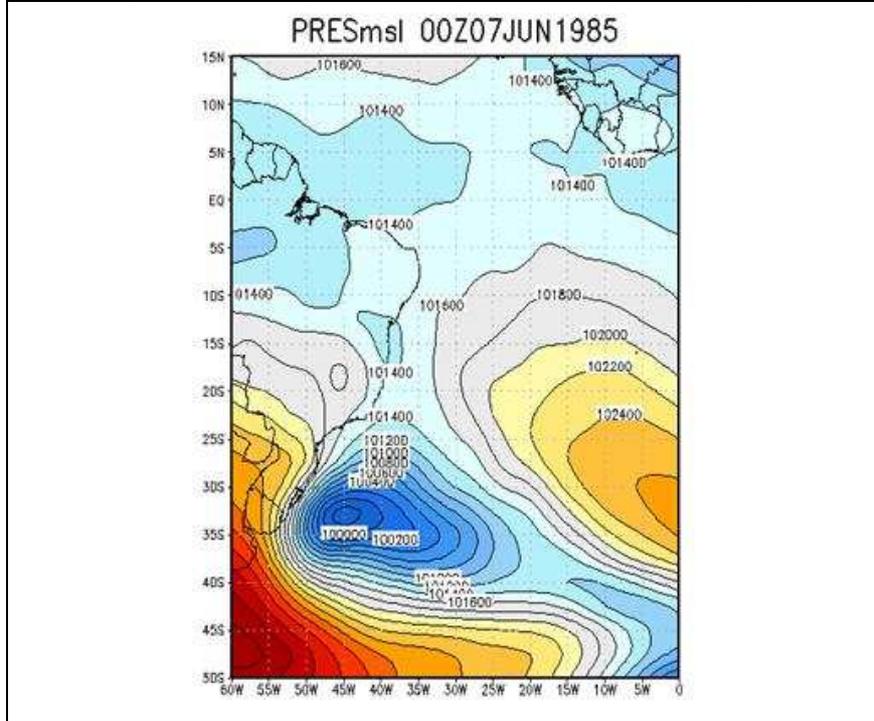
Ranking	Data	Hora	Hs(corr.) (m)	Tp (s)	Dp (°N)
<b>5</b>	<b>1999/06/29</b>	<b>18:00</b>	<b>7.85</b>	<b>12.62</b>	<b>161.6</b>



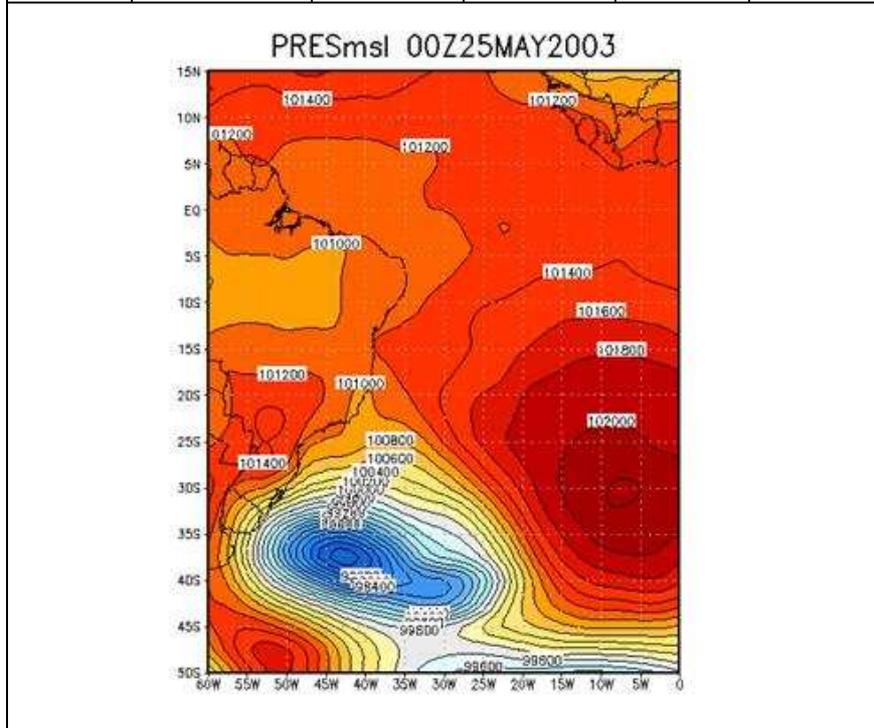
Ranking	Data	Hora	Hs(corr.) (m)	Tp (s)	Dp (°N)
<b>4</b>	<b>1994/04/07</b>	<b>18:00</b>	<b>7.92</b>	<b>12.38</b>	<b>159.9</b>



Ranking	Data	Hora	Hs(corr.) (m)	Tp (s)	Dp (°N)
<b>3</b>	<b>1985/06/07</b>	<b>3:00</b>	<b>8.47</b>	<b>14.08</b>	<b>167.6</b>



Ranking	Data	Hora	Hs(corr.) (m)	Tp (s)	Dp (°N)
<b>2</b>	<b>2003/05/25</b>	<b>12:00</b>	<b>8.73</b>	<b>16.23</b>	<b>153.5</b>



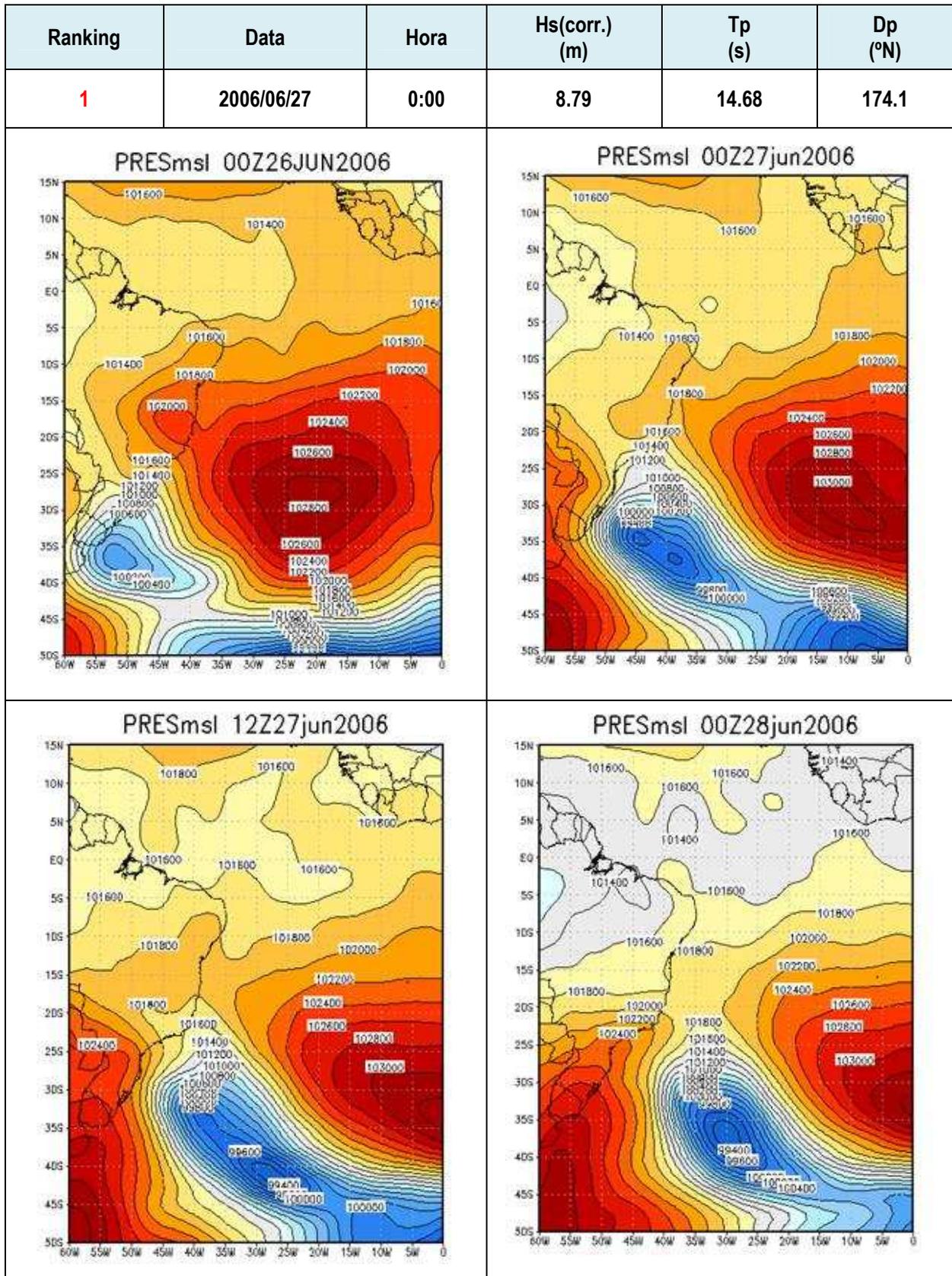


Figura 7 – Cenários meteorológicos correspondentes aos 5 eventos extremos mais intensos.

Mapas são cartas de pressão atmosférica (*mb*) ao nível do mar, data e hora estão indicadas.

Uma análise dos mapas de pressão atmosférica dos eventos mostra que todos eles resultaram do mesmo tipo de sistema meteorológico, qual seja, a passagem de intensos ciclones extra-tropicais pela região oceânica adjacente a costa do extremo sul do Brasil / costa do Uruguai, entre  $30^\circ$  e  $40^\circ$  S.

Em todos esses 5 casos, vale observar também a proximidade de um centro de alta pressão a W do ciclone causando gradientes de pressão bastante intensos no flanco W do mesmo. Os fortes ventos associados a esses gradientes vão soprar do quadrante S sobre longos trechos oceânicos conforme mostrado nas cartas acima. Essa combinação de fatores reúne os ingredientes para que o vento crie as condições extremas de mar previstas pelo modelo.

A similaridade das condições meteorológicas desses 5 eventos, em consequência, fez com que os estados de mar correspondentes apresentassem condições igualmente similares: períodos de pico longos, ondas provenientes do setor S e com *Hs* na faixa de 8 m.

Os cenários meteorológicos associados aos 40 eventos extremos identificados acima foram estudado por Machado et al [5]. Resumidamente, analisando a gênese e as trajetórias de deslocamento dos ciclones extra-tropicais associados aos eventos extremos, Machado et al. [5] identificaram 4 padrões meteorológicos recorrentes, sendo o padrão dominante um no qual os ciclones se formam ao largo da costa uruguaia e se deslocam para E mantendo uma trajetória entre  $28^\circ$ S e  $43^\circ$ S. Os leitores interessados podem consultar a ref. [5] para mais detalhes.

#### 4.2. Eventos extremos monitorados pela bóia Minuano: avaliação extra do modelo

Uma inspeção das datas dos eventos extremos da tabela 5 mostra que o período de monitoramento da bóia Minuano incluiu 4 dentre os 40 eventos extremos identificados. Assim, é interessante aproveitar a existência de medições de campo para avaliar o grau de precisão da reconstituição de eventos extremos feita no presente trabalho.

Os valores de *Hs* e *Tp* medidos e modelados para os 4 eventos estão listados na tabela 6.

**Tabela 6** – Comparação *modelo x medições* para os eventos extremos monitorados pela bóia Minuano

Evento	(Hs)mod (m)	(Hs)obs (m)	$\frac{(Hs)mod}{(Hs)obs}$	(Tp)mod (s)	(Tp)obs (s)	$\frac{(Tp)mod}{(Tp)obs}$
2001/10/08	6.02	7.46	0.807	10.49	10.67	0.983
2002/02/02	7.50	6.23	1.204	15.24	14.22	1.072
2002/09/01	6.77	5.96	1.136	15.04	14.22	1.058
2003/05/25	8.73	6.93	1.260	16.23	16.00	1.014
média	7.255	6.645	-	14.25	13.78	-

Analisando-se a tabela constata-se que, mesmo após a correção de *Hs*, a reconstituição dos eventos extremos ainda tende a fornecer valores de *Hs* um pouco maiores do que os observados. Apesar da amostra de casos ser de apenas 4 valores, foi feita uma estimativa

(grosseira) do nível de erro envolvido. De fato a média dos ( $H_s$ ) modelados foi de 7.26 m enquanto a média dos  $H_s$  observados foi de 6.65 m, portanto, em média o modelo superestimou as observações nos casos extremos em 9%.

Esse resultado mostra que vale a pena investir no aperfeiçoamento do método de correção de  $H_s$ , fazendo a correção por faixa de valores mencionada na seção 3.4, (provavelmente, com uma correção um pouco mais forte para valores altos de  $H_s$ ). Essa questão será tema de um futuro trabalho.

A modelação de  $T_p$  apresenta resultados superiores aos de  $H_s$ , conforme esperado.

## 5. Considerações Finais

O presente trabalho constitui um primeiro passo no sentido de caracterizar com precisão as condições de mar vigentes em eventos extremos de agitação marítima ao largo de Rio Grande. No período de 30 anos investigado (1979 a 2008), foram identificados 40 eventos com altura significativa acima de 6 m.

De acordo com a reconstituição feita, a condição de mar mais severa ocorreu no dia 27/Jun/2006 e teve as seguintes características:  $H_s = 8.8$  m,  $T_p = 14.7$  s e  $D_p = 174^\circ N$ . Por uma feliz coincidência o segundo evento mais severo ocorreu no dia 25/Maio/2003, portanto, durante a campanha de monitoramento da bóia Minuano. Os valores previstos pelo modelo nesse caso foram:  $(H_s)_{mod} = 8.7$  m,  $(T_p)_{mod} = 16.2$  s e  $D_p = 153.5^\circ N$ , enquanto o instrumento mediu:  $(H_s)_{obs} = 6.9$  m,  $(T_p)_{obs} = 16.0$  s ( $D_p$  não medido pelo bóia). Portanto, para esse evento específico, o modelo superestimou em 26% a altura significativa máxima do mar.

Curiosamente, o máximo valor de  $H_s$  medido pela bóia Minuano ocorreu no dia 08/Set/2001 atingindo um valor de  $(H_s)_{obs} = 7.5$  m. O modelo previu para esse evento :  $(H_s)_{mod} = 6.0$  m o que o situou em 40º lugar (a última posição !) no ranking de eventos extremos reconstituídos pelo modelo. Esses 2 casos ilustram o nível de dificuldade inerente numa previsão precisa do estado de mar em eventos extremos e, ao mesmo tempo, demonstram claramente a enorme importância do monitoramento de campo !

Fica também evidente que esse tipo de estudo envolve ainda incertezas e, portanto, seus resultados são melhor interpretados a luz da estatística. Por exemplo, o valor máximo de  $H_s$  previsto pelo modelo para o período de monitoramento da bóia (8.7 m) é apenas 16% maior do que o valor máximo medido pela mesma (7.5 m) no mesmo período, apesar de se tratarem de eventos distintos.

Finalmente, é importante ressaltar que os eventos extremos de agitação aqui identificados podem não corresponder (necessariamente) aos casos extremos ocorridos na costa (ressacas). O motivo principal está relacionado à direção das ondas prevista pelo modelo. De fato, muitos dos eventos extremos “offshore” apresentam direção oblíqua em relação à normal à linha de costa na região (aproximadamente  $135^\circ N \equiv SE$ ) e, portanto, tenderiam a ter sua energia (logo, sua  $H_s$ ) diminuída pelo simples efeito da refração das ondas sobre a plataforma continental, especialmente no caso de ondas de períodos mais longos. É possível, por exemplo, que um estado de mar menos energético ao largo, porém com incidência mais perpendicular a linha de costa, ocasione ondas maiores na costa do que outro mais energético, porém com incidência mais oblíqua. Obviamente, outros efeitos na propagação das ondas do largo até a costa, além da refração, ainda teriam de ser considerados numa investigação sobre os eventos extremos ocorridos em águas rasas.

## 6. Referências

1. ALVES, J.H.G.M.; RIBEIRO, E.O.; MATHESON, G.S.G.; LIMA, J.A.M. & RIBEIRO, C.E.P. (2008) *Reconstituição do Clima de Ondas no Sul-Sudeste Brasileiro entre 1997 e 2005*. Revista Brasileira de Geofísica, 27(3): 427-445
2. HERBICH, J.B. (1990) – *Selection of Design Wave Characteristics* – In: Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Vol.1. Capítulo 8. Gulf Publ. Comp. Houston, Texas. pp 408-532
3. MELO F<sup>o</sup>, E. (2004) *Programa de Informação Costeira on line: Um balanço dos primeiros dois anos de funcionamento*. I Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. SEMENGO. FURG. Rio Grande. pp 25. (Publicado em CD. sem paginação).
4. MELO F<sup>o</sup>, E.; HAMMES, G.R., FRANCO, D. ROMEU, M.A.R. (2008) *Aferição de desempenho do modelo WW3 em Santa Catarina*. III Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. SEMENGO. FURG. Rio Grande. pp 20. (Publicado em CD. sem paginação).
5. MACHADO A.A.; CALLIARI L.J.; MELO F<sup>o</sup>, E & KLEIN, A.H.F. (2010) *Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes*. Pan American Journal of Aquatic Sciences, no prelo.
6. TOLMAN, H.L. (2002) *User manual and system documentation of WAVE-WATCH III version 2.22*. NOAA/NWS/NCEP/OMB Tech. Note 222. 130 pp
7. WYLAND, R.M. & THORNTON, E.B. (1991) *Extreme Wave Statistics using three Hindcasts*; Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering Vol. 117, no.1 Jan/Feb, pp 60-74