

## **LUSOWAVES - IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA OPERACIONAL DE PREVISÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA JUNTO À COSTA PORTUGUESA**

Eugen Rusu, Carlos Ventura Soares, José Paulo Pinto e Liliana Rusu

MARINHA, INSTITUTO HIDROGRÁFICO, Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal.

Email: [oceanografia@hidrografico.pt](mailto:oceanografia@hidrografico.pt)

### **Resumo**

A caracterização, em tempo útil, das condições de agitação marítima junto à costa, viu a sua importância acrescida nas últimas décadas, em engenharia costeira e em estudos ambientais. A finalidade do presente trabalho é a implementação e o desenvolvimento de um sistema operacional de previsão da agitação marítima junto à costa Portuguesa. Recorre-se ao modelo espectral SWAN para a obtenção das características das ondas numa área específica, a partir de dados fornecidos pelo modelo de escala oceânica WW3. Esses modelos numéricos são baseados na equação de balanço da ação (ou da energia, na ausência de correntes) com fontes e sumidouros. Foi desenvolvida também uma interface gráfica, em ambiente MATLAB, com capacidades de pré e pós-processamento. Além de facilitar a implementação do modelo SWAN numa dada área, o objectivo principal desta interface é o de colocar à disposição do utilizador uma ferramenta operacional que lhe permita aceder, em tempo quase real, aos parâmetros caracterizadores da agitação marítima fornecidos pelos modelos numéricos. A interface de Matlab desenvolvida pode ser utilizada não só no estudo da distribuição espacial dos parâmetros de onda num dado instante, mas também na visualização da sua evolução temporal. Este sistema de previsão operacional que está a ser desenvolvido, já foi utilizado no âmbito dos exercícios da Marinha Portuguesa CONTEX/PHIBEX (2002) e SWORDFISH (2003), no exercício da NATO Unified Odyssey (2002), bem como no caso do acidente do navio Prestige (em Novembro 2002). A experiência adquirida e os resultados obtidos são particularmente importantes para a prossecução do trabalho desenvolvido no campo da Oceanografia Operacional no Instituto Hidrográfico.

### **1. INTRODUÇÃO**

As mudanças globais no clima da planeta tendo como resultado o aumento contínuo e sem precedentes do nível de oceano, estão induzindo também uma evolução nova na dinâmica costeira. Em relação a essas mudanças, a previsão das condições de agitação marítima junto a costa é um dos factores mais importantes. Por outro lado, também essa nova dinâmica no ambiente litoral, bem como progresso tecnológico das últimas décadas, torna cada vez mais relevante a ideia de desenvolver uma rede global para previsão oceanográfica acoplada à rede existente para previsão meteorológica. A economia de Portugal está dependente de investimentos e operações que ocorrem no litoral. É por isso que a caracterização das condições de agitação marítima ao longo da costa Portuguesa é um assunto que tem tido importância crescente em vários estudos ambientais. Nesta perspectiva, nos últimos anos, o Instituto Hidrográfico (IH) iniciou a implementação de um sistema operacional de previsão da agitação marítima junto à costa Portuguesa, baseado em modelos numéricos, e na interacção entre os modelos de grande escala e de alta resolução (WW3 e SWAN).

O WW3 (Wave Watch III) é um modelo oceânico baseado numa descrição física detalhada das interacções ar/mar, dando informações estatísticas sobre a evolução temporal do oceano através da equação espectral de balanço da ação, Komen et al., (1994). O modelo foi acoplado aos modelos operacionais de previsão atmosférica, e muitas implementações

regionais para as costas Europeias do Oceano Atlântico estão disponíveis na Internet. Uma versão regional própria do modelo WW3 para toda a área do Atlântico de Norte já foi implementada no IH. SWAN (acrónimo para Simulation Waves Nearshore) é um modelo numérico concebido para a obtenção duma estimativa realista dos parâmetros das ondas em águas pouco profundas (junto á costa, lagos, estuários, etc.), conhecendo as condições de vento, batimetria e correntes, Holthuijsen et al. (2001). O modelo SWAN é baseado também na equação de Hasselman (equação de balanço da acção) integrada em todas as dimensões (tempo, espaço geográfico, frequência e espaço direccional).

## 2. TOTAL WAVE – A INTERFACE DO SISTEMA

Com base nos características do modelo espectral SWAN foi elaborada uma interface gráfica, em ambiente MATLAB, que facilita a implementação do modelo numa área e também permite estimar rapidamente os seus resultados.

A estrutura e a hierarquia desta interface são apresentadas na figura 1. A interface tem quatro módulos. O primeiro está relacionado com o processo de implementação do modelo numa área específica. As funções principais deste componente de pré-processamento consistem na visualização de mapas batimétricos e na geração de malhas para efeitos computacionais. Normalmente a batimetria resultante das medições é fornecida num ficheiro com três colunas, coordenadas x e y, e a profundidade. Esses dados são transformados numa malha através de métodos usuais de interpolação, definindo os limites no espaço geográfico e o número de pontos para ambas as direcções. O processamento destes dados permite então visualizar e produzir mapas batimétricos que serão posteriormente utilizados nos modelos numéricos. Este processo é ilustrado nas figuras 2 e 3 para área de Portugal continental e para o caso da Ilha da Madeira, respectivamente. Além disso, como pode ser visto na figura 3, está disponível também a possibilidade de inserir no mapa a linha de costa e deste modo inferir a precisão da interpolação.

Além da batimetria, outros campos de dados iniciais podem ser processados (vento, correntes, etc.) previamente à inicialização do modelo, sendo esta uma das funções do segundo módulo. Após o processamento das condições iniciais, do mapa batimétrico e da geração da malha computacional, toda esta informação é exportada para o modelo numérico.

O terceiro módulo é utilizado para pós-processamento e para análise horizontal dos parâmetros de agitação marítima fornecidos pelas corridas do modelo. Nesta fase pode ser efectuada uma avaliação global do campo de ondas para toda a área em análise, permitindo uma visualização da distribuição espacial das respectivas variáveis, que se reveste de grande utilidade na modificação das condições iniciais e fronteira, e na optimização da combinação dos processos físicos considerados. Estão disponíveis as representações da altura significativa, do período e da direcção, bem como doutros parâmetros como a profundidade, o comprimento de onda, a dispersão em frequência, a dispersão em direcção, etc. As condições locais podem ser avaliadas utilizando o mapa da área analisada e escolhendo qualquer ponto ou linha para uma avaliação detalhada das condições de agitação marítima. Os dados iniciais são, neste caso, as coordenadas do ponto ou das extremidades da linha. A selecção da localização pode ser efectuada directamente no mapa da área ou, alternativamente, por introdução de valores analíticos. No caso do ponto é feita uma comparação com os valores máximos das variáveis na área considerada. Encontram-se também disponíveis os valores da agitação marítima ao longo das isolinhas.

Para além do processamento e visualização dos dados relativos a um determinado estado de desenvolvimento do mar na área considerada, a interface Matlab desenvolvida pode ser utilizada para analisar a evolução temporal dos parâmetros das ondas. Esta parte pode ser realizada no módulo quatro da interface, onde se podem também fazer comparações com os resultados fornecidos por vários instrumentos 'in situ'. Algumas destas capacidades gráficas da interface vão ser mostradas nas figuras dos capítulos seguintes.

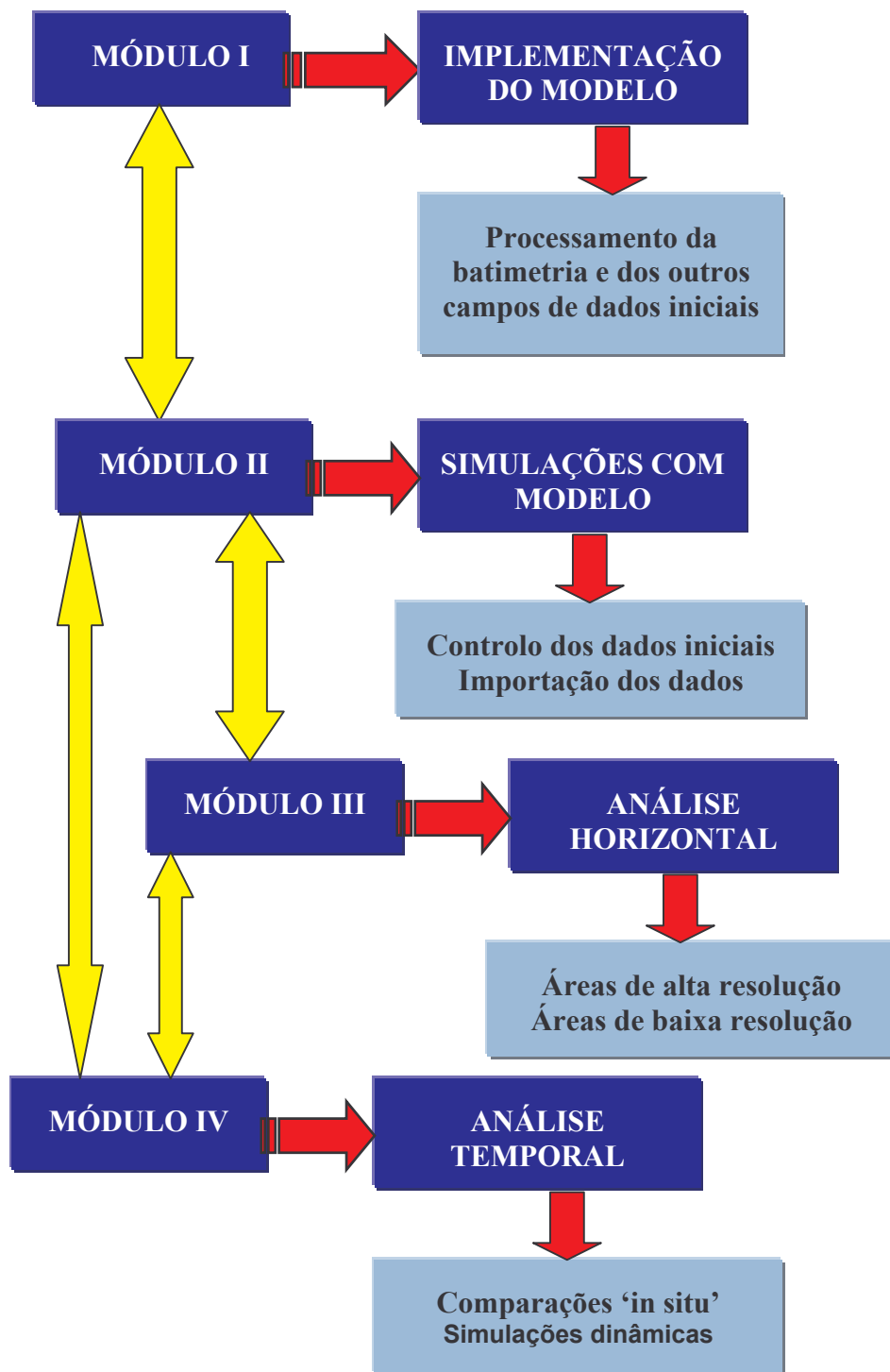


Figura 1  
A estrutura e a hierarquia da interface TOTAL WAVE

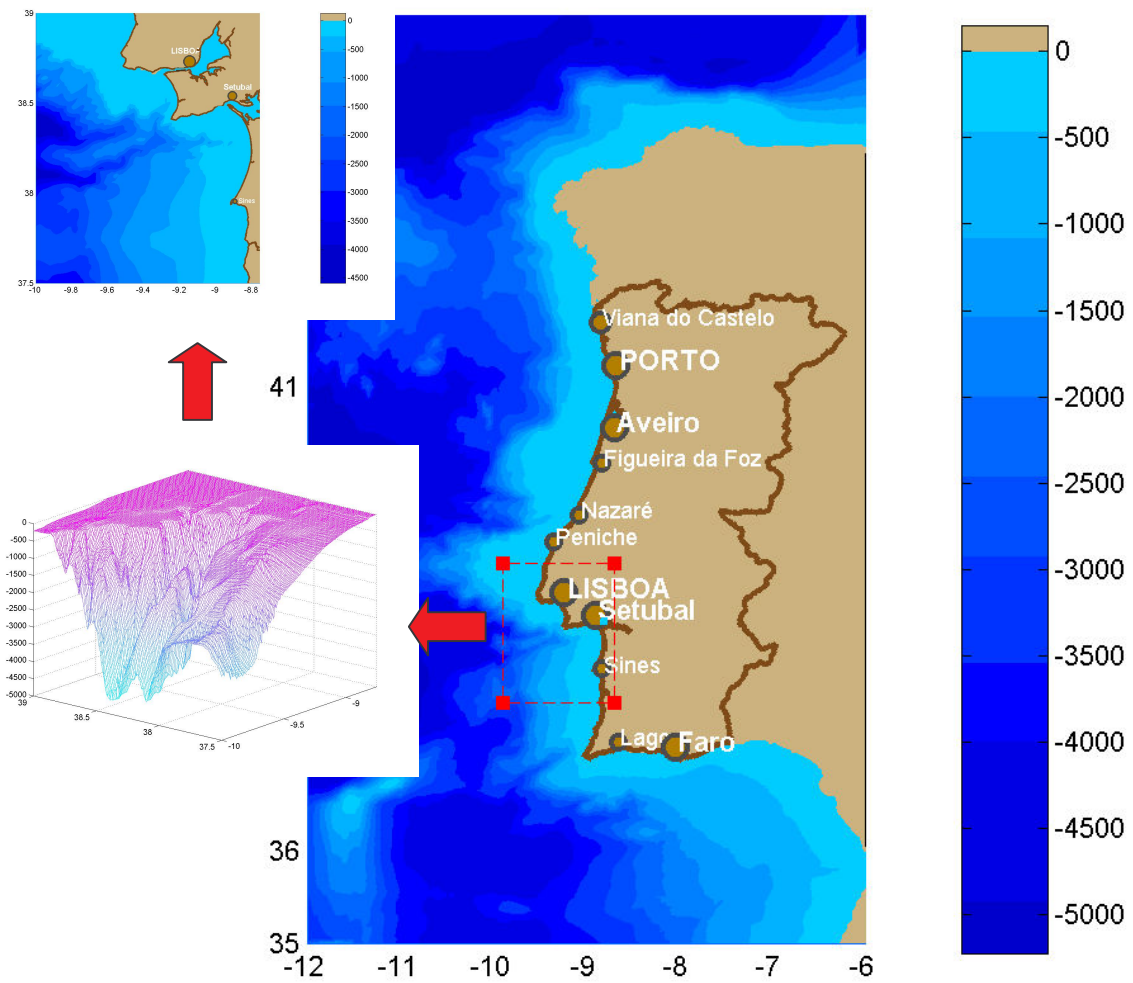


Figura 2  
O processamento da batimetria na área de Portugal continental

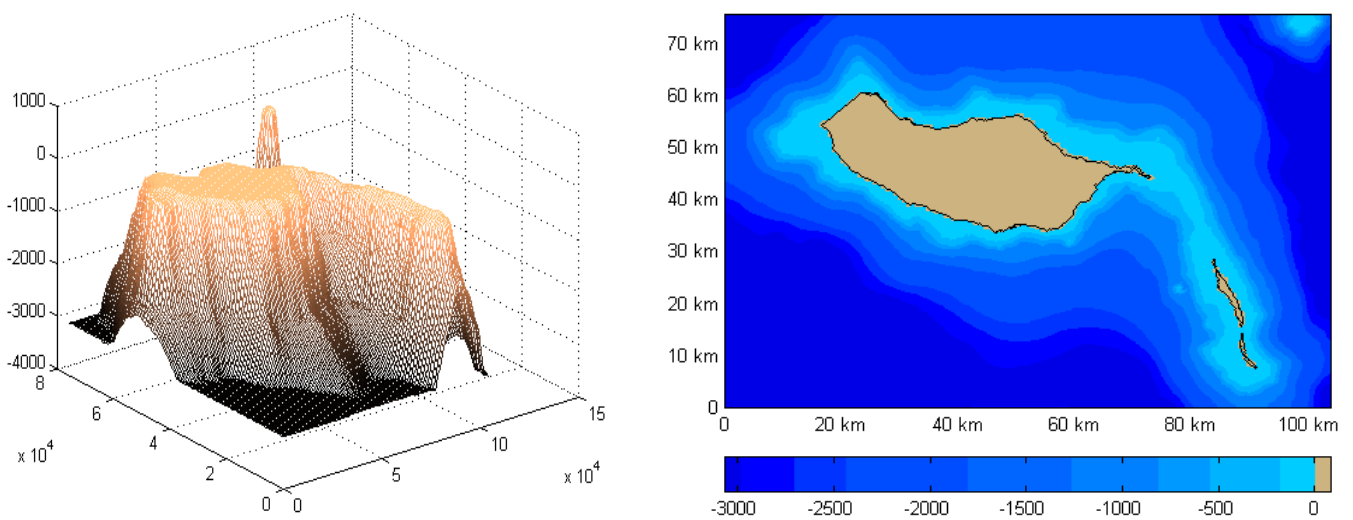


Figura3  
Batimetria na área do arquipélago da Madeira

### **3. APLICAÇÕES DO TOTAL WAVE**

#### **A. OS EXERCÍCIOS NAVAIS DA MARINHA A SUL DE LISBOA**

O Instituto Hidrográfico apoiou os exercícios navais CONTEX/PHIBEX 2002 e SWORDFISH 2003, fornecendo a previsão ambiental à força naval empenhada, no âmbito das operações de 'Rapid Environmental Assessment'. As condições de fronteira para o SWAN foram geradas pelo modelo WW3. O WW3 está implementado na bacia do Atlântico norte, cobrindo a área 20°N - 70°N e -70°W - 0°W com uma resolução espacial de 0.5°. O modelo WW3 é forçado pelo campo do vento NOGAPS, com um intervalo de 12 horas e uma resolução espacial de 1°, enquanto o modelo SWAN é forçado pelas condições de fronteira fornecidas de modelo WW3 e o campo do vento, gerado pelo modelo ALADIN, com uma resolução de 0.1°. Utiliza-se também um modelo digital de terreno para definir as condições de fronteira no fundo do oceano. Devido à necessidade de conhecer em detalhe a ondulação na área dos exercícios e junto à praia para apoio do desembarque anfíbio, estabeleceram-se duas malhas no modelo SWAN. Os exercícios navais em causa foram localizados na zona costeira adjacente à praia de Pinheiro da Cruz, a norte de Sines. Os dados utilizados para fazer comparações foram recolhidos pela bóia ondógrafo de Sines localizada na posição 37° 55' 16" N, 008° 55' 44" W, à profundidade de 87m. Nessa área foram efectuadas simulações com condições de fronteira paramétricas e espectrais em regime não estacionário bem como sequências de simulações em regime estacionário. No caso do exercício Contex/Phibex 2002 os domínios das simulações são apresentados na figura 4. Neste caso foi considerada também a influência das correntes resultantes das simulações com o modelo HOPS (Harvard Ocean Prediction System). Na figura 5 estão representados os resultados de uma simulação na área de alta resolução (área Pinheiro da Cruz) encontrando-se também disponíveis os valores de alguns parâmetros de agitação marítima ao longo de uma linha de referência situada no centro do domínio. Para o exercício SWORDFISH 2003 foi utilizado um esquema diferente para as corridas do modelo SWAN. A simulação de baixa resolução foi efectuada numa área maior com duas áreas interiores de alta resolução, como se ilustra na figura 6. Os campos de altura significativa, direcção da ondulação (setas pretas) e a direcção do vento (setas brancas) para as áreas de alta resolução são apresentados respectivamente nas figuras 7 e 8. Comparações das previsões a 12, 24, 36, 48, 60 e 72 horas do modelo SWAN com as medições na bóia ondógrafo de Sines, para o período 1-15 de Abril de 2003 são apresentados na figura 9.

#### **B. O EXERCÍCIO DA NATO "UNIFIED ODYSSEY 2002"**

Nos fins de Janeiro e início de Fevereiro de 2002 decorreu o exercício de NATO 'Unified Odyssey 2002', no arquipélago de Madeira, mais precisamente na parte meridional da Ilha de Porto Santo. Os produtos de previsão fornecidos pelo IH estavam baseados em simulações com o modelo espectral SWAN. As condições iniciais relativas ao 'nowcast' e previsões por três dias de 12 a 12 horas foram fornecidos pelo 'Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center' (FNMOC). Assim, os parâmetros de onda resultam das simulações WW3 enquanto para o vento foi considerado o campo NOGAPS. A resolução das simulações WW3 foi de 0.92° na direcção norte e 1.25° para oeste. Porém, na área da Ilha do Porto Santo, esta resolução foi aumentada para 0.33° (norte) e 0.42° (oeste).

Nesta região o IH tem duas bóias ondógrafo localizadas na parte sul da Ilha da Madeira, uma no Funchal e outra perto de Caniçal. A presença destas bóias permitiu a execução de duas simulações em paralelo, a primeira na área de Porto Santo durante o exercício e a segunda na área da ilha da Madeira, para comparar os resultados do modelo com a bóia direccionada (figura 9).

As simulações de SWAN foram efectuadas com condições de fronteira espectrais e paramétricas. Neste último caso foi construído um espectro de Pierson-Moskowitz a partir dos parâmetros integrais de WW3. Um exemplo de simulação para dia de 3 de Fevereiro de 2002 é ilustrado na figura 10 para a área da ilha da Madeira e na figura 11 para a área da ilha do Porto Santo. As previsões de agitação marítima foram em geral confirmadas pelos dados da bóia direccionada e pelas observações 'in situ' em Porto Santo.

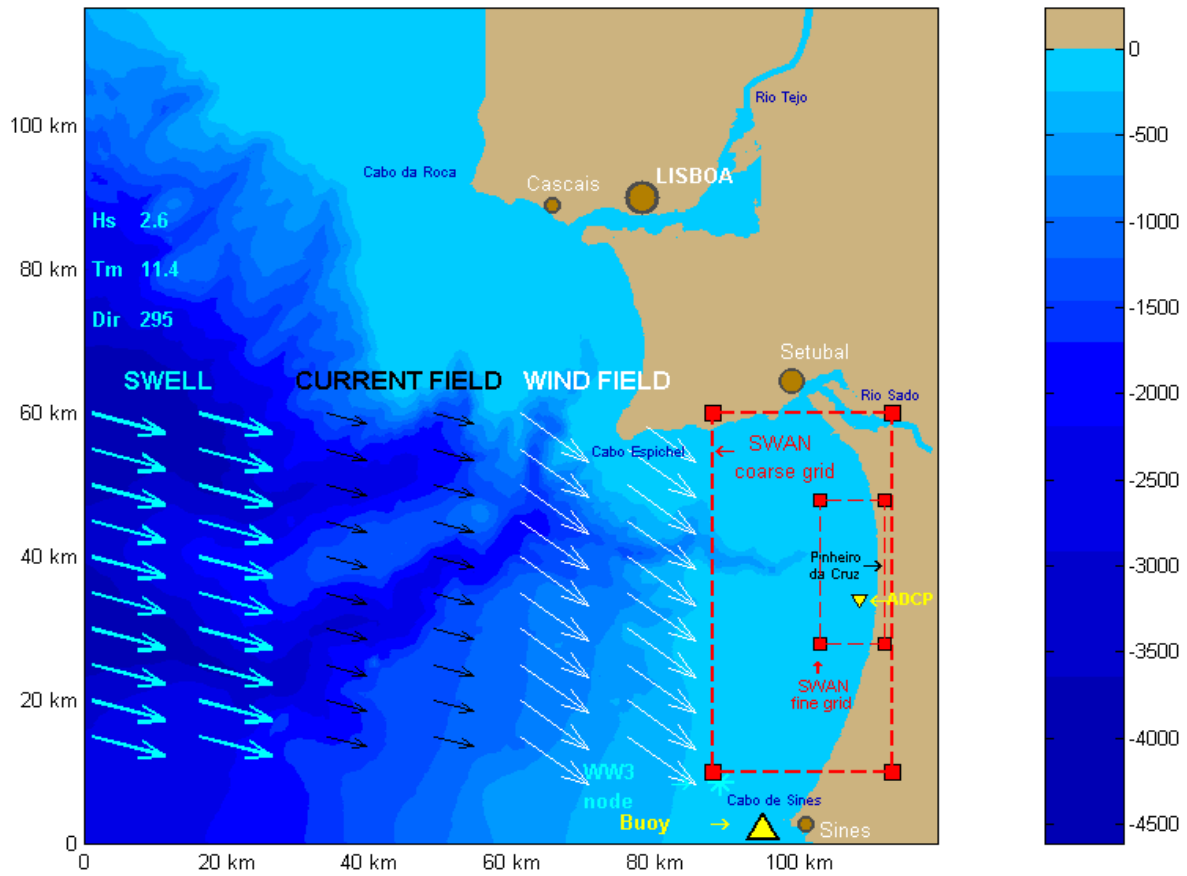


Figura 4  
Domínio de modelação para o exercício Contex/Phibex 2002

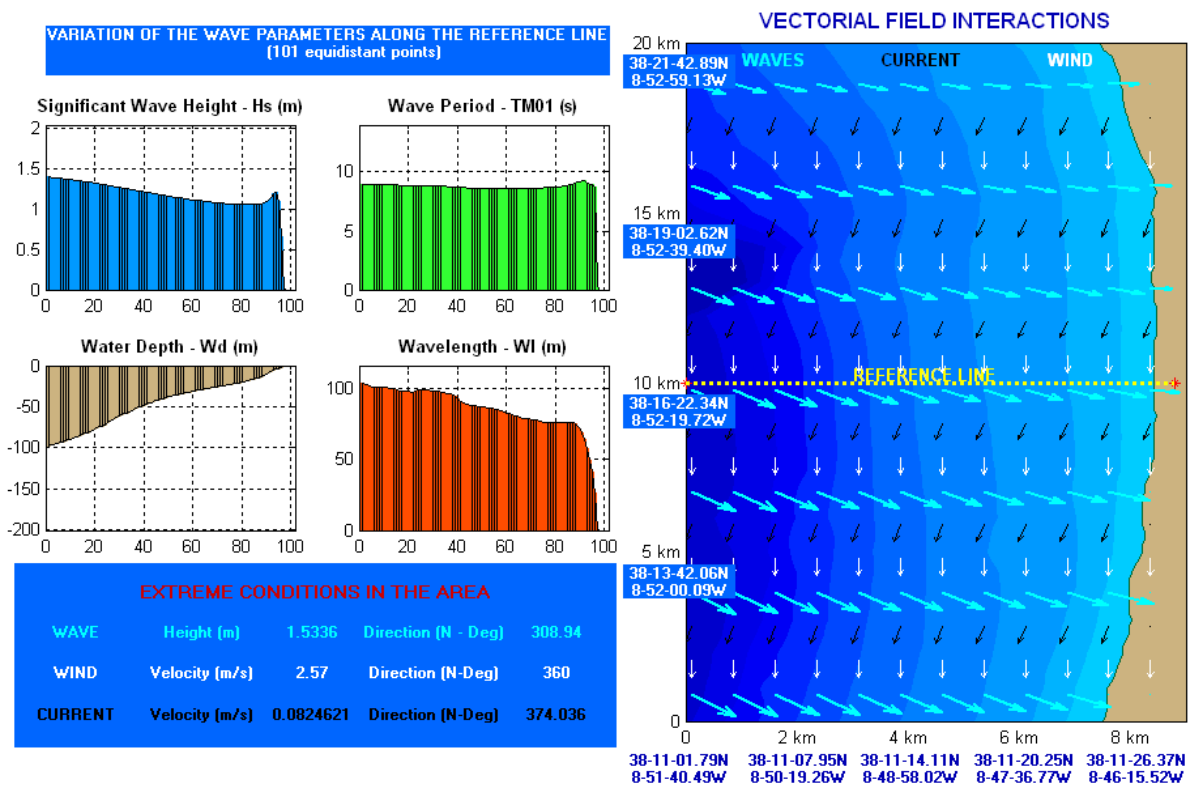


Figura 5  
Resultados do modelo SWAN, Pinheiro da Cruz 2002/04/15 24h forecast

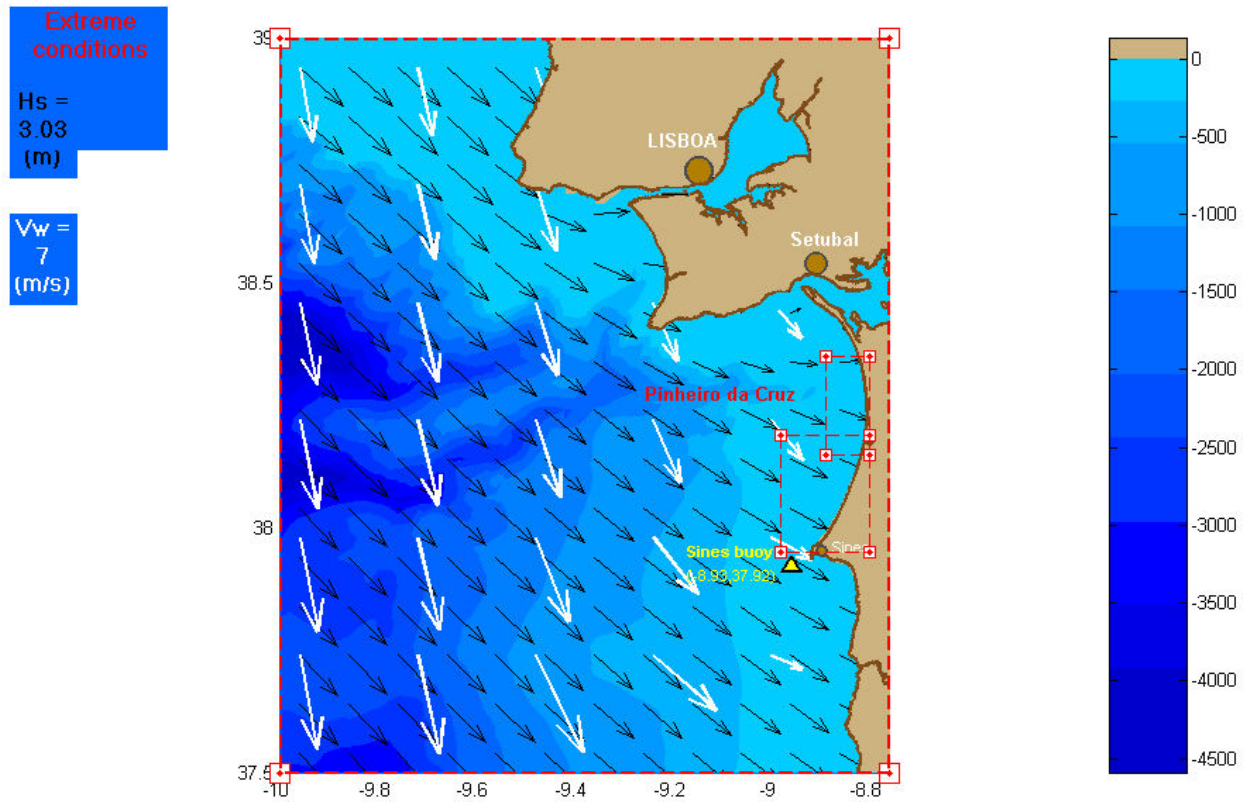


Figura 6  
 Domínio de modelação para o exercício Swordfish 2003

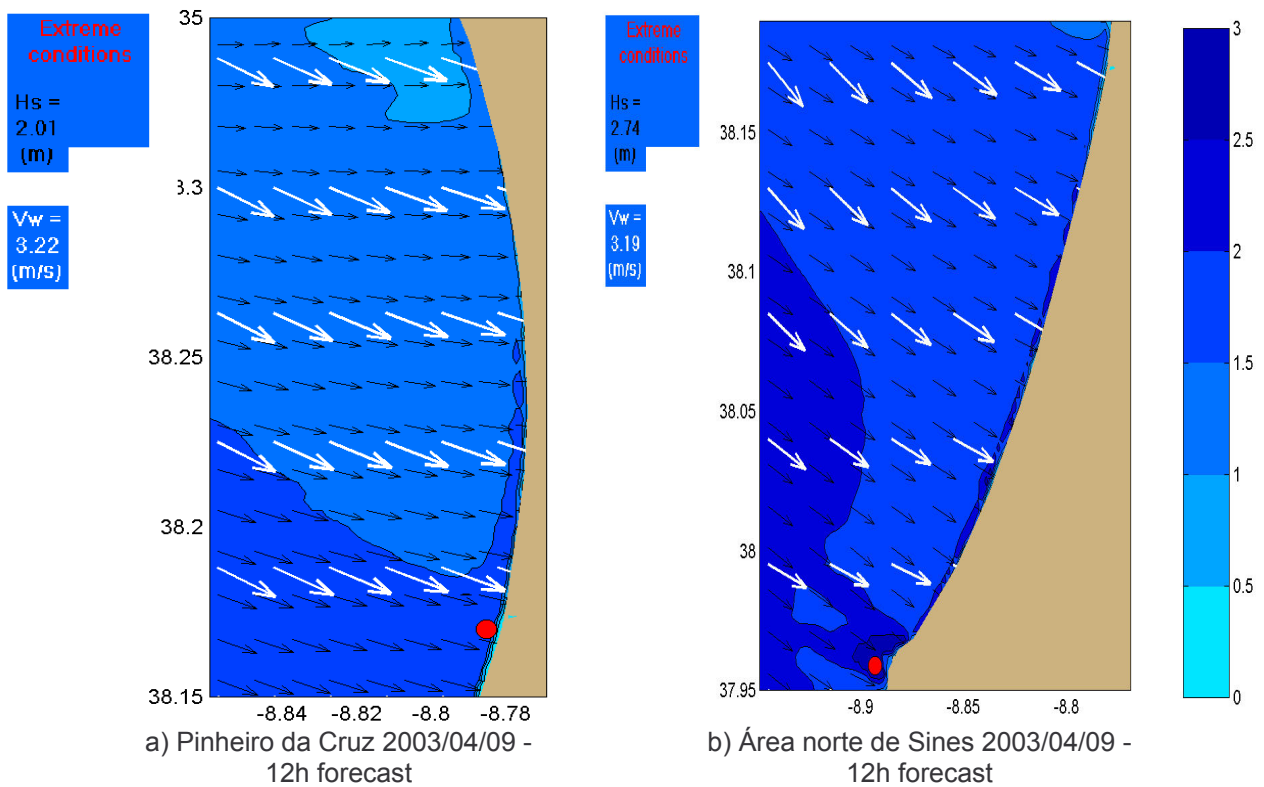


Figura 7  
 Campos de altura significativa, direcção da ondulação (vectors a negro) e direcção do vento (vectors a branco)

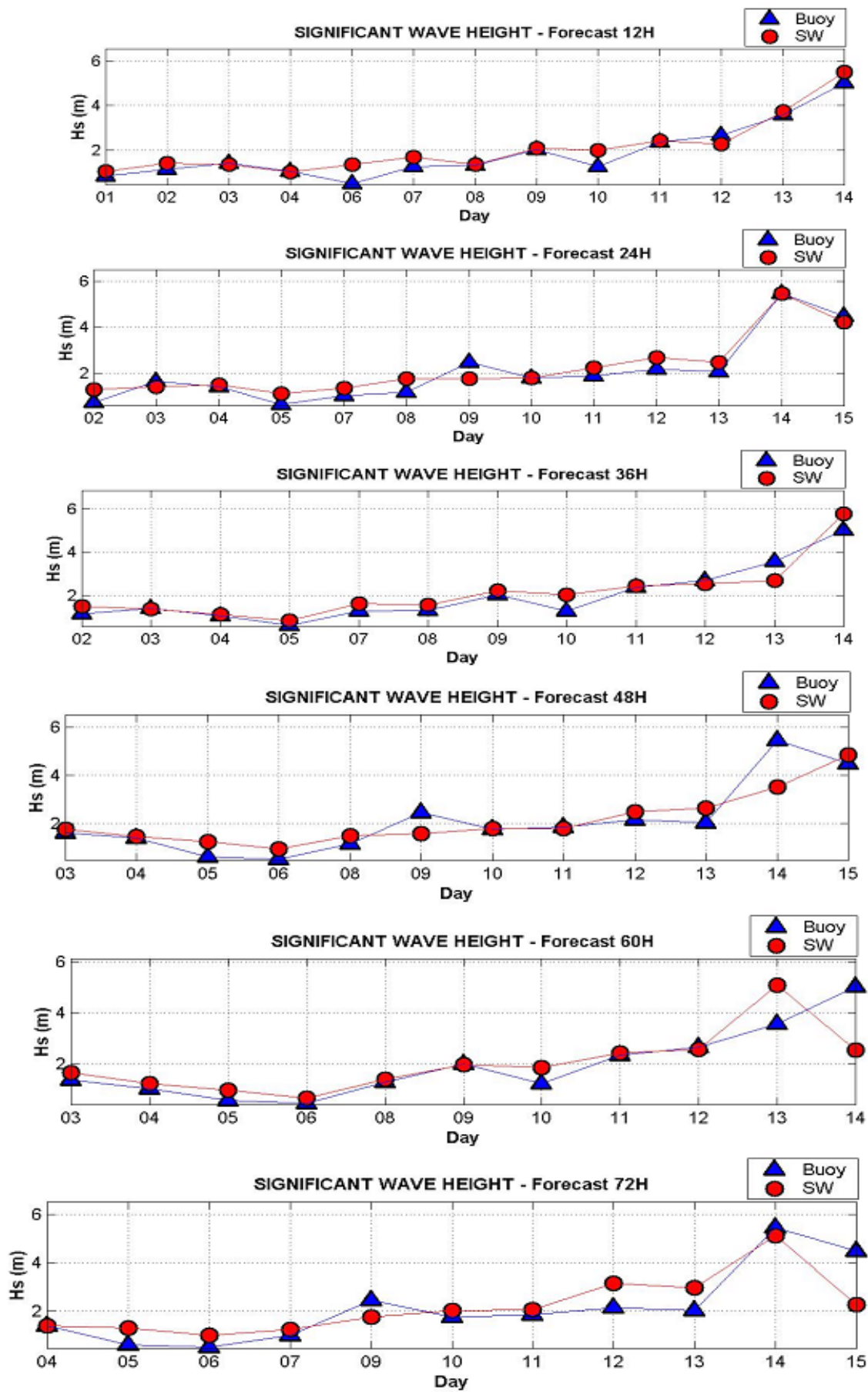


Figura 8

Comparação das previsões a 12, 24, 36, 48, 60 e 72 horas do modelo SWAN com as medições na bóia ondógrafo de Sines, 2003/04/1-15

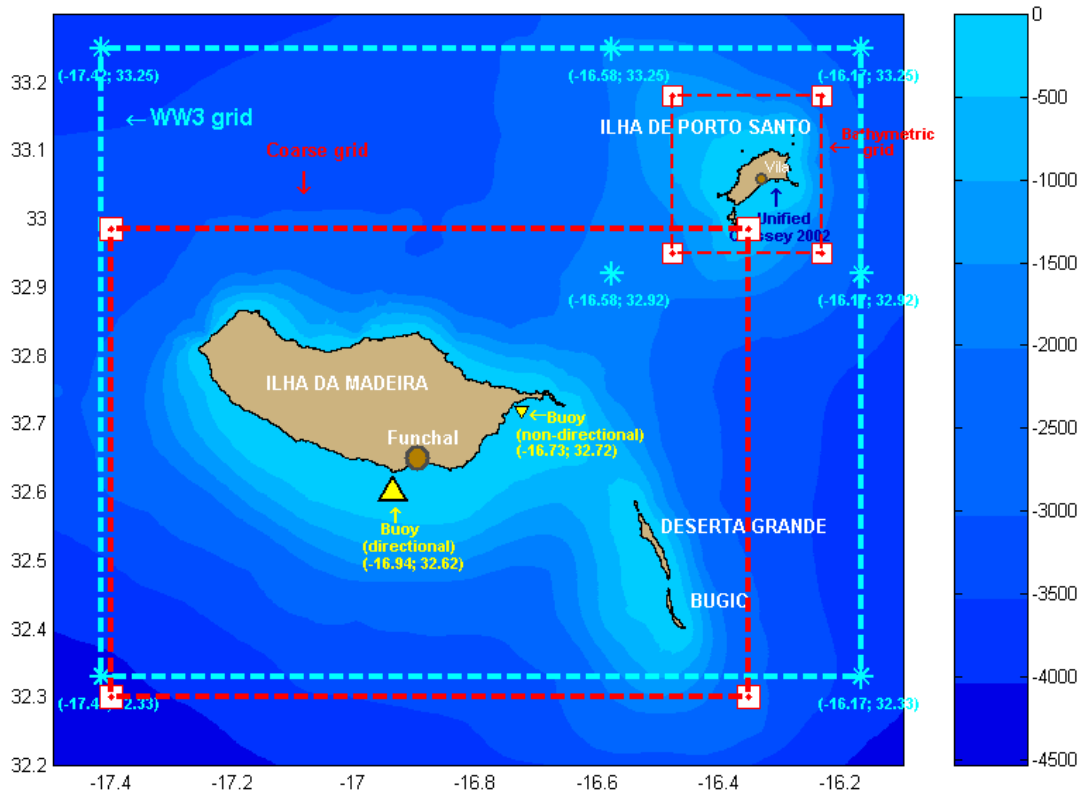


Figura 9  
Domínio de modelação para o exercício de NATO Unified Odyssey 2002

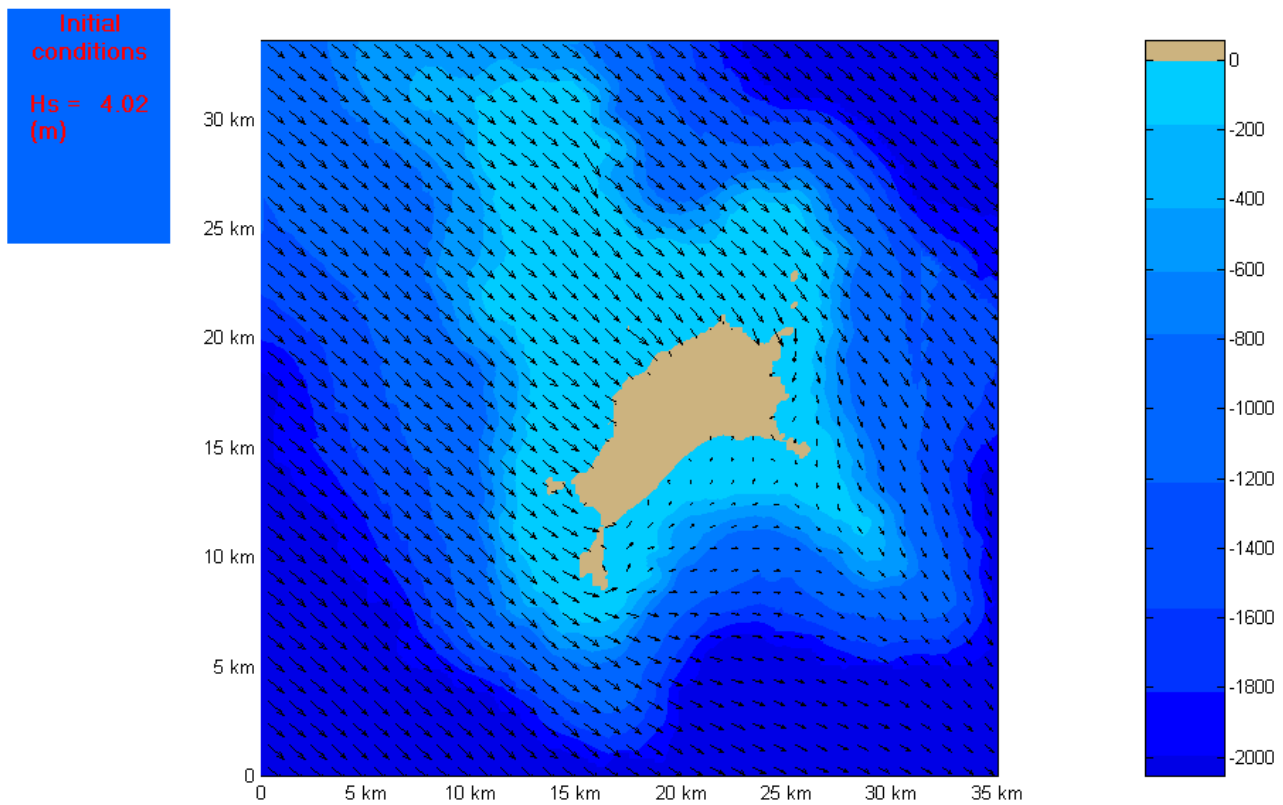


Figura 10  
Simulação SWAN, Ilha do Porto Santo 2002/02/03 -24h forecast

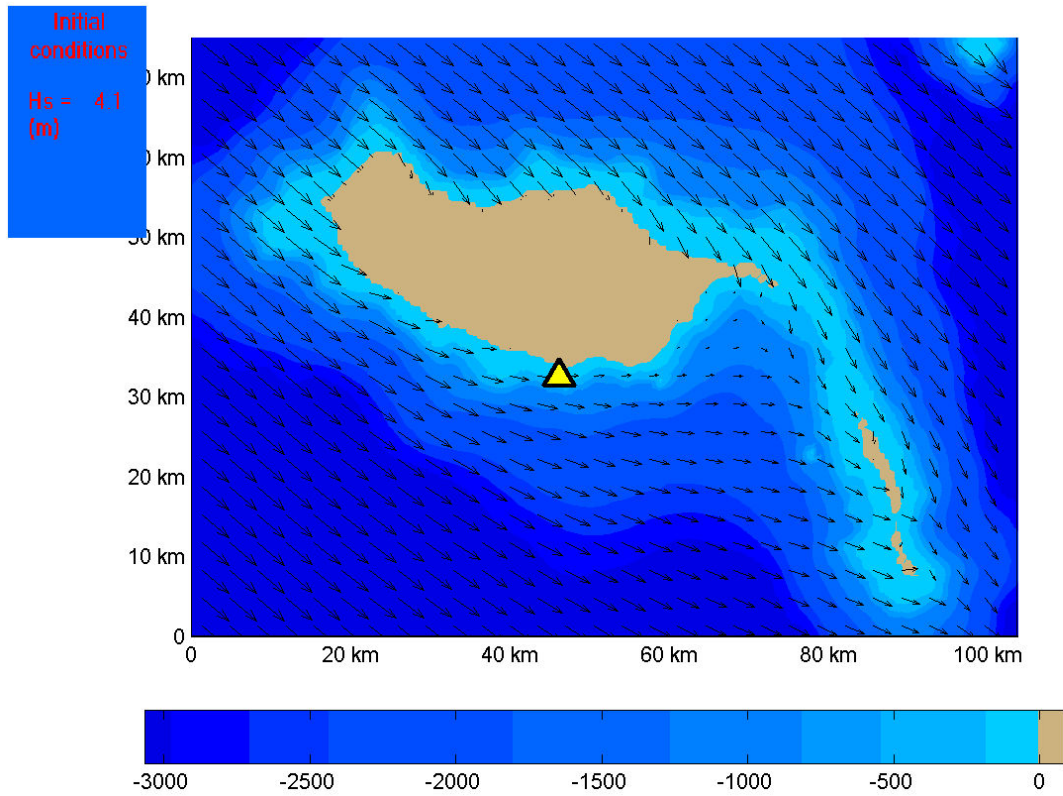


Figura 11  
Simulação SWAN, Ilha da Madeira 2002/02/03 -24h forecast

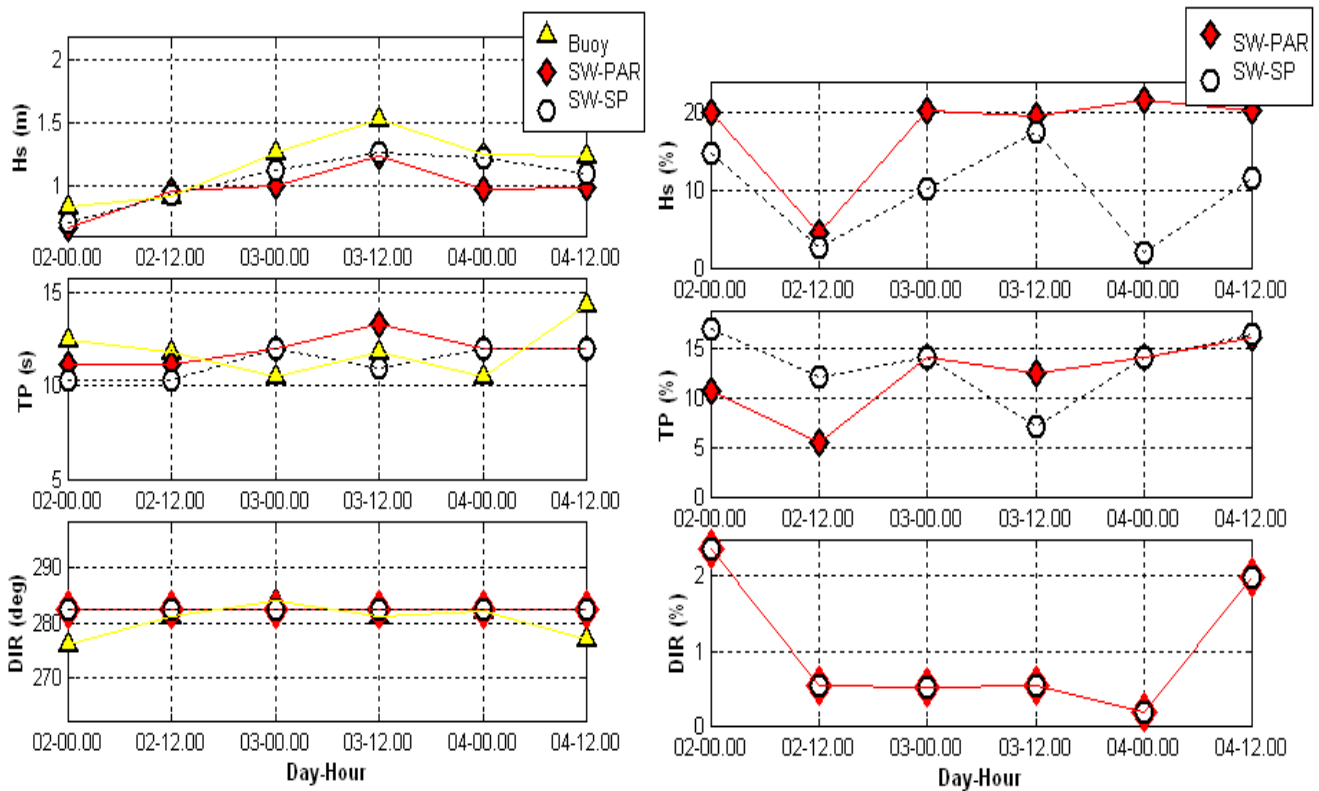


Figura 12  
Comparação das previsões a 24 horas do modelo SWAN com as medições na bóia ondógrafo de Funchal 2002/02/2-4

### C. O ACIDENTE DO PETROLEIRO PRESTIGE

Em meados de Novembro de 2002, perto da costa espanhola e não muito longe da zona económica exclusiva portuguesa, ocorreu o acidente do petroleiro 'Prestige'. O alerta ambiental que se seguiu a este evento foi uma oportunidade para testar a viabilidade do sistema operacional de avaliação e previsão das condições de agitação marítima junto a costa, bem como da ferramenta computacional associada aos modelos numéricos de agitação marítima. Usando a metodologia desenvolvida nos exercícios da Marinha descritos anteriormente, isto é, o SWAN encaixado em WW3, foram produzidos produtos de previsão relativo às condições de agitação marítima na região afectada pela calamidade. O esquema desenvolvido é apresentado na figura 13, um domínio de baixa resolução para toda área de noroeste da Península Ibérica e dois domínios de alta resolução para a costa oeste e norte, respectivamente. Os campos de altura significativa e a direcção da ondulação (vectores a negro) são apresentados nas figuras 14 e 15, respectivamente. Duas bóias localizadas na área de interesse, Sillero (perto de Vigo, 9.39W, 42.1N) e o Leixões (na área do Porto, 8.895W, 41.315N) forneceram 'on line' informações relacionados com os parâmetros de agitação marítima. Comparações das previsões a 24 horas do modelo SWAN com medições nas bóias ondógrafo de Leixões e de Sillero para o mês de Dezembro de 2002 são ilustradas nas figuras 15 e 16, respectivamente. Além dos erros relativos foram também avaliados parâmetros estatísticos definidos pelas relações seguintes:

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{(i)\text{med}} - P_{(i)\text{sim}})}{n} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{(i)\text{med}} - P_{(i)\text{sim}})^2}{n}} \quad (2)$$

### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Modelos numéricos com capacidade para considerarem os efeitos sentidos em águas pouco profundas são habitualmente utilizados para estimar os parâmetros das ondas perto da costa. Com base nos resultados típicos do modelo espectral SWAN foi elaborada uma interface gráfica, em ambiente MATLAB, que permite estimar facilmente as características de agitação marítima em águas pouco profundas (altura significativa da onda, direcção média, período, etc.). Pode também ser efectuada uma análise espectral. Nas suas últimas versões, o modelo SWAN ultrapassa a sua condição de modelo de alta resolução, sendo aumentada a sua aplicabilidade para áreas muito mais vastas. Aproveitando esta possibilidade de utilizar o modelo SWAN em áreas alargadas, foi implementado um domínio único para monitorização das condições de agitação marítima na área de Portugal continental (figura 17). As condições de fronteira para este domínio são fornecidas pelo modelo de escala oceânica WW3 enquanto para o campo de vento foi considerada uma combinação entre os dados dos modelos NOGAPS (com uma resolução de 1°) e ALADIN (com uma resolução de 0.1°), sendo este modelo corrido em Portugal pelo Instituto de Meteorologia. Condições de fronteira para domínios de resolução média são habitualmente geradas a partir de simulações nesta área e usando o campo de vento ALADIN. Deste modo foi previsto o pico energético mais alto nos últimos 10 anos na costa portuguesa no dia 10 de Março de 2003, cujos campos de altura significativa para a área de Portugal continental e para a área costeira de Lisboa, são ilustrados na figura 18. Neste caso, alturas significativas maiores de 7 metros foram registrados junto à costa. O trabalho para desenvolver este sistema de previsão operacional das condições de agitação marítima junto a costa Portuguesa (LUSOWAVES) continua com novas implementações na área de Portugal continental, prevendo-se ainda a implementação de um modelo regional no arquipélago dos Açores.

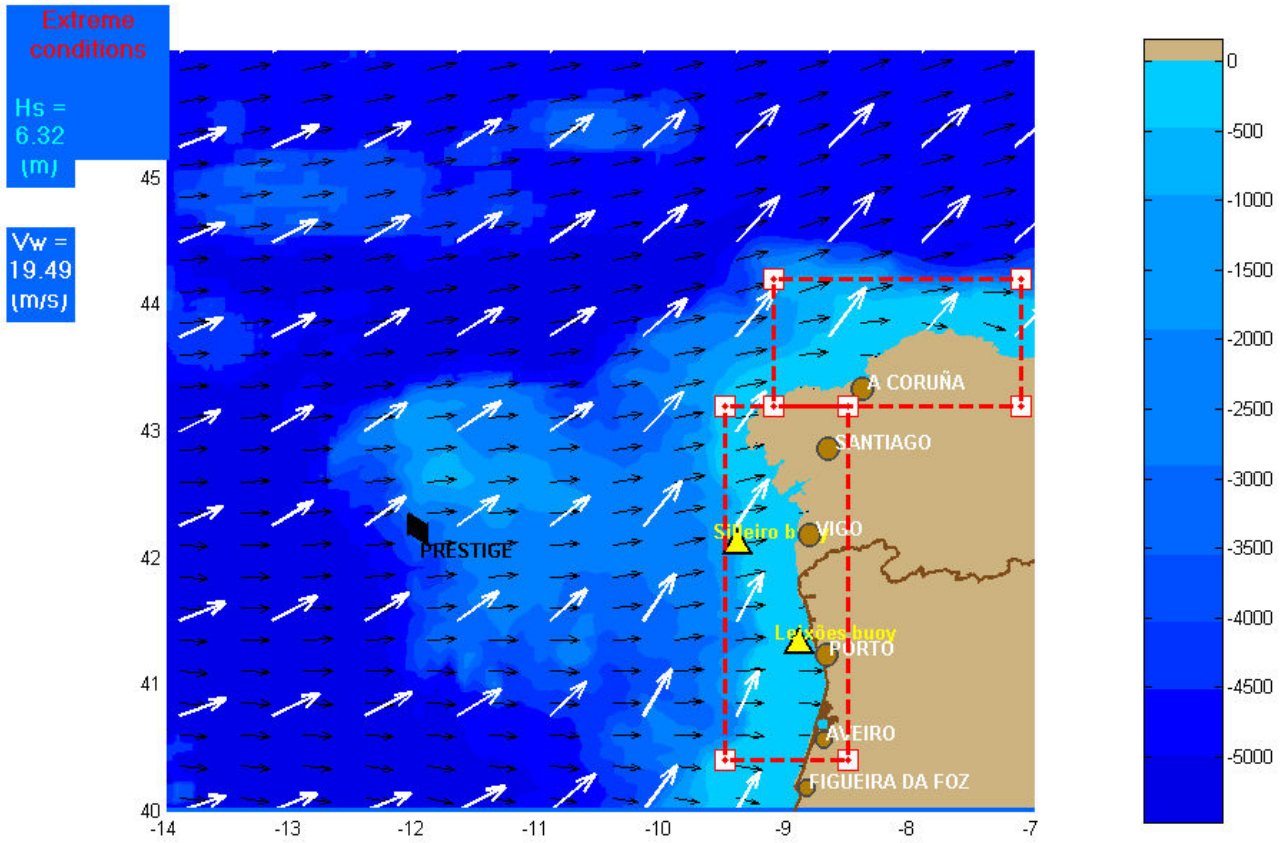


Figura 13  
 Simulações SWAN no caso do acidente do petroleiro Prestige, Norte da Península Ibérica

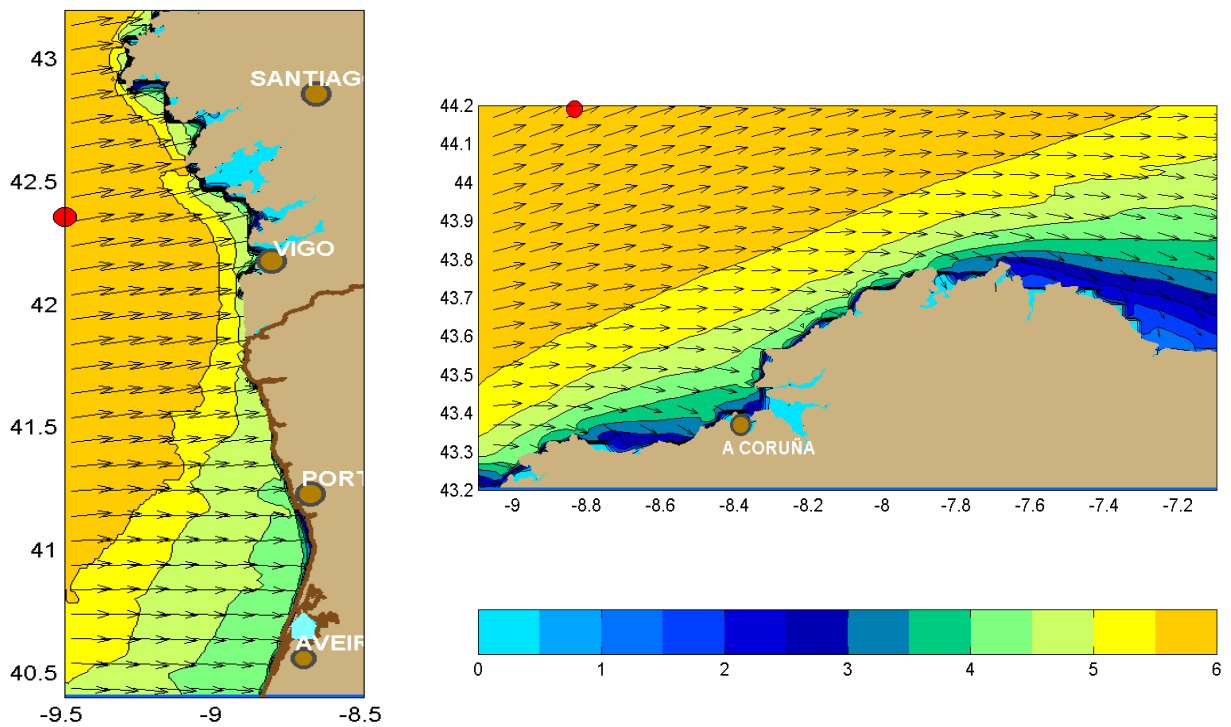
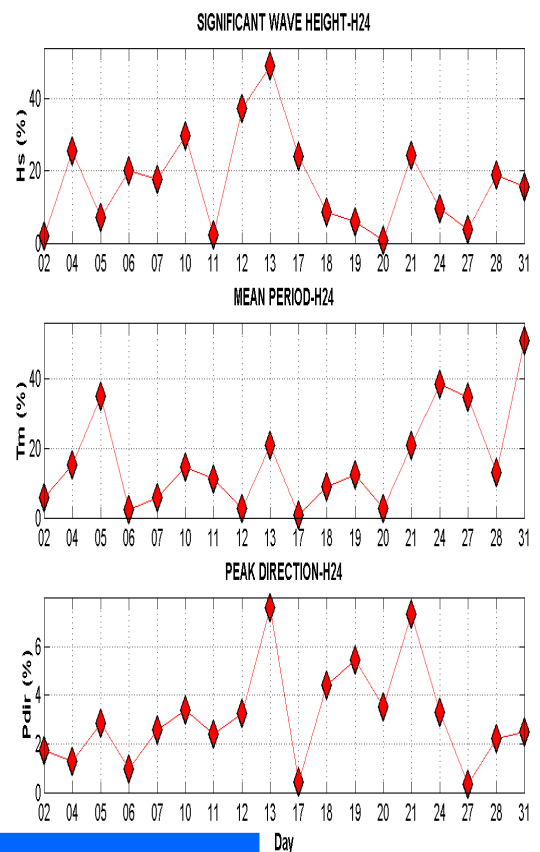
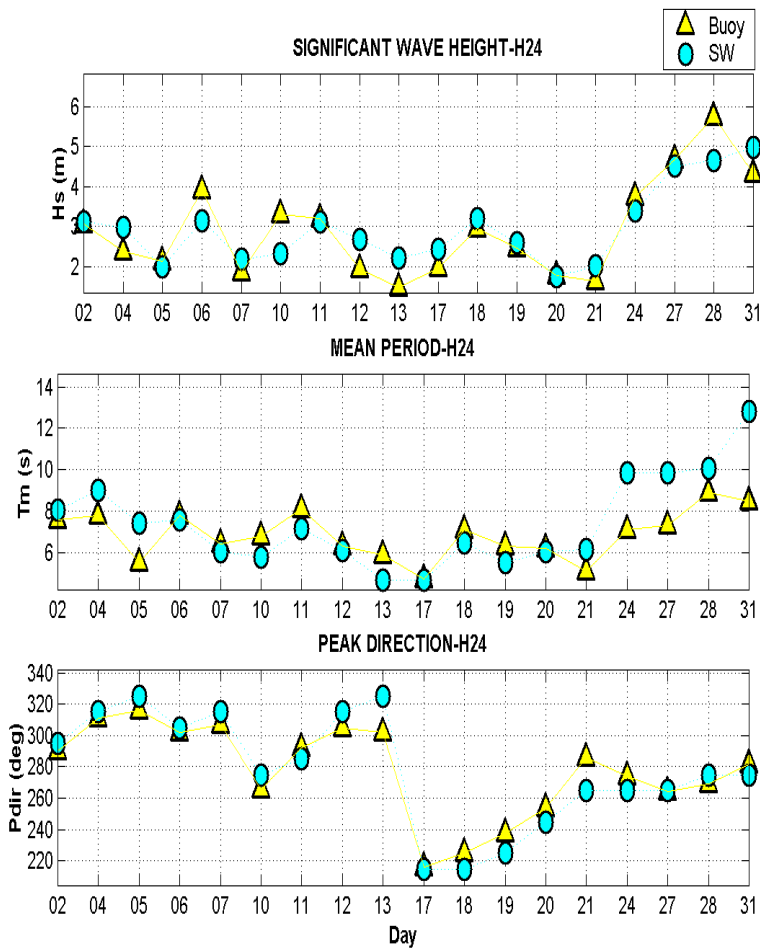
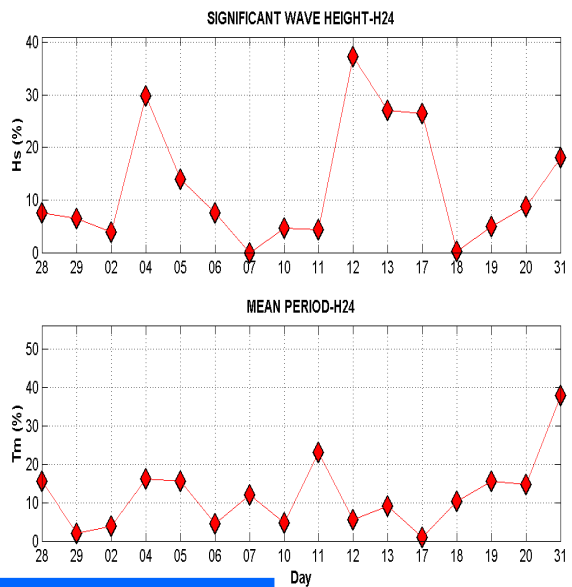
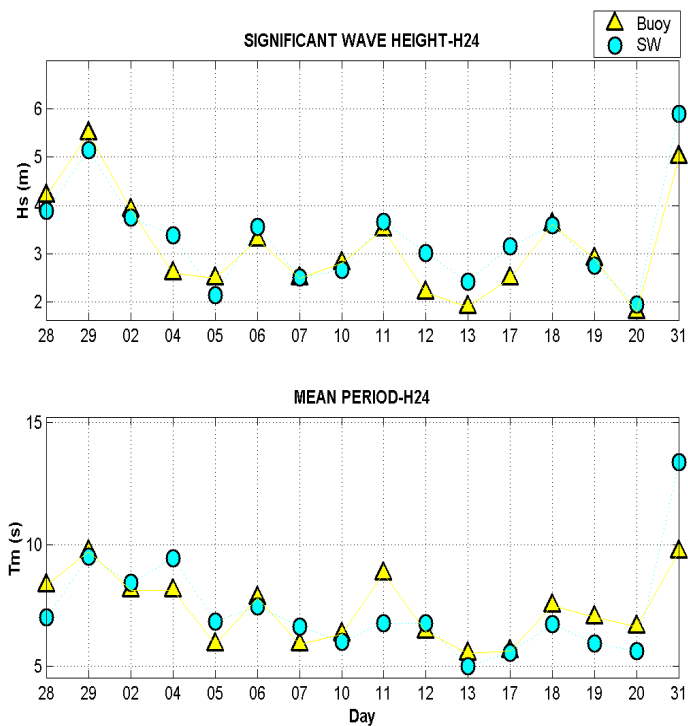


Figura 14  
 Simulações SWAN ao longo da costa de Oeste e respectivamente Norte, 2002/12/30 -24h forecast



Hs: Bias= -0.041	RMSE= 0.547
SW: Tm: Bias= -0.549	RMSE= 1.587
Pdir: Bias= -0.056	RMSE= 10.309

Figura 15  
 Comparação das previsões a 24 horas do modelo SWAN com as medições na bóia  
 ondógrafo de Leixões 2002/12/



SW: Hs: Bias= -0.173	RMSE= 0.455
Tm: Bias= 0.018	RMSE= 1.276

Figura 16  
 Comparação das previsões a 24 horas do modelo SWAN com as medições na bóia de Sillero  
 2002/12

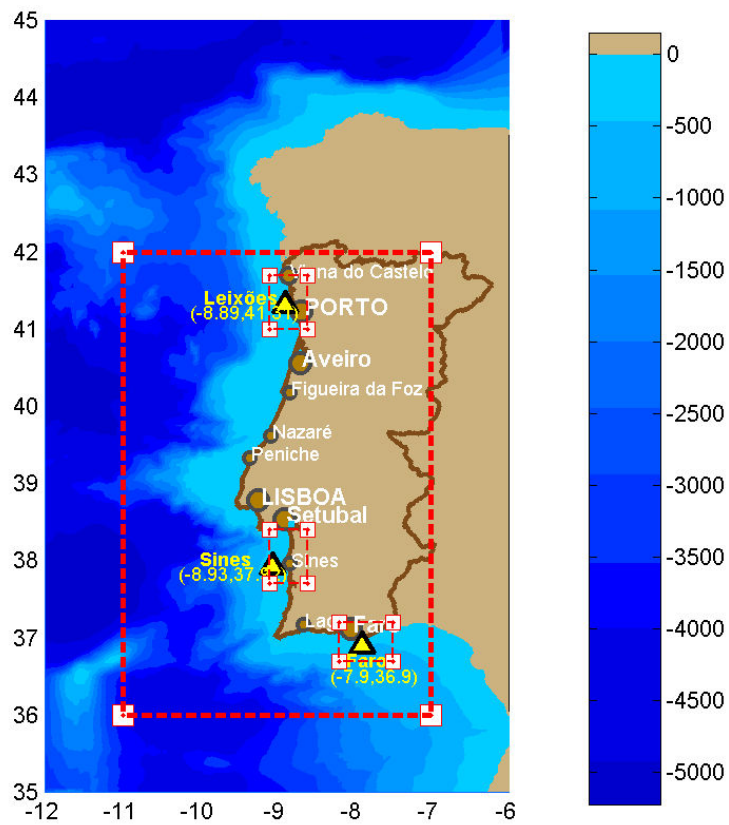


Figura 17  
Monitorização das condições de agitação marítima junto a costa de Portugal continental

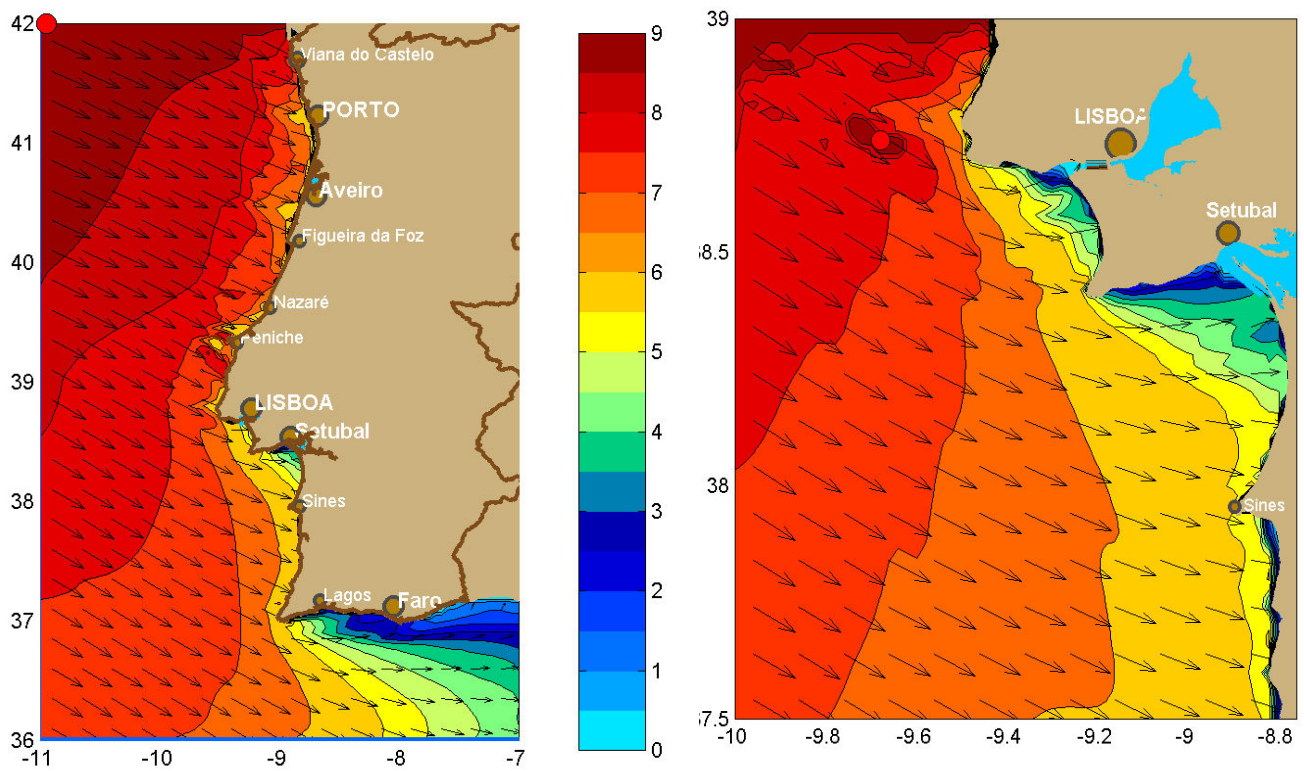


Figura 18  
Condições extremas de agitação marítima 2003/03/10 -36h forecast

## BIBLIOGRAFIA

- Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C., Haagsma, I.J.G., Kieftenburg, A.T.M.M. and E.E. Kriez, (2001) - *User Manual for SWAN*, version 40.11. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 124p.
- Kirby, J. T. and R. A. Dalrymple, (1994) - *Combined Refraction/Diffraction Model - REF/DIF*, version 2.5, Documentation and User's Manual. Centre for Applied Coastal Research, University of Delaware, Newark, DE 19716 CACR Report No. 94-22, 171p.
- Komar, P.D., (1998) - *Beach Processes and Sedimentation*. Library of Congress Cataloguing-in-Publication Data, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 545p.
- Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and P.A.E.M. Janssen, (1994) - *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press, 532p.
- Rusu, E., Soares C. V. and J. P. Pinto, (2002a) - *An Interactive Computational Environment to Evaluate the Nearshore Wave Propagation*. 3<sup>a</sup> Assembleia Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica, Valencia, Spain, 4-8 February, pp. 344-347.
- Rusu, E., Soares, C.V., Pires Silva, A.A., Pinto, J. P. and O. Makarynsky, (2002b) - *Near Real Time Assessment of the Wave Propagation in the Coastal Environment of Portugal*. The 6<sup>th</sup> International Conference EUROCOAST, Littoral 2002, Porto, Portugal 22-26 September, Vol. II, pp. 175-184.
- Rusu, E., Pinto, J. P., Silva, R. and Soares, C.V., (2002c) - *A Method to Predict Wave Conditions in Island Environment*. The 7<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Banff, Alberta, Canada 21-25 October, pp. 215-226.
- Soares, C.V., Rusu, E., Santos, L.Q., Pires Silva, A.A. and O. Makarynsky, (2002) - *Coastal Wave Modeling Validation Using New Field Techniques*. The 7<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Banff, Alberta, Canada 21-25 October, pp. 361-372.