



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE  
Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Proc. 0604/014/17349

## **ADAPTARIA**

### **Modelação das alterações climáticas no Litoral da Ria de Aveiro**

#### **Estratégias de adaptação para cheias costeiras e fluviais**

**Tarefa 4 – Simulação da ondulação para o Litoral de Aveiro - clima presente e cenários climáticos futuros**

Fundação para a Ciência e a Tecnologia

Lisboa • abril de 2012

**I&D** HIDRÁULICA E AMBIENTE

**RELATÓRIO 102/2012 – DHA/NEC**



**ADAPTARia**  
**Modelação das Alterações Climáticas no Litoral da Ria de Aveiro**  
**Estratégias de Adaptação para Cheias Costeiras e Fluviais**

Tarefa 4 - Simulação da ondulação para o Litoral de Aveiro - clima presente e cenários climáticos futuros

**ADAPTARia**  
**Climate Change Modelling on Ria de Aveiro Littoral**  
**Adaptation Strategy for Coastal and Fluvial Flooding**

Task 4 - Wave Hindcast and Forecast for the Aveiro Littoral



**ADAPTARia**  
**Modelação das Alterações Climáticas no Litoral da Ria de Aveiro**  
**Estratégias de Adaptação para Cheias Costeiras e Fluviais**

Tarefa 4 - Simulação da ondulação para o Litoral de Aveiro - clima presente e cenários climáticos futuros

Índice

1. Objectivos.....	5
2. Metodologia.....	6
3. Resultados.....	7
4. Conclusões.....	14
Referências .....	15

# **ADAPTARia**

## **Modelação das Alterações Climáticas no Litoral da Ria de Aveiro**

### **Estratégias de Adaptação para Cheias Costeiras e Fluviais**

Tarefa 4 - Simulação da ondulação para o Litoral de Aveiro - clima presente e cenários climáticos futuros

#### **Índice de Figuras**

Figura 1 – Comparação do WW3 com dados da bóia de Leixões.....	7
Figura 2 – Comparação do WW3 com dados da bóia de Sines .....	7
Figura 3 – Comparação com o modelo ECHAM5: altura significativa das ondas .....	8
Figura 4 – Comparação com o modelo ECHAM5: direcção média das ondas.....	8
Figura 5 – Comparação com o modelo CCSM3: altura significativa das ondas.....	8
Figura 6 – Comparação com o modelo CCSM3: direcção média das ondas .....	8
Figura 7 – Calibração do modelo ECHAM5 (3): altura significativa das ondas .....	9
Figura 8 – Calibração do modelo ECHAM5: direcção média das ondas.....	9
Figura 9 – Calibração do modelo ECHAM5 (5): altura significativa das ondas .....	9
Figura 10 – Calibração do modelo ECHAM5: direcção média das ondas.....	9
Figura 11 – Calibração do modelo ECHAM5 (6): altura significativa das ondas .....	10
Figura 12 – Calibração do modelo ECHAM5: direcção média das ondas.....	10
Figura 13 – Comparação dos cenários actual e futuro com o modelo ECHAM5 (3): altura significativa das ondas.....	11
Figura 14 – Comparação dos cenários actual e futuro com o modelo ECHAM5 (3): direcção média das ondas.....	11
Figura 15 – Comparação dos cenários actual e futuro com o modelo ECHAM5 (5): altura significativa das ondas.....	11
Figura 16 – Comparação dos cenários actual e futuro com o modelo ECHAM5 (5): direcção média das ondas.....	11
Figura 17 – Comparação dos cenários actual e futuro com o modelo ECHAM5 (6): altura significativa das ondas.....	11

Figura 18 – Comparação dos cenários actual e futuro com o modelo ECHAM5 (6): direcção média das ondas.....	11
Figura 19 – Função densidade de probabilidade (PDF) das simulações 3, 5 e 6 para a climatologia actual .....	13
Figura 20 – Módulo da diferença entre as PDF do NCEP e do ECHAM .....	13

**ADAPTARia**  
**Modelação das Alterações Climáticas no Litoral da Ria de Aveiro**  
**Estratégias de Adaptação para Cheias Costeiras e Fluviais**

Tarefa 4 - Simulação da ondulação para o Litoral de Aveiro - clima presente e cenários climáticos futuros

**Índice de Quadros**

Quadro 1 – Modelos Atmosféricos .....	6
Quadro 2 – Parâmetros médios das várias simulações.....	8
Quadro 3 – Modelo ECHAM5: Parâmetros médios das várias simulações de calibração .....	10
Quadro 4 – Parâmetros médios das simulações do presente e do futuro.....	12



# **ADAPTARia**

## **Modelação das Alterações Climáticas no Litoral da Ria de Aveiro**

### **Estratégias de Adaptação para Cheias Costeiras e Fluviais**

Tarefa 4 - Simulação da ondulação para o Litoral de Aveiro - clima presente e cenários climáticos futuros

#### **1. Objectivos**

O presente relatório descreve o estudo efectuado no âmbito do projecto ADAPTARia relativo à Tarefa 4. É um relatório parcial e referente ao marco 3 do cronograma de trabalhos.

Os objectivos propostos para esta tarefa são os seguintes:

- Simular a ondulação para o passado no Atlântico Norte de forma a determinar o clima de ondas no Litoral da Ria de Aveiro nas últimas 3 décadas;
- Fazer a previsão da ondulação para o final deste século de forma a avaliar as variações no clima de ondas no Litoral da Ria de Aveiro.

Pretende-se obter com esta tarefa:

- A climatologia de ondas no Litoral da Ria de Aveiro, incluindo a representação dos eventos mais energéticos;
- A climatologia de ondas para o final deste século;
- Condições de agitação marítima para forçar os modelos morfodinâmicos (Tarefa 5);
- Condições de agitação marítima para forçar os modelos de inundação (Tarefa 6).

## 2. Metodologia

A concretização desta tarefa dividiu-se em 5 fases:

1. Calibração do modelo WW3 para o domínio do Atlântico Norte;
2. Calibração e definição da climatologia actual forçada com resultados de vento de modelos climáticos;
3. Simulação da climatologia futura forçada com resultados de ventos de modelos climáticos;
4. Análise dos resultados;
5. Definição dos produtos necessários às tarefas 4 e 5.

A calibração do modelo realizou-se com recurso às reanálises do NCEP, para o forçamento dos campos de vento, e aos dados das bóias de Leixões, Figueira da Foz e Sines, para as comparações dos resultados. Efectuaram-se várias simulações para os anos de 1993 a 1995, mesmo período dos dados das bóias. Das várias simulações escolheu-se a configuração com a qual se obtiveram os melhores resultados.

Para as simulações da situação actual e dos cenários futuros utilizaram-se os resultados de vento de dois modelos climáticos, fornecidos pela Tarefa 3 (Quadro 1). O primeiro modelo é o Community Climate System Model (CCSM3) do National Center for Atmospheric Research (NCAR). O segundo modelo é o ECHAM5, desenvolvido no Max Plank Institute for Meteorology. Em ambos os modelos foi considerado o cenário de emissões SRES A2 do IPCC.

	<b>NCEP</b>	<b>ECHAM5</b>	<b>CCSM3</b>
<b>Resolução temporal</b>	6H	6H	6H
<b>Resolução espacial</b>	1,875° x 1,875°	1,875° x 1,875°	1,40625° x 1,40625°
<b>Série temporal</b>	30 anos (1971-2000)	30 + 30 anos (1971-2000) (2071-2100)	30 + 30 anos (1970-1999) (2070-2099)

Quadro 1 – Modelos Atmosféricos

### 3. Resultados

#### Calibração do modelo para a situação actual

Efectuaram-se várias simulações para os anos de 1993 a 1995 com diferentes valores para os parâmetros Betamax, ALPHA0, ZOMAX, SINTHP e ZALP, que controlam a interacção oceano-atmosfera. Compararam-se os resultados destas simulações com os dados das bóias de Leixões, Figueira da Foz e Sines e definiu-se a melhor calibração. As figuras 1 e 2 mostram alguns dos resultados das comparações.

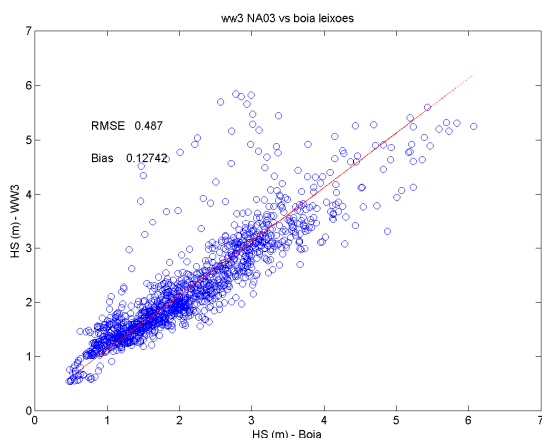


Figura 1 – Comparação do WW3 com dados da bóia de Leixões

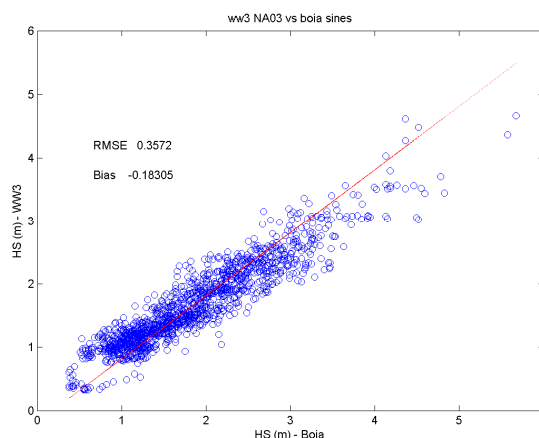


Figura 2 – Comparação do WW3 com dados da bóia de Sines

Com a melhor calibração obtida simularam-se 30 anos, 1971 a 2000, forçados com as reanálises do NCEP. Utilizou-se esta simulação como sendo a simulação de referência.

#### Simulações para as três últimas décadas do séc. 20

Os resultados das simulações com o forçamento de vento dos modelos climáticos mostraram-se um pouco distantes dos resultados obtidos e validados com o forçamento das reanálises do NCEP, simulação de referência. Esta diferença é visível nas figuras 3 a 6 e no quadro 2. A análise dos resultados foi feita para o ponto da malha de cálculo do modelo mais representativo da região de Aveiro. Este ponto tem as coordenadas de 41°N e 10°W.

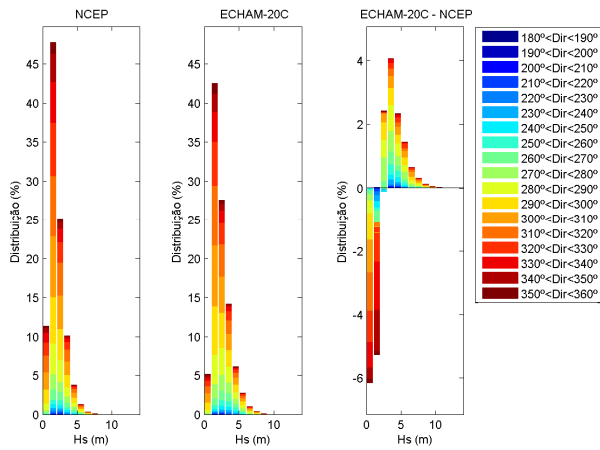


Figura 3 – Comparação com o modelo ECHAM5: altura significativa das ondas

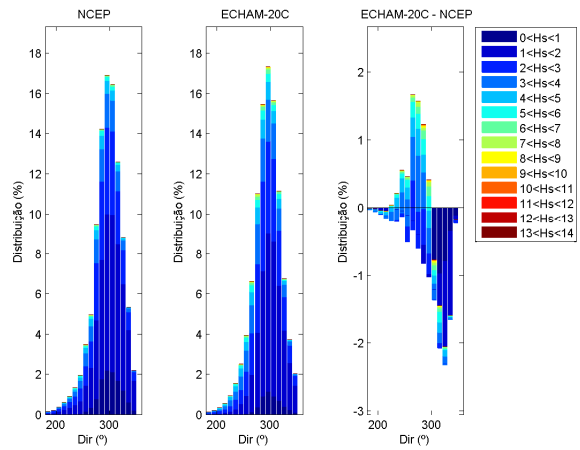


Figura 4 – Comparação com o modelo ECHAM5: direcção média das ondas

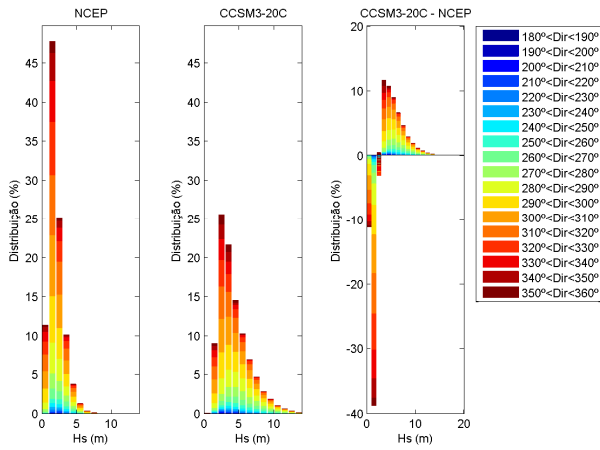


Figura 5 – Comparação com o modelo CCSM3: altura significativa das ondas

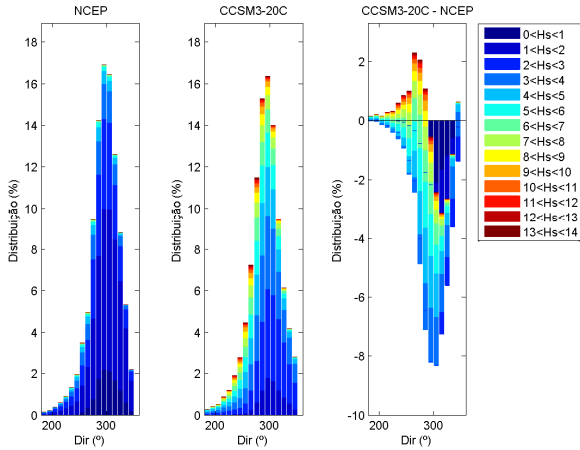


Figura 6 – Comparação com o modelo CCSM3: direcção média das ondas

	Hs				Tm				Dm		
	Mean	Mode	Std	Max	Mean	Mode	Std	Max	Mean	Mode	Std
<b>NCEP</b>	2.03	1.40	1.06	11.30	8.46	7.35	1.90	16.48	300.28	299.20	45.14
<b>ECHAM5-20C</b>	2.38	2.04	1.26	11.49	8.82	7.59	1.90	17.65	297.08	297.00	45.01
<b>CCSM3-20C</b>	<b>4.24</b>	2.59	2.27	<b>22.56</b>	11.43	10.31	2.56	19.59	290.12	301.00	58.18

Quadro 2 – Parâmetros médios das várias simulações

É também notória a diferença entre os resultados das simulações forçadas pelos dois modelos climáticos. Esta diferença deve-se, provavelmente, ao facto de os campos de vento do modelo ECHAM5

serem referentes ao nível de 10 metros e os do modelo CCSM3 serem referentes ao nível mais baixo do modelo. Assim, os resultados não são comparáveis.

Com as diferenças registadas surgiu a necessidade de calibrar o modelo WW3 para os campos de vento dos modelos climáticos, comparando os seus resultados com os obtidos na simulação de referência.

Efectuaram-se seis simulações adicionais forçadas com o modelo ECHAM5 para se obter uma melhor calibração do modelo. Nestas simulações apenas se fez variar um parâmetro do modelo, o Betamax, que define o valor máximo de acoplamento entre o vento e as ondas. As figuras 7 a 12, com os histogramas da distribuição das alturas significativas e das direcções das ondas, mostram alguns dos resultados das simulações.

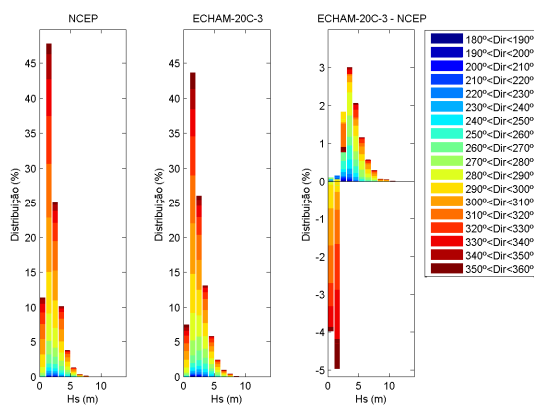


Figura 7 – Calibração do modelo ECHAM5 (3): altura significativa das ondas

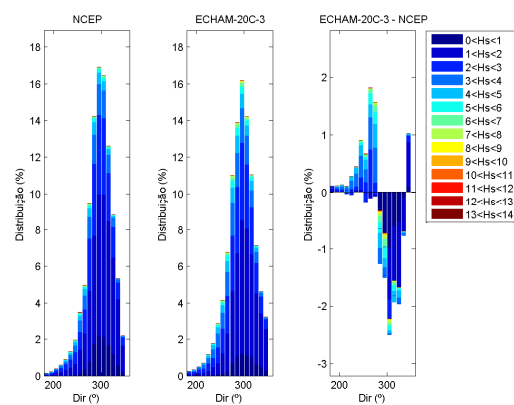


Figura 8 – Calibração do modelo ECHAM5: direcção média das ondas

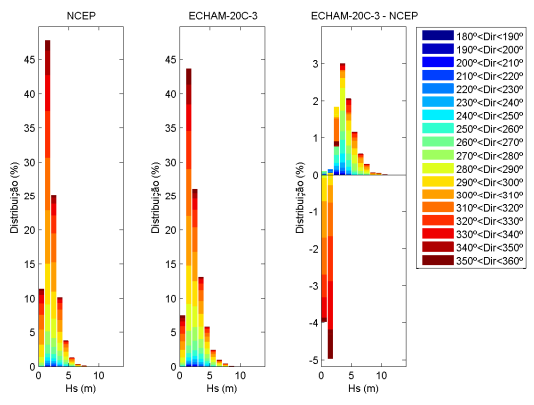


Figura 9 – Calibração do modelo ECHAM5 (5): altura significativa das ondas

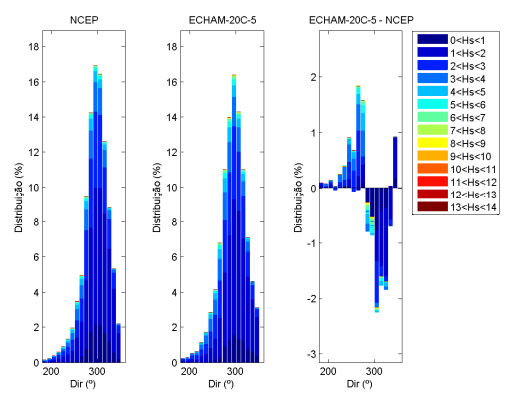


Figura 10 – Calibração do modelo ECHAM5: direcção média das ondas

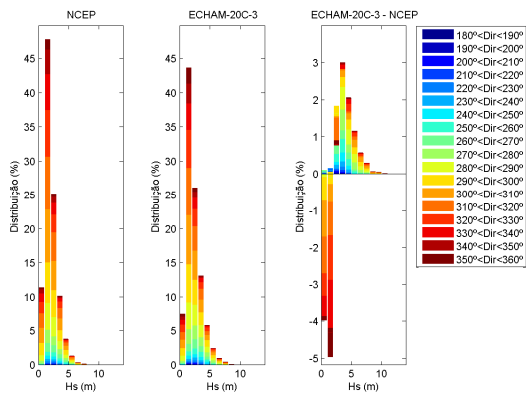


Figura 11 – Calibração do modelo ECHAM5 (6): altura significativa das ondas

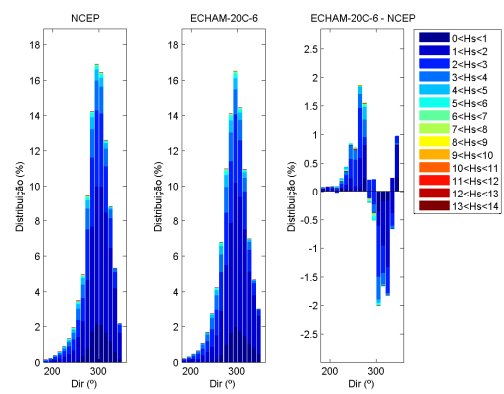


Figura 12 – Calibração do modelo ECHAM5: direcção média das ondas

É possível verificar que existe uma grande melhoria dos resultados obtidos com as novas calibrações, estando as distribuições mais próximas das obtidas na simulação de referência (Quadro 3).

	$\beta_{max}$	Hs				Tm				Dm		
		Mean	Mode	Std	Max	Mean	Mode	Std	Max	Mean	Mode	Std
<b>NCEP</b>	1.2	<b>2.03</b>	<b>1.40</b>	<b>1.06</b>	11.30	8.46	7.35	1.90	16.48	300.28	299.20	45.14
<b>ECHAM5-20C</b>	1.2	2.38	2.04	1.26	11.49	8.82	7.59	1.90	17.65	297.08	297.00	45.01
<b>ECHAM5-20C-3</b>	0.9	2.28	1.45	1.24	11.08	9.08	8.77	2.04	17.85	292.49	310.00	57.74
<b>ECHAM5-20C-5</b>	0.8	2.16	1.36	1.16	10.27	8.89	8.18	1.96	17.33	293.08	305.10	56.41
<b>ECHAM5-20C-6</b>	0.7	<b>2.02</b>	<b>1.39</b>	<b>1.08</b>	<b>9.34</b>	8.67	8.41	1.88	16.47	293.73	304.60	54.91

Quadro 3 – Modelo ECHAM5: Parâmetros médios das várias simulações de calibração

O quadro 3 mostra que a simulação 6 conduz aos parâmetros médios mais próximos dos de referência. Esta simulação subestima o máximo da altura significativa. Dependendo do estudo que se pretenda fazer, e tendo em conta que os máximos têm uma frequência muito baixa, poderá ser pouco relevante.

### Simulações para as três últimas décadas do séc. 21

As simulações dos cenários futuros efectuaram-se com o modelo ECHAM5 e com as 3 calibrações em que se obtiveram resultados mais próximos da simulação de referência, as simulações 3, 5 e 6. As figuras 13 a 18 mostram alguns dos resultados obtidos nestas simulações.

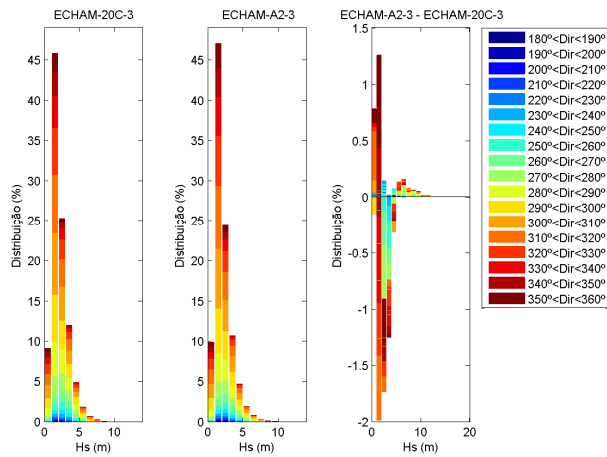


Figura 13 – Comparação dos cenários actual e futuro com o modelo ECHAM5 (3): altura significativa das ondas.

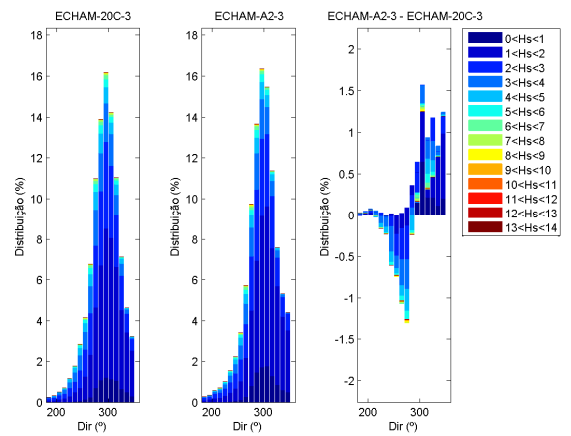


Figura 14 – Comparação dos cenários actual e futuro com o modelo ECHAM5 (3): direcção média das ondas.

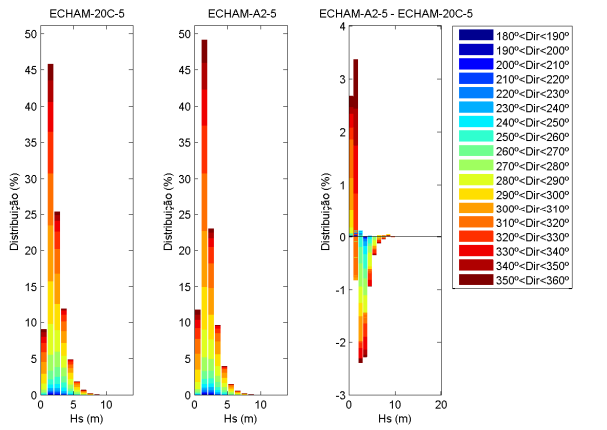


Figura 15 – Comparação dos cenários actual e futuro com o modelo ECHAM5 (5): altura significativa das ondas.

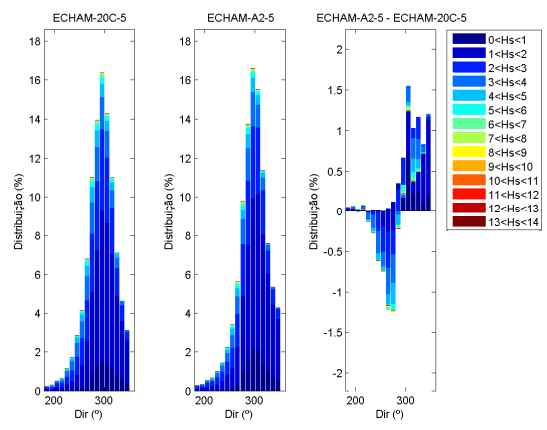


Figura 16 – Comparação dos cenários actual e futuro com o modelo ECHAM5 (5): direcção média das ondas.

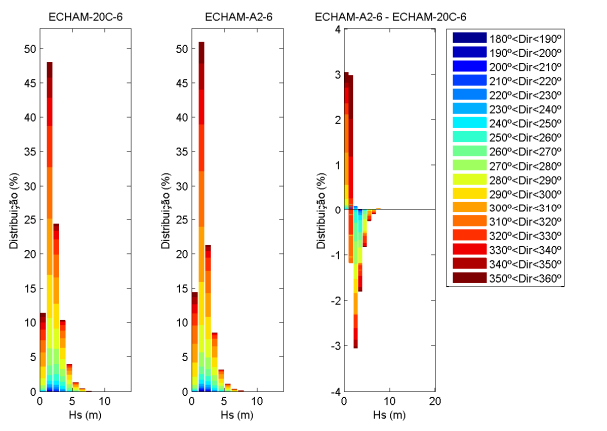


Figura 17 – Comparação dos cenários actual e futuro com o modelo ECHAM5 (6): altura significativa das ondas.

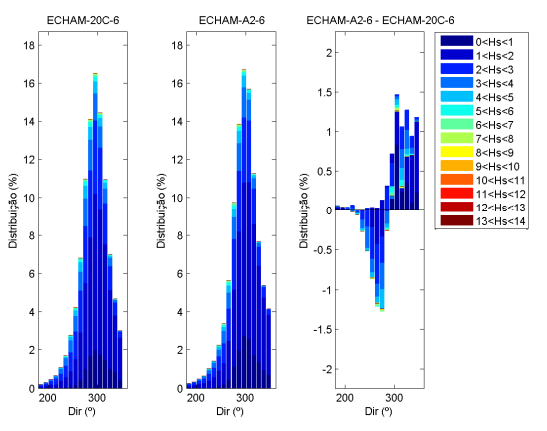


Figura 18 – Comparação dos cenários actual e futuro com o modelo ECHAM5 (6): direcção média das ondas.

No quadro 4 são apresentados os valores dos parâmetros médios das simulações 3, 5 e 6 da climatologia actual (20C) e do cenário futuro (A2).

	Hs				Tm				Dm		
	Mean	Mode	Std	Max	Mean	Mode	Std	Max	Mean	Mode	Std
<b>ECHAM5-20C-3</b>	2.28	1.45	1.24	11.08	9.08	8.77	2.04	17.85	292.49	310.00	57.74
<b>ECHAM5-A2-3</b>	2.13	1.25	1.19	11.60	8.87	7.73	2.11	17.63	292.40	303.80	63.55
<b>ECHAM5-20C-5</b>	2.16	1.36	1.16	10.27	8.89	8.18	1.96	17.33	293.08	305.10	56.41
<b>ECHAM5-A2-5</b>	2.02	1.39	1.11	10.65	8.69	7.30	2.03	17.27	293.35	302.30	61.60
<b>ECHAM5-20C-6</b>	2.02	1.39	1.08	9.34	8.67	8.41	1.88	16.47	293.73	304.60	54.91
<b>ECHAM5-A2-6</b>	1.89	1.21	1.04	9.84	8.47	7.08	1.95	16.77	294.24	303.30	59.79

Quadro 4 – Parâmetros médios das simulações do presente e do futuro

Em todas as simulações a média da altura significativa e do período médio diminui no cenário futuro em relação à situação actual. Em termos médios a direcção não sofre alterações significativas.

#### Dados a fornecer à tarefa 5

A selecção da simulação que mais se adequa aos objectivos da Tarefa 5 foi feita tendo em conta as ondas mais representativas para o transporte sedimentar, definidas com base em estudos anteriores (Barata et al., 2006; Coelho, 2005; Plecha, 2011). Estes indicam que as ondas mais relevantes para o transporte sedimentar são as que têm alturas significativas entre 2,5 m e 5 m.

A figura 19 apresenta os resultados da função densidade de probabilidade (PDF) das várias simulações.



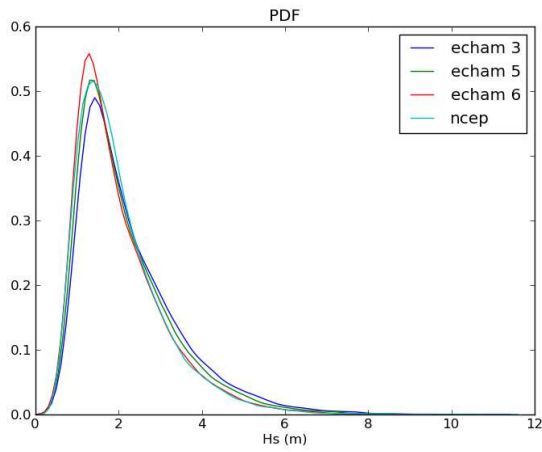


Figura 19 – Função densidade de probabilidade (PDF) das simulações 3, 5 e 6 para a climatologia actual

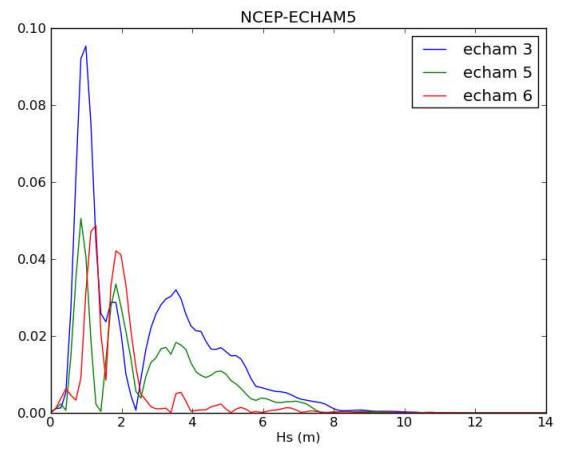


Figura 20 – Módulo da diferença entre as PDF do NCEP e do ECHAM

A simulação que está mais próxima da simulação de referência, para as ondas mais relevantes para o transporte sedimentar, é a 6. Assim, os dados fornecidos às tarefas 5 e 6 foram retirados da simulação 6.

## 4. Conclusões

O modelo de agitação marítima WW3 foi implementado no Atlântico Norte, forçado por resultados de reanálise de ventos do NCEP, e calibrado com dados de três bóias Portuguesas. Simulações para o período de 1970-2000 com o mesmo forçamento constituíram a simulação de referência. Posteriormente, efectuaram-se simulações para o mesmo período, mas forçadas por resultados do modelo climático ECHAM. Dado que havia alguma discordância entre os dois regimes de ondas, devido a diferenças entre os ventos usados para forçamento, uma nova calibração foi realizada. Uma vez calibrado, o modelo foi usado para simular o regime de ondas para o período 2070-2100.

Uma análise preliminar permite verificar que há diferenças significativas no regime de ondas em frente a Aveiro entre as três últimas décadas dos séculos 20 e 21. Estas diferenças serão objecto de uma análise mais detalhada.

Lisboa, em Abril de 2012

VISTOS



André Fortunato  
Chefe do Núcleo de  
Estuários e Zonas Costeiras



Rafaela de Saldanha Matos  
Directora do Departamento de  
Hidráulica e Ambiente

AUTORIAS



Alexandre Ribeiro  
Bolseiro de Investigação



André Fortunato  
Investigador Principal com Habilitação

## Referências

- Barata, A., Teles, M, Vieira, J (1996). Seleção de ondas representativas da agitação marítima para efeito da avaliação do transporte litoral na costa de Aveiro. *Recursos Hídricos*, Vol. 17, n.º 1, p. 43-74.
- Coelho, C. (2005). *Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira*. Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, Portugal, 404 pp.
- Dodet, G., Bertin, X., Taborda, R. (2010). Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades, *Ocean Modeling*, 31 (3-4), 120-131.
- Plecha, S. (2011). *Contribuição para o Estudo da Morfodinâmica da Embocadura da Ria de Aveiro*. Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, Portugal, 163 pp.
- Tolman, H. L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 194 pp.

