



MODELAÇÃO DA HIDRODINÂMICA DA ORLA SUL DA ILHA DA MADEIRA

Francisco J. CAMPUZANO^{1*}, Susana NUNES¹, Madalena MALHADAS¹, Duarte NUNES²,
Moisés JARDIM² & Ramiro NEVES¹

¹Maretec/IST Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa

²IGA-Investimento e Gestão Água, Rua dos Ferreiros, n.º 148 /150, 9000-082 Funchal

*Email: campuzanofj.maretec@ist.utl.pt

Resumo

No âmbito do protocolo de colaboração com a IGA, o IST desenhou um programa de monitorização que pretende avaliar o impacto da rejeição de efluentes urbanos no meio marinho da ilha da Madeira. Este programa tem duas componentes, uma de trabalho de campo com o objectivo de obter uma série temporal de dados que permitam caracterizar a área em questão e uma de trabalho de modelação matemática. Na modelação usou-se uma filosofia de modelos encaixados que permite resolver os problemas de escala para esta região. Neste trabalho é apresentada a metodologia de implementação e os principais resultados do modelo hidrodinâmico desenvolvido para a ilha da Madeira. Os resultados mostram que o modelo parece conseguir representar os principais processos e fenómenos oceanográficos observados na ilha. O trabalho futuro inclui a modelação da qualidade da água e a simulação das plumas dos emissários submarinos, com vista a avaliar o seu impacto no meio marinho.

1. Introdução

Este trabalho surge no contexto do protocolo de colaboração entre a IGA (Investimentos e Gestão da Água) e o Maretec/IST (Centro de Ambiente e Tecnologias Marinhas do Instituto Superior Técnico) que pretende avaliar o impacto da rejeição de efluentes resultantes do tratamento de água residuais urbanas no meio marinho da orla sul da ilha da Madeira.

A área do estudo abrange as zonas marinhas afectadas pelas descargas de afluentes provenientes das estações de tratamento de águas residuais de Machico, Santa Cruz, Caniço, Funchal, Câmara de Lobos, Ribeira Brava, Ponta do Sol e Paúl do Mar. O estudo a desenvolver consiste na avaliação do estado trófico e contaminação microbiológica fecal no meio marinho e inclui uma vertente de trabalho de monitorização e uma vertente de trabalho de modelação matemática, que pretende explicar os processos que determinam os valores medidos.

O trabalho de modelação é efectuado através da aplicação do modelo numérico Mohid, desenvolvido pelo IST, e permitirá avaliar impactes em função dos locais de descarga, avaliar a capacidade natural de depuração do meio e avaliar as diferenças entre os impactes de descargas sujeitas a tratamento primário e a tratamento secundário. Desta forma, será simulada a hidrodinâmica forçada pelo vento, marés e densidade, a produção primária e a contaminação microbiológica. A estratégia seguida é a de modelos encaixados em vários níveis, produzindo os modelos de maior escala condições de fronteira para o nível subsequente.

Este artigo foca-se na implementação e principais resultados do modelo hidrodinâmico aplicado na Ilha da Madeira. É apresentada uma descrição da área de estudo e dos principais factores que influenciam a circulação nesta região. É ainda descrita a metodologia usada na implementação e validação dos modelos. Por fim são apresentadas as principais conclusões e o trabalho futuro.



2. Descrição da Área de Estudo

A Ilha da Madeira é a maior ilha do Arquipélago da Madeira e cobre uma área de aproximadamente 737km². De origem vulcânica, este arquipélago revela uma topografia marcadamente montanhosa com inúmeras paredes de rocha vertical, vales de ribeiras fortemente encaixados e falésias abruptas sobre o mar (Caldeira & Lekou, 2000).

As condições meteorológicas nesta região são determinadas principalmente pelo anticiclone subtropical dos Açores, responsável pela predominância dos ventos alísios de nordeste (IH, 1979), que aqui sopram a uma velocidade média de 20km/h. Dado que a principal força motora das correntes oceânicas de superfície são os ventos, as correntes oceânicas de superfície existentes no Arquipélago da Madeira integram-se na circulação geral do sistema de correntes do Atlântico Norte. A parte leste deste sistema de circulação é constituída por quatro correntes: a corrente dos Açores, a corrente de Portugal, a corrente das Canárias e a Corrente Equatorial Norte (Caldeira e Lekou, 2000).

Para além dos gradientes de densidade associados às correntes (particularmente os associados à corrente dos Açores, vertente sul da corrente de Portugal e corrente das Canárias), a circulação oceânica nesta região é ainda condicionada pela maré e vento local e como consequência, para representar os regimes de transporte junto à costa, é necessário considerar os aspectos climáticos de macroescala e a variabilidade de mesoescala associada ao vento local e à maré.

A topografia da ilha condiciona o forçamento atmosférico em seu redor, produzindo menor mistura vertical nas zonas abrigadas do sotavento do que em mar aberto, permitindo maior aquecimento da água de superfície na zona de sotavento. Em sentido contrário actuam os gradientes de profundidade na crista oceânica entre as Ilhas Desertas e a Ilha da Madeira com variações batimétricas de 1500 metros numa distância de 250 metros que influenciam o regime local de correntes e de mistura vertical, gerando o afloramento de água profundas frias e ricas em nutrientes.

Desta forma, para simular as condições hidrodinâmicas nesta região oceanográfica é necessário o acoplamento de modelos atmosféricos com modelos de escoamento da água. Para este trabalho foram utilizados o modelo atmosférico WRF e o modelo hidrodinâmico Mohid, que são descritos nas secções seguintes.

3. O modelo atmosférico WRF

O modelo de previsão e pesquisa do clima, WRF (<http://www.wrf-model.org/index.php>) nas suas siglas em inglês, é um sistema de previsão numérica do clima desenhado para servir as necessidades de pesquisa e previsão operacional. A sua arquitectura permite-lhe um amplo leque de aplicações desde muito locais (na ordem dos metros) até regionais ou globais (na ordem dos milhares de quilómetros).

O esforço de desenvolvimento do WRF foi partilhado por várias entidades americanas, nomeadamente o Centro Nacional de Investigação Atmosférica (NCAR), o Centro Nacional de Previsão Ambiental (NCEP), o Laboratório de Sistemas de Previsão (FSL), a Agência do Tempo da Força Aérea (AFWA), o laboratório de Investigação Naval, a Universidade de Oklahoma e a Administração da Aviação Federal (FAA).

Estes modelos são regionais, não hidrostáticos, sensíveis à topografia (coordenada sigma) e permitem simular e prever os campos tridimensionais de todas as variáveis atmosféricas em função do tempo, resolvendo numericamente as equações de Navier-Stokes e da Energia para fluidos compressíveis (conservação de energia, conservação da massa, conservação da água – gelo, líquida, vapor – momento linear, etc), as quais são acopladas a um modelo de solo. Em particular, permitem prever a evolução temporal da pressão atmosférica, do campo de velocidades, da humidade relativa, da temperatura e da precipitação.

4. O modelo hidrodinâmico Mohid

O Modelo Hidrodinâmico Mohid (<http://www.mohid.com>) foi criado em 1985 e desde então tem vindo a ser continuamente desenvolvido e melhorado pelo Maretec no Instituto Superior Técnico (IST), em cooperação com a consultora Hidromod, Lda.

Actualmente, o modelo aquático Mohid (Braunschweig *et al*, 2003) consiste em mais de 60 módulos organizados numa estrutura que reúne mais de 300 mil linhas de código fonte. Este modelo consiste num sistema de modelação de volumes finitos escrito em ANSI FORTRAN 95 usando uma filosofia de programação orientada por objectos e integrando vários modelos numéricos e interfaces gráficas para realizar as diferentes tarefas de pré e pós processamento. Destes modelos numéricos, o mais robusto e desenvolvido actualmente é o Mohid Water, que tem sido aplicado com sucesso em diferentes ambientes e escalas, desde grandes aplicações costeiras como a frente Atlântico-Europeia (Santos *et al*, 2002), a costa Ibérica ocidental (Coelho *et al*, 2002; Santos *et al*, 2005; Riflet *et al*, 2007) e o Mar do Norte (Bernardes, 2007) até lagoas costeiras (Saraiva *et al*, 2007; Silva e Leitão, 2005; Silva *et al*, 2002; Trancoso *et al*, 2005; Vaz *et al*, 2005) e diferentes estuários da costa portuguesa (Saraiva *et al*, 2007), assim como da costa galega (deCastro *et al*, 2002; deCastro *et al*, 2004; Gomez-Gesteira *et al*, 1999; Villarreal *et al*, 2002) e outros estuários europeus (Cancino & Neves, 1999; Campuzano-Guillén, 2004; Leitão, 1996).

5. Implementação dos Modelos

5.1. Dados base

Para a implementação do modelo são necessários alguns dados de base, nomeadamente a batimetria costeira e dados de maré.

A batimetria da parte sul da ilha da Madeira foi fornecida pela IGA e é proveniente dos levantamentos hidrográficos 2002-2007 realizados pelo Instituto Hidrográfico em contrato para o SRES (Secretaria Regional Equipamento Regional) dependente da Direcção Regional de Informação Geográfica e ordenamento do território do Governo da Região Autónoma da Madeira e também do relatório técnico final do Projecto GM4103/2003 “Dinâmica sedimentar da Costa Sul da Ilha da Madeira” (REL.TF.GM.02/03, Junho 2003).

Estes dados foram adaptados aos formatos reconhecidos pelo sistema de modelação Mohid e estão representados na Figura 1. Como pode observar-se apenas incluem os dados entre as batimétricas dos 0 e dos 150 m. Observar-se ainda que a plataforma costeira da costa sul da ilha é muito estreita, tendo em média 5 km (Rodrigues *et al*, 2006). Para completar os dados batimétricos na região à volta da ilha foram usados dados da base global de topografia da NASA: SRTM30 (Becker *et al*, 2009).

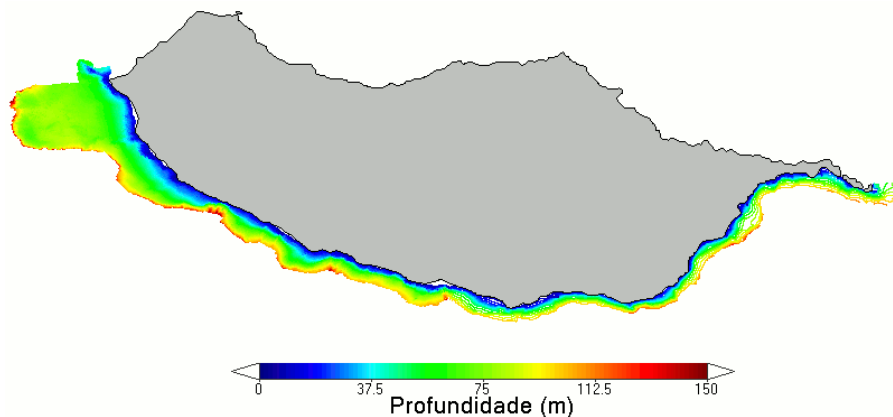


Figura 1. Batimetria costeira da Ilha da Madeira

Os dados de maré foram disponibilizados pela Administração dos Portos da Região Autónoma da Madeira (APRAM) e são dos marégrafos localizados no Cais dos Contentores e no Cais da Pontinha, ambos no Funchal.

No que diz respeito à atmosfera, o modelo WRF tem sido forçado usando os dados da base de dados NCEP FNL Operational Global Analysis ds083.2. Estes correspondem a dados analisados a cada 6 horas numa malha com uma resolução espacial de 1.0x1.0 grau e estão disponíveis desde Julho de 1999 até a actualidade (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/>). Os parâmetros estudados incluem pressão atmosférica à superfície, pressão ao nível do mar,

altura geopotencial, temperatura, temperatura à superfície do mar, valores de solo, cobertura de gelo, humidade relativa, componentes u e v do vento, movimento vertical, vorticidade e ozono.

5.2. Metodologia

A implementação dos modelos segue uma filosofia de modelos encaixados. Esta metodologia permite integrar processos desde a escala dos quilómetros, como é o caso da maré, com processos da escala das centenas de metros, como é o caso da pluma dos emissários. A comunicação entre modelos é feita *one-way*, ou seja, os modelos de maior escala influenciam os modelos de menor escala, mas o contrário não ocorre. Esta metodologia permite que a informação dos modelos “pai” seja a condição de fronteira dos modelos “filho”, tornando possível que diversos modelos locais sejam forçados pelo mesmo modelo regional.

Numa primeira fase, estão a ser usados três domínios marinhos (Figura 2) com diferentes extensões e resoluções espaciais e um domínio para o modelo WRF. As características destes domínios encontram-se resumidas na Tabela 1.

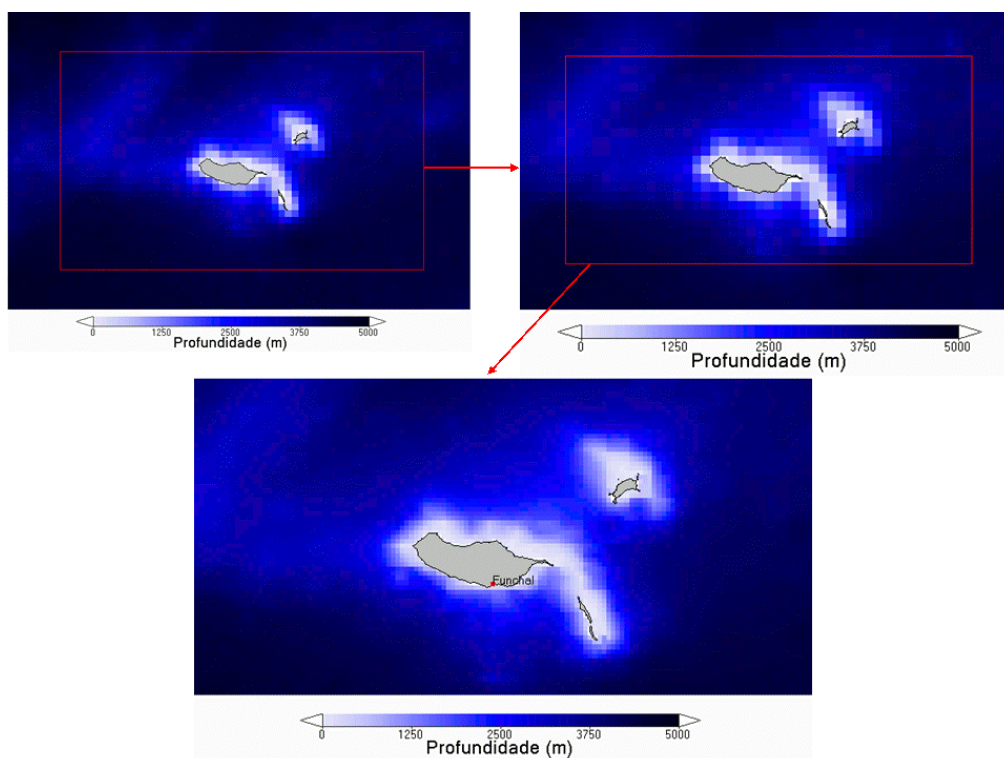


Figura 2. Domínios de modelação actuais para a Madeira, Nível 1 (acima esquerda), Nível 2 (acima direita) e Nível 3 (em baixo)

Tabela 1. Resumo da cobertura dos diferentes domínios definidos para a área de estudo.

Nome	Resolução	Nº células	Nº camadas	Coordenadas
WRF	0.06 graus \approx 5.6 km	100 x 100	27 Sigma	30°10'55" - 35°09'40" N 14°01'03" - 19°58'14" W
Nível 1	0.06 graus \approx 5.6 km	70 x 45	1 Sigma	31°30'00" - 34°12'00" N 14°48'00" - 19°00'00" W
Nível 2	0.06 graus \approx 5.6 km	55 x 33	50 Cartesianas	31°51'36" - 33°50'24" N 15°13'12" - 18°31'12" W
Nível 3	0.02 graus \approx 1.9 km	135 x 69	50 Cartesianas	32°09'36" - 33°32'24" N 15°31'12" - 18°13'12" W

O modelo WRF é simulado sob uma malha com uma resolução geográfica de 30 segundos produzindo resultados para as 27 camadas sigma. Os resultados obtidos para a camada mais superficial e para as propriedades temperatura do ar, radiação atmosférica, humidade relativa e velocidades e intensidades dos ventos são depois interpolados para os adaptar à resolução das malhas marinhas e os seus valores são incorporados nos diferentes domínios, através dos módulos Atmosphere e InterfaceSurfaceWater do modelo Mohid.

Nos domínios marinhos o forçamento na fronteira é introduzido de forma paulatina. Ao longo da fronteira aberta do Nível 1 estão dispostas uma série de estações que fornecem as componentes harmónicas e que por triangulação são interpoladas para cada uma das células da fronteira (Figura 3). As componentes harmónicas para esta fronteira são obtidas do modelo de maré global FES2004 (Lyard *et al*, 2006). Este nível possui uma geometria 2D, pois basicamente o papel deste modelo é o de fornecer condições de maré aos níveis inferiores.

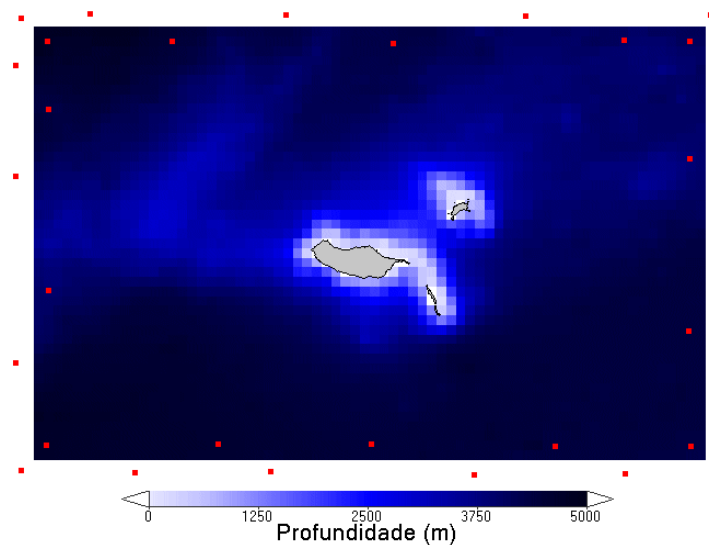


Figura 3. Malha pertencente ao Nível 1; os pontos vermelhos correspondem aos locais onde são fornecidas as condições da maré.

A seguir a este nível, encontra-se um segundo nível com o mesmo tamanho de célula horizontal mas desta vez com uma discretização vertical de 50 camadas cartesianas cuja espessura aumenta com a profundidade e coincide com as camadas definidas pelo modelo Mercator Ocean (Tabela 2).

Tabela 2. Discretização vertical do modelo Mercator (C=camada, E= espessura em m).

C	E (m)	C	E (m)	C	E (m)	C	E (m)	C	E (m)
1	0.98	11	2.44	21	13.06	31	79.87	41	295.81
2	1.12	12	2.93	22	15.89	32	94.43	42	320.71
3	1.09	13	3.27	23	18.91	33	110.53	43	344.02
4	1.25	14	3.96	24	22.97	34	129.00	44	366.22
5	1.27	15	4.50	25	27.40	35	149.01	45	386.20
6	1.46	16	5.48	26	33.15	36	171.19	46	404.70
7	1.51	17	6.34	27	39.55	37	194.52	47	420.78
8	1.78	18	7.72	28	47.58	38	219.40	48	435.36
9	1.88	19	9.06	29	56.59	39	244.66	49	447.62
10	2.25	20	11.03	30	67.58	40	270.56	50	458.65

Os resultados hidrodinâmicos e de salinidade e temperatura do modelo Mercator Ocean mercatorPsy2v3R1v (Drillet *et al*, 2005) foram interpolados para esta malha e usados como condição inicial assim como assimilados na fronteira para um período de 20 dias para testar a sua estabilidade, com resultados satisfatórios. As propriedades assimiladas encontram-se



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

resumidas na Tabela 3. Para o resto das propriedades da água que não estão incluídas no modelo Mercator Ocean, estão a ser aplicados perfis climatológicos obtidos do WOA05 (World Ocean Atlas 2005; Garcia *et al*, 2006a & 2006b). Na Figura 4 à esquerda mostra-se o perfil típico de oxigénio para a Madeira e na Figura 4 à direita mostram-se os perfis típicos de nutrientes para a área de estudo.

Tabela 3. Propriedades assimiladas do modelo Mercator Ocean.

Propriedade	Unidades
Velocidade barotrópica U	m/s
Velocidade barotrópica V	m/s
Nível	m
Velocidade U	m/s
Velocidade V	m/s
Temperatura	°C
Salinidade	PSU

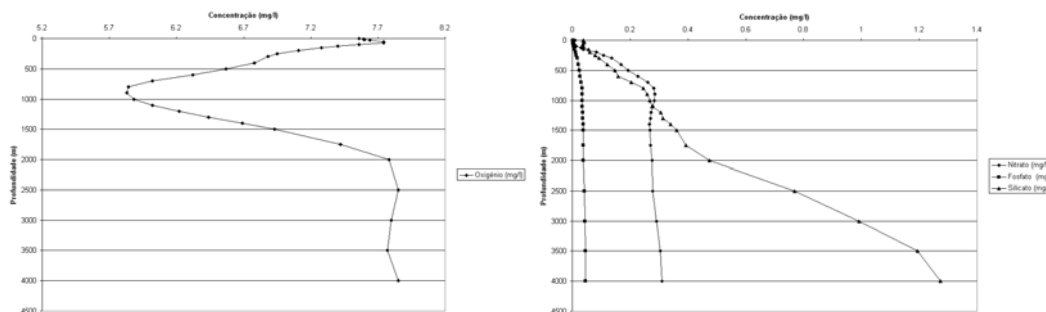


Figura 4. Perfis típicos de oxigénio (esquerda) e de nutrientes (direita) na massa de água envolvente da Ilha da Madeira (WOA05).

O nível 3 usa os resultados obtidos no nível 2 para forçar um nível com uma resolução menor para nos aproximar da escala costeira adequada. É neste nível que são validados os resultados de hidrodinâmica de forma a verificar se o modelo está a responder de forma correcta aos forçamentos.

5.3. Validação da Hidrodinâmica

Na validação dos resultados foram usadas as medições dos marégrafos localizados no porto do Funchal:

- Porto Nr. 112 FUNCHAL-B (Cais dos Contentores). Marégrafo Thales (Jan2006 a Jan2009).
- Porto Nr. 111 FUNCHAL (Cais da Pontinha) Marégrafo MTG (Jan2006-Sep2007) e Marégrafo MXX (Mar2008-Mai2008).

Para eliminar a componente temporal das marés foram obtidas as componentes harmónicas das séries temporais mais compridas: Thales e MTG. Com a ajuda do software POL/PSMSL Tidal Analysis Software Kit 2000 (TASK-2000) foram obtidas 62 componentes de maré, as quais mostram resultados muito semelhantes para ambas estações devido à sua proximidade. Em ambos os registos comprova-se que a maré é a força dominante nesta parte da ilha que se encontra menos exposta aos ventos alísios, já que os resultados da componente de maré são capazes de explicar por volta de 99 % das variações de nível.

As componentes harmónicas da maré de maior amplitude para a estação Thales encontram-se representadas na Tabela 4. O nível médio das duas estações (Z0) encontra-se à volta dos 1.60 m e predominam as componentes semidiurnas e em especial a M2, com um coeficiente de Formzahl ($K1+O1/M2+S2$) inferior a 0.25 que segundo esta classificação corresponde a marés semidiurnas.



Tabela 4. Principais componentes harmónicas da estação Thales.

Componente harmónica	Velocidade (graus/hora)	Amplitude (m)	Fase (graus)
ZO	0.00	1.59	0.00
M2	28.98	0.71	45.55
S2	30.00	0.26	68.11
N2	28.44	0.15	30.57
SA	0.04	0.08	170.04
K2	30.08	0.07	63.81
K1	15.04	0.06	46.66
O1	13.94	0.04	305.27
MU2	27.97	0.03	3.91
NU2	28.51	0.03	32.79
SSA	0.08	0.02	48.80
2N2	27.90	0.02	14.64
P1	14.96	0.02	36.80
L2	29.53	0.02	51.32
T2	29.96	0.01	83.29

Esta estratégia de modelação tem-se mostrado satisfatória ao ser capaz de reproduzir com um grande grau de ajuste as elevações obtidas a partir das componentes de maré. Na Figura 5 mostram-se comparações entre os valores de nível previstos tendo em conta a análise harmónica e as suas componentes e os resultados obtidos pelo modelo Mohid nas condições já descritas. O coeficiente de determinação entre as duas séries, como se observa na Figura 6, é elevado (0.98).

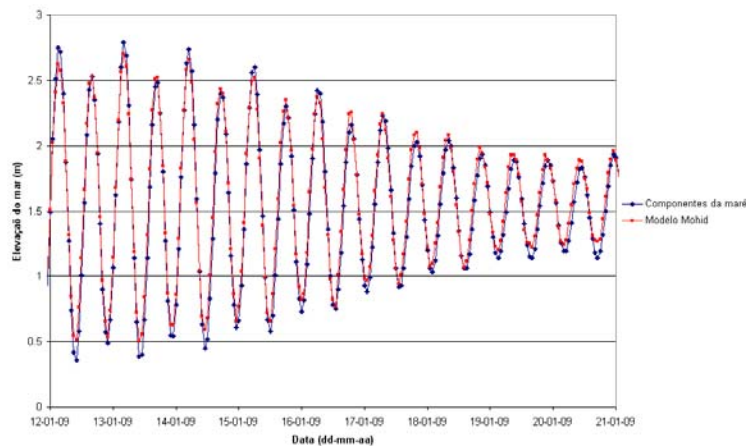


Figura 5. Níveis medidos no Funchal através das componentes da maré (Diamantes azuis) e as produzidas pelo modelo Mohid no Nível 3 (Quadrados vermelhos).

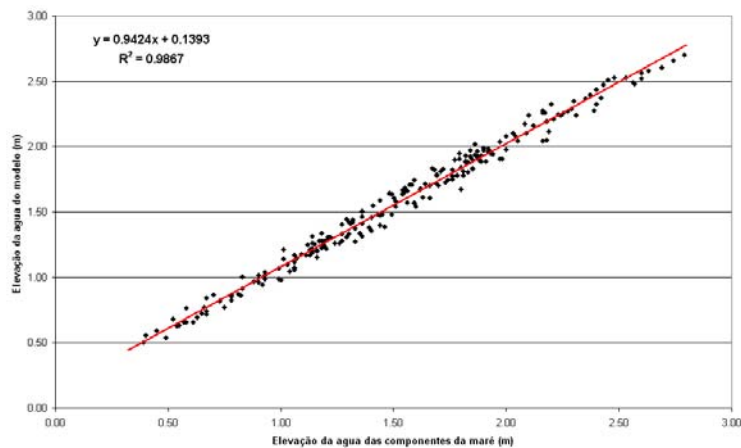


Figura 6. Regressão entre os níveis medidos no Funchal através das componentes da maré e as produzidas pelo modelo Mohid no Nível 3 onde é observado um alto grau de correlação ($R^2=0.98$)

6. Resultados e Discussão

Nesta secção apresentam-se os resultados do estado de desenvolvimento actual do modelo. Na Figura 7 pode observar-se o acoplamento do modelo hidrodinâmico Mohid com o modelo de circulação global Mercator Ocean e o modelo atmosférico WRF (setas brancas). Observa-se a influência da topografia na formação da esteira da ilha e as intensidades do vento menores na área de sombra da ilha.

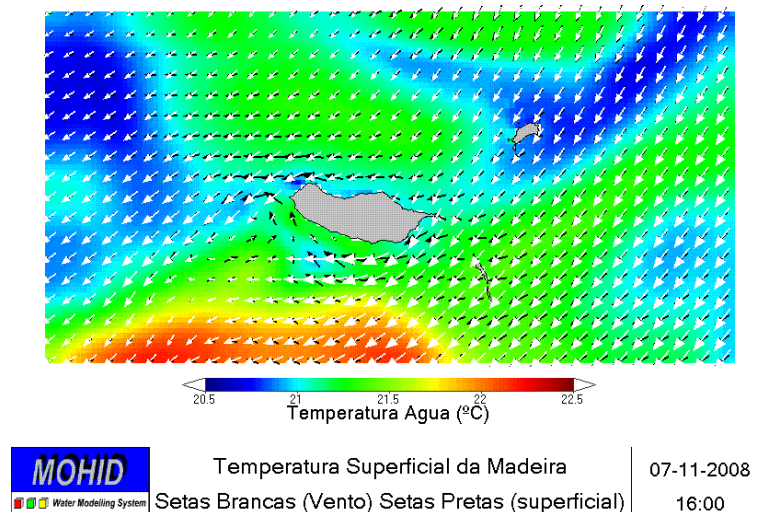


Figura 7. Temperatura superficial do modelo da Madeira no Nível 3 forçado com maré, condições térmicas e salinas do modelo Mercator Ocean e o modelo atmosférico WRF.

O modelo tem sido corrido para períodos de dois meses e rapidamente mostra os efeitos causados pela presença da ilha e a sua interacção com o fundo (que apresenta grandes variações de profundidade atingindo perto das ilhas valores superiores aos dois mil metros em pequenas distâncias) e a atmosfera (que devido à topografia da ilha causa alteração nos ventos em intensidade e direcção, criando áreas protegidas da sua acção principalmente no lado sul pela predominância dos ventos alísios).

Tal como foi descrito através de imagens de satélite em Caldeira e Lekou (2000) e Caldeira *et al* (2002), o efeito ilha produz uma série de fenómenos de mesoescala que podem ser observados à superfície. Destacam-se principalmente a formação de esteiras de água quente na área a sotavento com diferenças que podem atingir os 3 °C e a formação de *eddies* e

frentes, e o aparecimento de águas frias com uma alta produção primária à volta da ilha. A ilha da Madeira está ligada às ilhas Desertas por uma plataforma submarina com profundidades inferiores a 200 m, o que serve de obstáculo ao escoamento das águas provenientes de norte e sul, produzindo efeitos que podem ser observados em superfície.

Os períodos que foram simulados correspondem às datas das campanhas de amostragem do mês de Novembro de 2008 que englobam condições típicas (ventos alísios) e situações atípicas (como ventos variantes). As condições simuladas dão para mostrar os possíveis mecanismos de formação de estruturas (e.g. frentes, *eddies*) à superfície. Na Figura 8 pode-se observar que quando sopra o vento de NE, típico vento alísio, a esteira se encontra no sotavento assim como pode ser observada uma intensificação da corrente entre a Ilha da Madeira e as ilhas Desertas (Figura 8 esquerda). Observa-se também como esta situação pode dar origem a *eddies* dentro da esteira devido ao gradiente de velocidades presente e que parece criar um *eddy* com sentido horário. No que se refere à temperatura, pode-se observar como esta intensificação da corrente a sudeste da Ilha da Madeira produz o ressurgimento de águas mais frias que as que estão a volta. Na área da esteira os valores de temperatura são elevados, não só na parte mais definida da esteira, como na área circundante. A distribuição da temperatura é devido à migração anterior a este evento de águas vindas do Sul que estão neste instante a ser redistribuídas pelas correntes. No lado direito das imagens podem ser observadas também áreas de águas mais frias que podem ser devidas ao aparecimento de um *eddy* ciclónico que trás águas mais frias do fundo para a superfície.

Como consequência destas estruturas, o resto dos parâmetros físico-químicos são afectados. A Figura 9 (esquerda) mostra como os níveis de oxigénio à superfície são menores que nas águas circundantes devido à menor troca mar-atmosfera por causa de intensidades menores do vento. Assim como também perto das ilhas Desertas ascendem águas com maior concentração de nutrientes e com menor concentração de oxigénio, tal como pode ser observado nos perfis da Figura 4. As simulações não são suficientemente longas para observar os valores de crescimento do fitoplâncton mas será de esperar valores menores na área de esteira, uma vez que nesta área a troca com águas profundas ricas em nutrientes é menor, ao contrário de áreas onde se observam fenómenos de *upwelling* ou *eddies* ciclónicos.

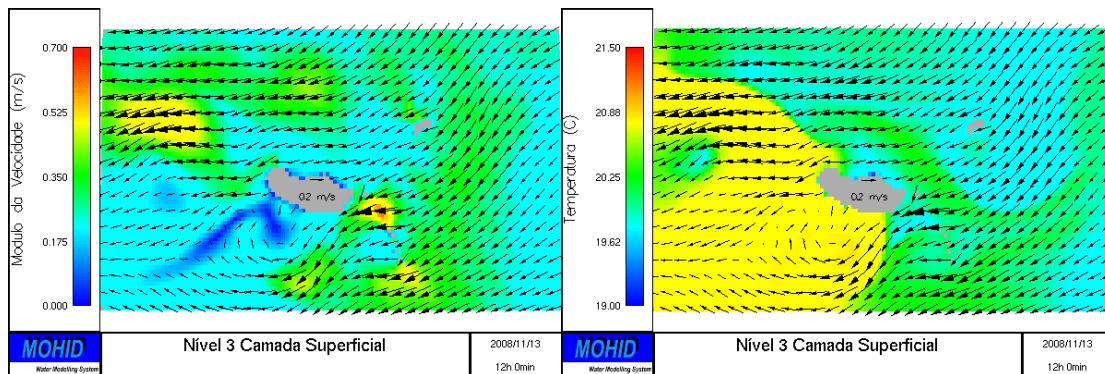


Figura 8. Velocidade (esquerda) e temperatura (direita) superficiais do modelo da Madeira no Nível 3 forçado com maré, condições térmicas e salinas do modelo Mercator Ocean e o modelo atmosférico WRF com condições de vento alísio. As setas representam a intensidade da corrente.

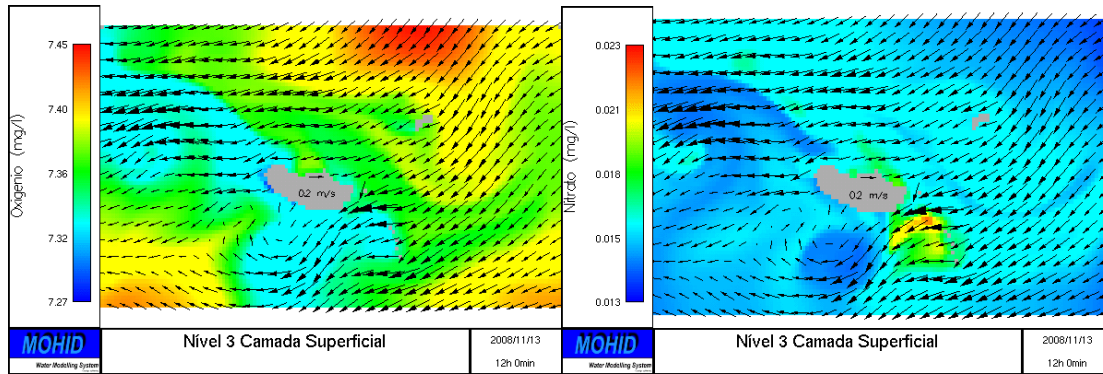


Figura 9. Concentrações de oxigénio (esquerda) e nitrato (direita) superficiais do modelo da Madeira no Nível 3 forçado com maré, condições térmicas e salinas do modelo Mercator Ocean, o modelo atmosférico WRF com condições de vento alísio e perfis de oxigénio e nitrato na fronteira do World Ocean Atlas. As setas representam a intensidade da corrente.

Em Caldeira *et al* (2002) podem ser observados fenómenos como esteiras de água quente na costa Norte da Ilha da Madeira. No entanto, no período simulado têm sido observados fenómenos de esteira no Norte da Ilha (Figura 10) correspondentes a ventos de Sul-Sudeste mas esta orientação e intensidade de vento dá lugar a *upwelling* de águas frias provenientes do fundo. Este é um fenómeno que deve ser estudado com maior detalhe. Nesta figura podem ainda ser observadas intensidades maiores das correntes em ambos os lados da ilha com direcção contrária às representadas na Figura 8 e um avanço das águas mais quentes de Sul em direcção a Norte.

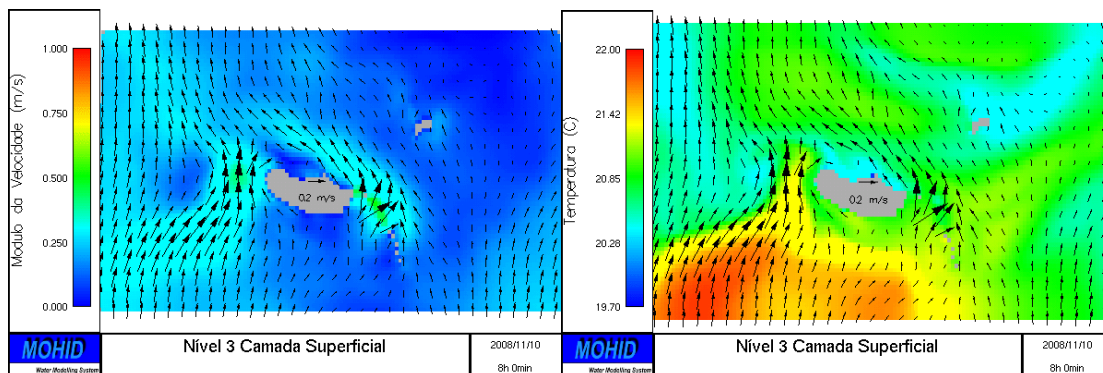


Figura 10. Velocidade (esquerda) e temperatura (direita) superficiais do modelo da Madeira no Nível 3 forçado com maré, condições térmicas e salinas do modelo Mercator Ocean e o modelo atmosférico WRF com condições de vento do Sul. As setas representam a intensidade da corrente.

Este deslocamento de água devido a ocasionais ventos do Sul pode ser a responsável pela criação das frentes que são observados igualmente em Caldeira *e tal* (2002). Na Figura 11 pode observar-se a evolução posterior da água vinda do Sul formando uma frente de temperaturas com uma orientação NO-SE, e também o aparecimento de uma estrutura com forma de *eddie* ao Sul da Ilha.

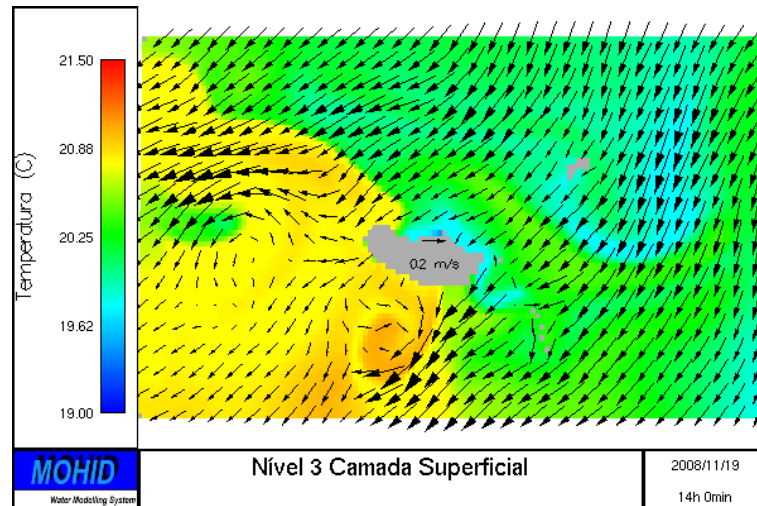


Figura 11. Temperatura superficial do modelo da Madeira no Nível 3 onde se podem observar estruturas de frente e um *eddie* anticiclónico.

7. Considerações Finais e Trabalho Futuro

Apesar de ser um ecossistema importante, pouco se conhece sobre a dinâmica da Ilha da Madeira. Registam-se apenas alguns trabalhos antigos efectuados pelo IH - Instituto Hidrográfico (IH, 1979) e pelo IPIMAR – Instituto de Investigação das Pescas e do Mar (INIP 1980; INIP 1982; INIP 1984a; INIP 1984b) e mais recentemente os trabalhos de Gouveia *et al* (1987), Dias *et al* (1992), Caldeira (1996), Andrade (1996), Caldeira e Lekou (2000), e Caldeira *et al* (2002). Este trabalho pretende contribuir para um melhor conhecimento dos processos que explicam a circulação oceânica nesta região, utilizando ferramentas de modelação matemática.

Ainda que seja necessário correr o modelo para períodos mais longos, o sistema implementado parece ser capaz de simular os fenómenos que tem lugar à volta do arquipélago da Madeira e pode ser uma ferramenta de grande utilidade para o estudo da formação de estruturas oceanográficas (frentes, *eddies*, esteiras, *upwellings*, etc.). Para além da componente académica de estudo de fenómenos oceanográficos, estes modelos podem ainda ser úteis a nível prático em áreas como a pesca, previsão de correntes, estudos de qualidade da água, etc.

O trabalho futuro deste projecto inclui elevar o grau de aninhamento dos modelos até níveis ainda mais locais. A estratégia a seguir é levar o forçamento a níveis mais próximos na costa com os domínios descritos na Tabela 5 e representados na Figura 12 e que estão em fase ser encaixados nos domínios superiores.

Tabela 5. Resumo da cobertura dos diferentes domínios definidos para a área de estudo.

Nome	Resolução	Nº células	Nº camadas	Coordenadas
Nível 4	0.005 ° ≈ 467 m	180 x 108	50	32°27'36" - 33°00'00" N
			Cartesianas	16°30'00" - 17°23'60" W
Nível 5	0.0025 ° ≈ 233m	242 x 104	50	32°32'60" - 32°48'36" N
			Cartesianas	16°39'36" - 17°15'54" W

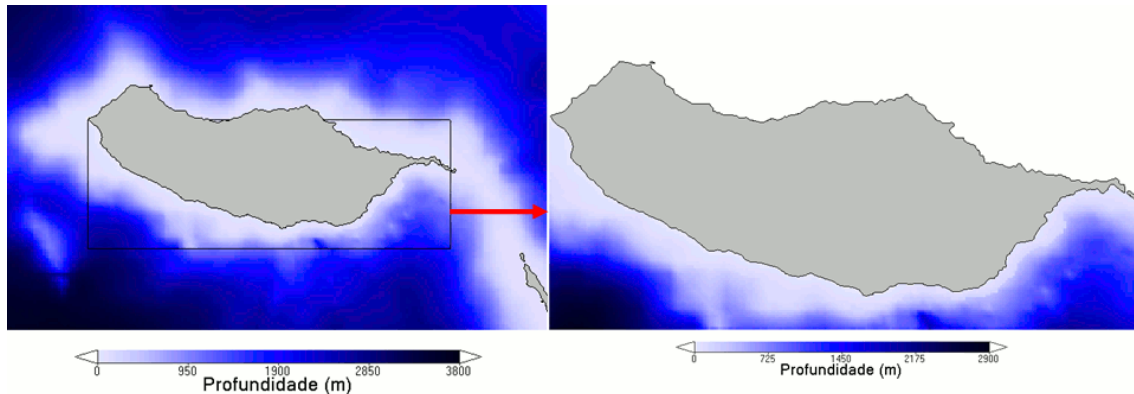


Figura 12. Domínios de modelação em desenvolvimento para a Ilha da Madeira, Nível 4 (esquerda) e Nível 5 (direita).

Como foi referido anteriormente, um dos objectivos principais do projecto é avaliar o impacto das descargas de emissários submarinos na qualidade da água. De momento os resultados destes modelos estão a ser utilizados para forçar modelos locais de dispersão de plumas de emissários, de forma a prever o impacto destes no meio marinho.

Como ultimo objectivo de desenvolvimento está a automatização de todos os processos de cálculo de forma a fornecer previsões em modo operacional aos utilizadores locais.

Paralelamente, é necessário validar os resultados do sistema de modelos com outras observações *in situ* (e.g. medidas de ADCP) e com imagens de satélite, de forma a verificar se os mecanismos de formação de estruturas aparecem nestas imagens, para obter uma maior calibração e ajuste do modelo às variações físicas e bioquímicas observadas no sistema. Será também necessário correr os modelos por períodos prolongados de tempo para ver se este é capaz de reproduzir todas as variações sazonais da região.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à APRAM-Administração dos Portos da Região Autónoma da Madeira pela disponibilização dos dados dos marégrafos, à IGA – Investimentos e Gestão da Água pelo apoio financeiro a este projecto e a toda a equipa do IST, IGA e IPIMAR que participou no trabalho de campo e trabalho laboratorial.

Referências Bibliográficas

Andrade, C A P (1996). A fishfarm pilot-project in Madeira Archipelago, Northeastern Atlantic. I-The offshore option and II-Environmental Impact Assessment. Proceedings of the First Open Ocean Aquaculture Conference. Portland, Maine, USA, May 8-10, 1996.

Becker, J J, D T Sandwell, Smith W H F, Braud J, Binder B, Depner J, Fabre D, Factor J, Ingalls S, Kim S-H, Ladner R, Marks K, Nelson S, Pharaoh A, Shorman G, Trimmer R, vonRosenburg J, Wallace G, Weatherall P. Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS, revised for Marine Geodesy, January 20, 2009

Bernardes B (2007). Hydrodynamical and ecological modelling of the North Sea. MSc dissertation thesis Technical University of Lisbon.

Braunschweig F, Martins F, Leitão P C, Neves R (2003). A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case, Ocean Dynamics, Volume 53 (3): 137-145

Caldeira, R M A (1996). ASOMIR – Applications of Space Oceanography in the Madeira Island Region. MSc Thesis. Institute of Marine Studies, University of Plymouth.

Caldeira R, Lekou S (2000). Madeira um oásis no Atlântico, Uma introdução aos estudos oceanográficos no Arquipélago da Madeira. Marquetizar Ltd. Funchal, Madeira, Portugal.

Caldeira R M A, Groom S, Miller P, Nezhlin N. (2002). Sea-surface signatures of the island mass effect phenomena around Madeira Island, Northeast Atlantic. Remote Sensing of the Environment, 80:336-360



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

- Campuzano-Guillén F J, Allen J H, Scott T (2004). The numerical modelling of ecosystem response to nutrients: Application to the Scheldt estuary and plume. IECS (Institute of Estuarine and Coastal Studies) report, University of Hull, for the European Commission, contract n° EVK3-CT-2000-00040 "EUROTROPH" (report 2 of 4)
- Cancino L, Neves R (1999). Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems. Part II: Application to the Western Scheldt and Gironde estuaries. *Journal of Marine Systems* 22: 117-131
- Coelho H, Neves R, White M, Leitão P, Santos A (2002). A Model for Ocean Circulation on the Iberian Coast. *Journal of Marine Systems*, 32(1-3):153-179.
- deCastro M, Gomez-Gesteira M, Alvarez I, Prego R (2004). Negative estuarine circulation in the Ria of Pontevedra (NW Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60 (2): 301-312
- deCastro M, Gómez-Gesteira M, Prego R, Neves R (2003). Wind influence on water exchange between the ria of Ferrol (NW Spain) and the shelf. *Estuarine and Coastal Shelf Science* 56(5-6): 1055-1064
- Dias C M A, Amorim A, Vacas M D (1992). Sea surface temperature: seasonal variation between the Iberian coast and the Madeira Islands, 1981-1987. *ICES mar. Sc. Symp.*, 195: 177-186
- Drillet Y, Badie B R, Siefridt L, Le Provost C (2005). *Meddies* in the Mercator North Atlantic and Mediterranean Sea eddy-resolving model. *Journal of Geophysical Research*, 110(C3).
- Garcia, H E, Locarnini R A, Boyer T P, Antonov J I (2006a). *World Ocean Atlas 2005, Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation*. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 63, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 342 pp.
- Garcia, H E, Locarnini R A, Boyer T P, Antonov J I (2006b). *World Ocean Atlas 2005, Volume 4: Nutrients (phosphate, nitrate, silicate)*. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 64, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 396 pp.
- Gomez-Gesteira M, Montero P, Prego R, Taboada J J, Leitao P, Ruiz-Villarreal M, Neves R, Perez-Villar V (1999). A two-dimensional particle tracking model for pollution dispersion in A Coruña and Vigo Rias (NW Spain). *Oceanologica Acta* 22(2):167-177
- Gouveia L, Amorim A, Vacas D, Araujo T (1987). Tuna fishery and environmental data collected in Madeira, 1960-1987. *Funchal-Madeira*. 42p
- IH (1979). *Roteiro do arquipélago da Madeira e Ilhas Selvagens*. Instituto Hidrográfico Marinha. Lisboa.
- INIP (1980). Programa de Apoio às Pescas da Madeira- I Cruzeiro de Reconhecimento de Pesca e Oceanografia 020080779. Relatório Técnico Administrativo, INIP 3:141
- INIP (1982). Programa de Apoio às Pescas da Madeira- II Cruzeiro de Reconhecimento de Pesca e Oceanografia 020170680. Relatório Técnico Administrativo, INIP 11:220
- INIP (1984a). Programa de Apoio às Pescas da Madeira- III Cruzeiro de Reconhecimento de Pesca e Oceanografia 020330981. Relatório Técnico Administrativo, INIP 22:124
- INIP (1984b). Programa de Apoio às Pescas da Madeira- IV Cruzeiro de Reconhecimento de Pesca e Oceanografia 020390582. Relatório Técnico Administrativo, INIP 3:120
- Leitão P C (1996). *Modelo de Dispersão Lagrangeano Tridimensional*. MSc dissertation Technical University of Lisbon
- Lyard F, Lefevre F, Letellier T, Francis O (2006) Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics* 56: 394-415
- Riflet G, Leitão P C, Fernandes R, Neves R (2007). Assessing the quality of a pre-operational model for the Portuguese coast. In *European Geosciences Union 2007*, number 09979 in 1607-7962/gra/EGU2007-A-09979.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Rodrigues A, Oliveira A, Fonseca R, Taborda R, Cascalho J (2006). Sedimentary dynamics of the Southern Shelf of Madeira (Portugal). *Journal of Coastal Research Special Issue 39*: 454-458

Santos A, Martins H, Coelho H, Leitão P, Neves R (2002). A circulation model for the European ocean margin. *Applied Mathematical Modelling*, 26(5): 563-582.

Santos A J P, Nogueira J, Martins H (2005). Survival of sardine larvae off the Atlantic Portuguese coast: a preliminary numerical study. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil* 2005 62(4):634-644

Saraiva S, Pina P, Martins F, Santos M, Braunschweig F, Neves R (2007). Modelling the influence of nutrient loads on Portuguese estuaries. *Hydrobiologia* 587:5-18

Silva A J R, Leitão P C (2005). A contribution to the understanding of the Óbidos lagoon dynamics, *Proc. of Coastal Dynamics 2005, International Conference on Coastal Dynamics, Barcelona*.

Silva A J R, Leitão P C, Leitão J C, Braunschweig F, Neves R J J (2002). Ria Formosa 3D hydrodynamic model. A contribution for the understanding of the Faro-Olhão inlet processes. *Proc. of Littoral 2002, 6th Intern. Conf., The Changing Coast, Vol 2*, pp 197-207.

Trancoso A R, Saraiva S, Fernandes L, Pina P, Leitão P, Neves R (2005) Modelling macroalgae using a 3D hydrodynamic-ecological model in a shallow, temperate estuary. *Ecological Modelling* 187: 232-246

Vaz N, Dias J M, Leitão P, Martins I (2005). Horizontal patterns of water temperature and salinity in an estuarine tidal channel: Ria de Aveiro. *Ocean Dynamics* 55: 416-429

Villarreal M, Montero R, Taboada J J, Prego R, Leitão P C, Pérez-Villar V (2002). Hydrodynamic Model Study of the Ria de Pontevedra under Estuarine Conditions. *Estuarine and Coastal Shelf Science* 54(1):101-113