

# EFEITO DAS DESCARGAS DE ÁGUAS RESIDUAIS E EMISSÁRIOS SUBMARINOS NA PRODUÇÃO PRIMÁRIA DA COSTA SUL DA ILHA DA MADEIRA.

Amostragem e modelação numérica da Ilha da Madeira.

Francisco J. CAMPUZANO;

*MSc Ciência e Gestão Costeira e estuarina, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, +351 21 841 9429, [campuzanofj.maretec@ist.utl.pt](mailto:campuzanofj.maretec@ist.utl.pt)*

Susana NUNES;

*Lic. Biologia Marinha, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, +351 21 841 9431, [susana.maretec@ist.utl.pt](mailto:susana.maretec@ist.utl.pt)*

Madalena S. MALHADAS;

*MSc Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, +351 21 841 9432, [madalena.maretec@ist.utl.pt](mailto:madalena.maretec@ist.utl.pt)*

Duarte NUNES;

*Lic. Gestão e Conservação da Natureza, IGA S.A., Rua dos Ferreiros, n.º 148 /150, 9000-082, Funchal, +351 29 120 1020, [dmunes@iga.pt](mailto:dmunes@iga.pt)*

Hilda dePABLO;

*MSc gestão e modelação dos recursos marinhos, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, +351 21 841 9437, [hildadepablo@ist.utl.pt](mailto:hildadepablo@ist.utl.pt)*

Ramiro NEVES

*PhD Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, +351 21 841 7397, [ramiro.neves@ist.utl.pt](mailto:ramiro.neves@ist.utl.pt)*

## Resumo

O presente trabalho surge no âmbito do protocolo de colaboração entre a IGA (Investimentos e Gestão da Água, S.A.) e o MARETEC/IST (Centro de Ambiente e Tecnologias Marinhas do Instituto Superior Técnico) e pretende avaliar o impacto das descargas de efluentes resultantes do tratamento de águas residuais urbanas no meio marinho da orla sul da Ilha da Madeira. Um dos principais objectivos deste estudo consiste na avaliação do impacto destas descargas na produção primária e também na qualidade da água balnear das praias contíguas. O programa de monitorização inclui determinações em laboratório e medições *in situ* com uma sonda multiparamétrica mensalmente. Para explicar os processos mais relevantes foi aplicado um modelo numérico, uma vez que os dados de campo por si só não explicam todos os processos existentes na área de estudo. O trabalho de modelação é efectuado através da aplicação do modelo numérico MOHID, forçado atmosféricamente com resultados obtidos a partir do modelo numérico WRF e forçado com propriedades da água do modelo Mercator e climatologias mensais do World Ocean Atlas 2005, permitindo determinar os factores hidrodinâmicos e climáticos determinantes que condicionam a produção primária nas águas localizadas à volta do arquipélago da Madeira. Assim sendo, estes modelos são capazes de determinar a importância e a origem dos nutrientes na produção primária e avaliar a importância das emissões a partir de terra na dinâmica do sistema.

**Palavras-chave:** Monitorização, Modelação Numérica, Produção Primária, Madeira, Mohid.

## **1 INTRODUÇÃO**

A topografia da Ilha da Madeira é característica das ilhas vulcânicas oceânicas quer na zona emersa, quer na zona imersa, apresentando declives elevados que em terra originam um grande número de bacias hidrográficas de pequenas dimensões e na zona imersa originam grandes profundidades muito perto da linha de costa. Estas características morfológicas têm consequências importantes em termos de gestão de águas residuais e da circulação das águas a volta das ilhas.

O presente estudo teve como objectivo avaliar a qualidade da água no meio receptor da orla sul da Ilha da Madeira e explicar os processos que a determinam. Para isso foi implementado um programa de monitorização e um programa de modelação matemática com duração de um ano, e ao qual se pretende dar continuidade.

## **2 ARÉA DE ESTUDO**

A Ilha da Madeira é a maior ilha do Arquipélago da Madeira e cobre uma área de aproximadamente 737 km<sup>2</sup>. 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 e Lekou, 2000). A pequena dimensão das bacias hidrográficas dá origem a muitos sistemas de saneamento independentes e por conseguinte a um número elevado de pequenas estações de tratamento de águas residuais urbanas. A grande profundidade do oceano perto da costa origina dispersão elevada dos produtos provenientes de terra. Por outro lado, a pequena dimensão da ilha quando comparada com a escala espacial das correntes oceânica faz com que as massas de água oceânica residam pouco tempo na vizinhança da ilha.

As condições meteorológicas nesta região são determinadas principalmente pelo anticiclone subtropical dos Açores, responsável pela predominância dos ventos alísios de nordeste (IH, 1979), com velocidades médias de 20 km/h. Dado que a principal força motriz das correntes oceânicas de superfície são os ventos, significa que as correntes existentes no Arquipélago da Madeira se integram 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, 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 uma menor mistura vertical nas zonas abrigadas a sotavento do que em mar aberto. Da mesma forma actua a crista oceânica entre as Ilhas Desertas e a Ilha da Madeira que apresenta um obstáculo para a circulação geral e influencia o regime local de correntes e de mistura vertical, favorecendo o afloramento de águas profundas frias e ricas em nutrientes.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Programa de monitorização

A caracterização da área de estudo foi efectuada através da realização de campanhas mensais de amostragem em pontos localizados na zona de descarga dos emissários submarinos e ETARs (Estações de Tratamento de Águas Residuais). A Figura 1 mostra a localização dos principais pontos de amostragem: P1-ETAR de Machico; P2-Emissário de Santa Cruz; P3-Emissário do Caniço, P4-Emissário do Funchal, P5-Emissário de Câmara de Lobos, P6-ETAR da Ribeira Brava, P7-ETAR da Ponta do Sol e P8-ETAR de Paúl do Mar.

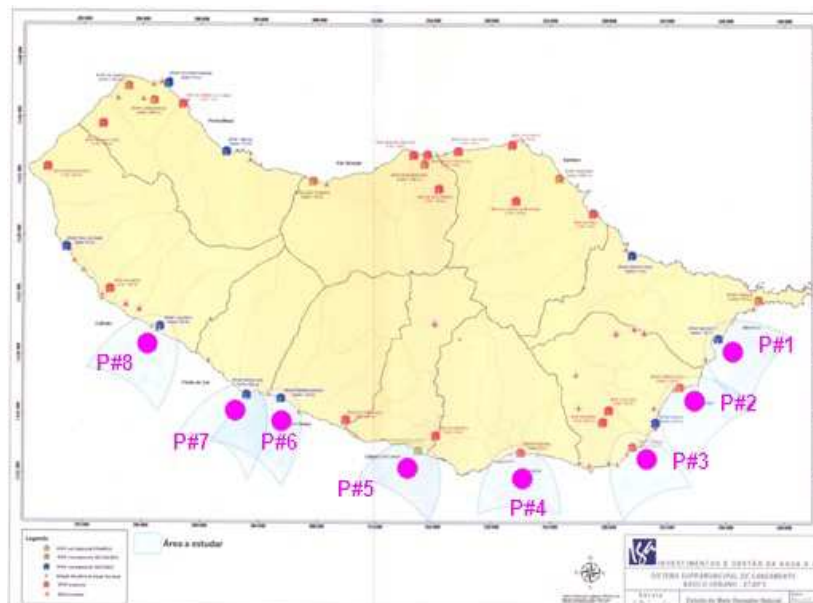


Figura 1 Localização das estações de amostragem.

Em cada um destes pontos, foram realizados perfis verticais para medição de parâmetros físico-químicos utilizando uma sonda multiparamétrica (YSI 6600) equipada com sensores de temperatura, condutividade (salinidade), pH, oxigénio, clorofila e turbidez. Em cada ponto foram recolhidas amostras à superfície para análise laboratorial dos parâmetros matéria particulada em suspensão (MPS), oxigénio dissolvido (método de Winkler), nutrientes (nitrito, nitro, amónia, azoto total dissolvido, fosfatos, fósforo

total dissolvido), Clorofila-a, feopigmentos, azoto orgânico particulado (PON), carbono orgânico particulado (POC), bactérias coliformes (BC), bactérias coliformes termotolerantes (BCT), *Escherichia coli* e Enterococos.

### 3.2 Modelos

A modelação matemática foi baseada num sistema de modelos que incluíam um modelo hidro-ecológico tridimensional, MOHID (Braunschweig *et al*, 2003), ao qual se fornecem condições atmosféricas do modelo WRF, condições iniciais e de fronteira (propriedades hidrodinâmicas, temperatura e salinidade vinda do Mercator Ocean (Drillet *et al*, 2005) e distribuição climatológica vertical de nutrientes e oxigénio da WOA05 (World Ocean Atlas 2005; Garcia *et al*, 2006a & 2006b)) e condições de fronteira aberta vindas do modelo global de maré FES2004 (Lyard *et al*, 2006).

#### 3.3.1 O modelo atmosférico WRF

O modelo de previsão e pesquisa do clima (WRF, <http://www.wrf-model.org/index.php>), é um sistema de previsão numérica do clima desenhado para servir as necessidades de pesquisa e previsão operacional.

O modelo WRF tem sido forçado usando os dados da base de dados NCEP FNL Operational Global Analysis ds083.2 (<http://dss.ucar.edu/datasets/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. Na nossa implementação o modelo utiliza uma malha com uma resolução de 30 segundos produzindo resultados para 27 camadas sigma. As previsões atmosféricas fornecidas pelo modelo WRF são horárias e são interpoladas para a malha de cálculo dos níveis de modelo implementados no MOHID. Estas incluem o forçamento com a temperatura, humidade relativa, radiação solar e vento (intensidade e direcção) para cada célula da malha. Os resultados do modelo WRF têm sido validados com dados de temperatura e intensidade de vento diários do aeroporto de Porto Santo do site <http://www.tutempo.net> obtendo coeficientes de determinação de 0.92 e 0.77 para a temperatura e vento, respectivamente.

#### 3.3.2 O modelo hidro-ecológico (MOHID)

Actualmente, o modelo MOHID (<http://www.mohid.com>) consiste em mais de 60 módulos entre os quais incluem-se os usados neste projecto para a simulação da hidrodinâmica, ecologia e descargas de emissários.

#### 3.3.3 Implementação e aplicação ao caso de estudo

A batimetria da parte sul da ilha (Figura 2) foi fornecida pelo IGA e é proveniente dos levantamentos hidrográficos na costa sul da Ilha da Madeira 2002-2007 realizados pelo Instituto Hidrográfico (IH), 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 são relativos a profundidades entre os 0 e 150 m. 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).

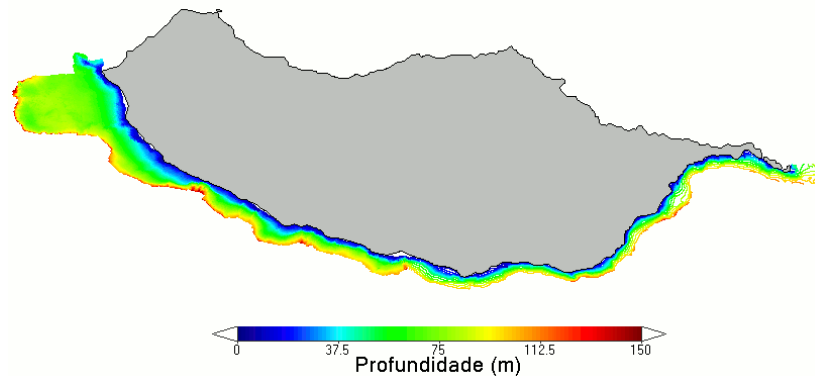


Figura 2 Batimetria da plataforma costeira Ilha da Madeira.

A partir destas duas fontes de dados batimétricos foi implementado um sistema de modelos encaixados com quatro níveis diferentes (Figura 3). Esta abordagem de modelação representa uma solução eficiente que possibilita a redução de escala (downscaling) da solução desde os modelos maiores até aos mais pequenos.

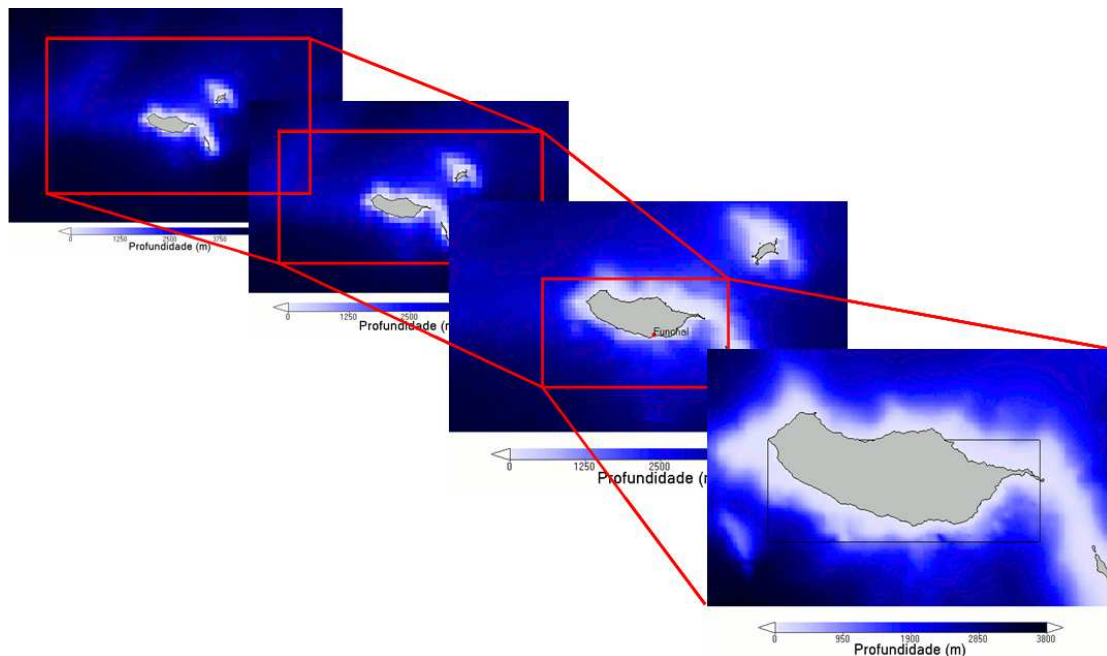


Figura 3 Modelos encaixados implementados para as simulações dos emissários e da produção primária na orla sul da Ilha da Madeira (nível 1 a nível4, por ordem descendente).

Este sistema 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 submarinos da Ilha da Madeira. A comunicação entre modelos é feita *one-way*, ou seja, os modelos de maior escala influenciam os modelos de menor escala, mas não ao contrário.

Na fronteira com o oceano do modelo de nível 1, foi imposta a solução global de maré calculada pelo modelo global FES2004. Este nível consiste num modelo 2D sendo a sua única função, a de fornecer as condições de fronteira de oceano aberto para o segundo nível de modelos encaixados.

O modelo de nível 2 recebe as condições de fronteira do nível anterior e é inicializado com os dados de velocidade, salinidade e temperatura do modelo Mercator Ocean. O modelo é 3D baroclínico, com uma discretização vertical de 50 camadas de domínio cartesiano. No que respeita às condições de fronteira à superfície (interface água/atmosfera), são considerados vento, temperatura, radiação, humidade relativa e fluxos de calor a partir da solução do modelo WRF.

Para além de simular a hidrodinâmica e transporte de salinidade e temperatura, neste nível é activado o módulo de qualidade da água (modelo ecológico) para simular a produção primária da Ilha da Madeira. Além dos principais processos que ocorrem na coluna de água o modelo inclui também a simulação dos processos de mineralização da matéria orgânica nos sedimentos. As condições de fronteira utilizadas para simular a ecologia, consistem em perfis climatológicos mensais de nutrientes inorgânicos e de concentração de oxigénio obtidos do WOA05. Na Figura 4 mostram-se os perfis típicos de nutrientes anuais (esquerda) e o perfil típico de oxigénio (direita) para a Madeira.

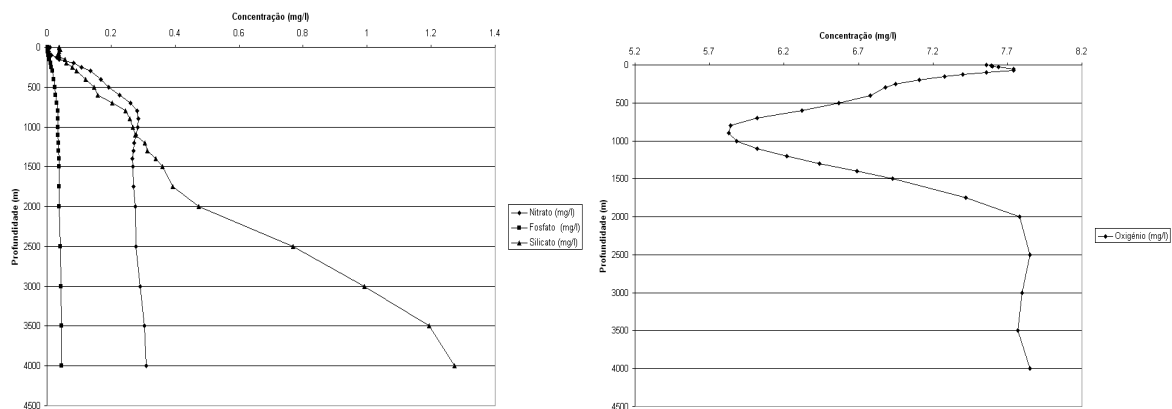


Figura 4. Perfis anuais de nutrientes (esquerda) e oxigénio (direita) anuais na massa de água envolvente da Ilha da Madeira (WOA05).

O modelo de nível 3 recebe a solução hidrodinâmica e os dados ambientais do modelo anterior. Este modelo serve para reduzir à escala os resultados, sendo capaz de fornecer resultados mais detalhados da costa e serve de ponte entre as diferentes escalas dos níveis 2 e 4.

O último nível (nível 4) recebe a solução hidrodinâmica do nível anterior (nível 3) e também tem uma implementação semelhante à do nível 3. A única diferença é que neste nível é activado o módulo lagrangiano e o módulo MOHIDJET, para simular os processos de dispersão (campo próximo e afastado) associados aos emissários submarinos do Funchal e de Câmara de Lobos. Sintetizando, o sistema implementado simula o escoamento na orla sul da Ilha da Madeira, a produção primária e a dispersão das plumas dos emissários do Funchal e de Câmara de Lobos. Na Tabela 1 é descrita a configuração do modelo desenvolvido para estudar a dispersão das plumas dos emissários e a ecologia, que recorre à filosofia de modelos encaixados.

Tabela 1 Características principais e forçamento dos diferentes domínios do modelo.

Nível	1	2	3	4
<b>Coord.</b>	31°30'00", 34°12'00" N 14°48'00", 19°00'00" W	31°51'36", 33°50'24" N 15°13'12", 18°31'12" W	32°09'36", 33°32'24" N 15°31'12", 18°13'12" W	32°27'36", 33°00'00" N 16°30'00", 17°23'60" W
<b>Nº Células</b>	70 x 45 (5.6 km)	55 x 33 (5.6 km)	135 x 69 (1.9 km)	180 x 108 (0.47 km)
<b>Camadas</b>	1 Sigma	50 Cartesianas	50 Cartesianas	50 Cartesianas
<b>Fluxo</b>	Barotrópico	Baroclínico	Baroclínico	Baroclínico
<b>Atmosfera</b>	-	Vento, temperatura, radiação, humidade relativa, fluxos de calor	Vento, temperatura, radiação, humidade relativa, fluxos de calor	Vento, temperatura, radiação, humidade relativa, fluxos de calor
<b>Assimilação</b>	⊗	Velocidades, temperatura e salinidade do modelo Mercator Ocean Nutrientes e oxigénio a partir do WOA05	Velocidades, salinidade e temperatura do nível anterior (nivel2) Modelo ecológico do nível anterior (nivel2)	Velocidades, salinidade e temperatura do nível anterior (nivel3) Modelo ecológico do nível anterior (nivel3)

#### 4 . RESULTADOS E DISCUSSAO

Nesta secção são apresentados os resultados mais relevantes do modelo hidro-ecológico e do modelo que simula a dispersão dos emissários

#### 4.1 Validação do modelo hidrodinâmico

Para a validação do modelo hidrodinâmico foram utilizadas as séries temporais de níveis da maré (disponibilizadas pela Administração dos Portos da Região Autónoma da Madeira - APRAM) observadas no Cais dos Contentores (Funchal), e a temperatura medida em bóias próximas do Funchal e do Caniçal. Para validar a distribuição vertical das massas de água foram usados os dados recolhidos pelo programa Argos (<http://www.argos-system.org/>).

Na Figura 5 são comparados os níveis obtidos através das componentes harmónicas com os resultados obtidos pelo modelo. O coeficiente de correlação entre as duas séries apresenta uma correlação superior a 0.98. Isto significa que o modelo consegue reproduzir a maré astronómica observada no porto num 98%.

Na Figura 6 compara-se as temperaturas medidas através da bóia do IH no Funchal e no Caniçal com as previstas pelo modelo para o período de Novembro de 2008 a Outubro de 2009. Os resultados previstos pelo modelo para ambos os locais, acompanham e reproduzem satisfatoriamente a variação encontrada nas medidas *in situ*.

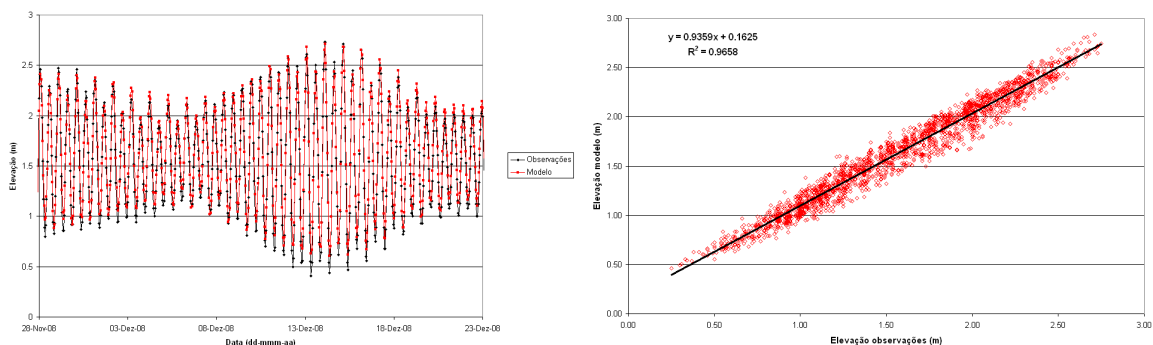


Figura 5 Esquerda: Níveis medidos no Funchal através das componentes da maré (azul) e previstos pelo modelo no nível 3 (vermelho). Direita: Regressão entre os níveis medidos no Funchal através das componentes da maré e as produzidas pelo modelo no nível 3 onde é observada uma elevada correlação.

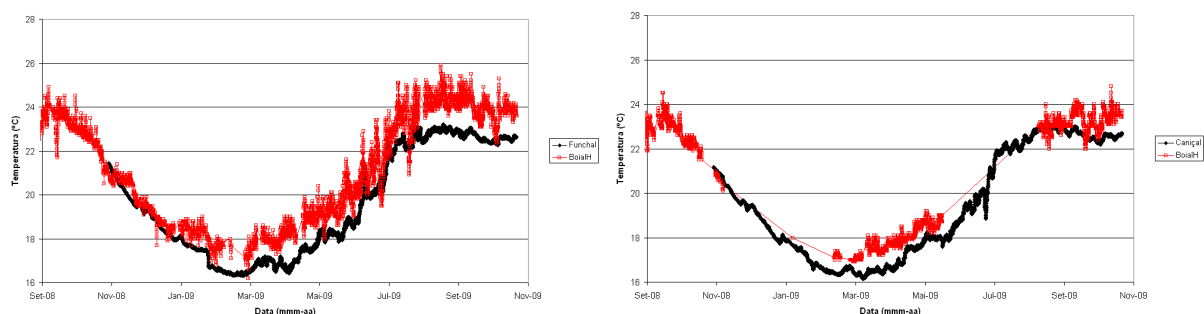


Figura 6 Temperatura medida no Funchal (esquerda) e Caniçal (direita) através da bóia do IH (vermelho) e prevista pelo modelo no nível 3 (preto).



Na Figura 7 mostram-se (da esquerda a direita) os perfis de temperatura, salinidade, o diagrama Temperatura-Salinidade (para identificar as massas de água) e um mapa com a batimetria com a posição da bóia em que foi medido o perfil. Nos gráficos aparecem três linhas que se correspondem aos resultados obtidos pelo modelo MOHID (em vermelho), os dados obtidos pelo modelo Mercator Ocean (em verde) e das observações realizadas pelas bóias de programa Argo (em azul). A comparação do perfil observado com os obtidos pelos modelos MOHID e Mercator Ocean obtém coeficientes de correlação superiores a 0.90. A estrutura vertical de massas de água desta parte do Atlântico distingue-se pela presença das águas mais salgadas procedentes do Mediterrâneo nas profundidades a volta dos 1000 m. Nesta época do ano, meados de Março, observa-se uma camada homogénea a superfície com uma espessura duns 200 m, esta camada não é permanente ao longo do ano e é em parte responsável do ciclo de produção primária nesta área. A presença desta variação brusca de temperatura e salinidade (picnoclina), impede a mistura das águas ricas em nutrientes e mais frias localizadas a partir de essa profundidade com as águas mais quentes e que recebem maior radiação solar por cima deste limite. Quando se dão as circunstâncias propícias para romper esta barreira é quando os nutrientes chegam a superfície.

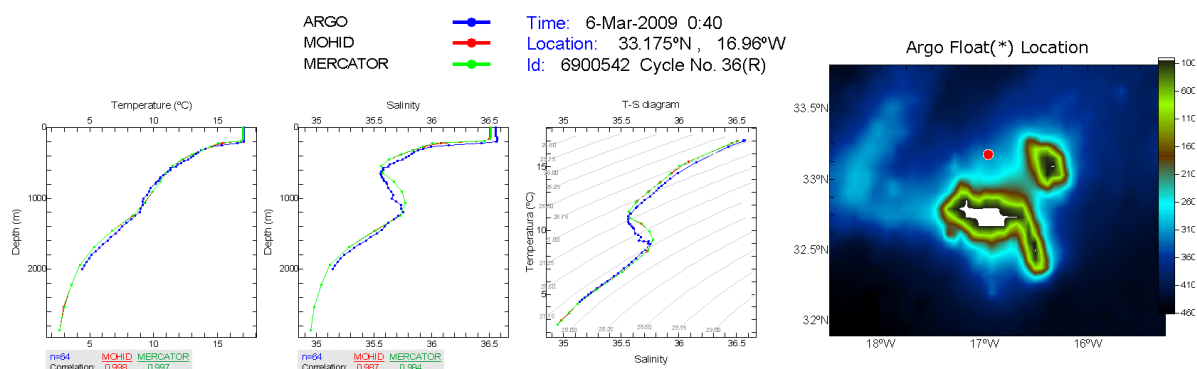


Figura 7 De esquerda a direita: perfil de temperatura, perfil de salinidade, diagrama T-S e posição da bóia Argo onde foram obtidos os dados.

A comparação da temperatura superficial resultante das medições de infra-vermelhos e microondas com uma resolução de 10 km produzidos pela IFREMER/CERSAT com os valores superficiais de temperatura observada no Nível 2 do modelo para o mesmo instante (Figura 8) onde se observa distribuições horizontais semelhantes. Também se observa uma frente de temperaturas com uma orientação NO-SE que aparece durante grande parte das observações.

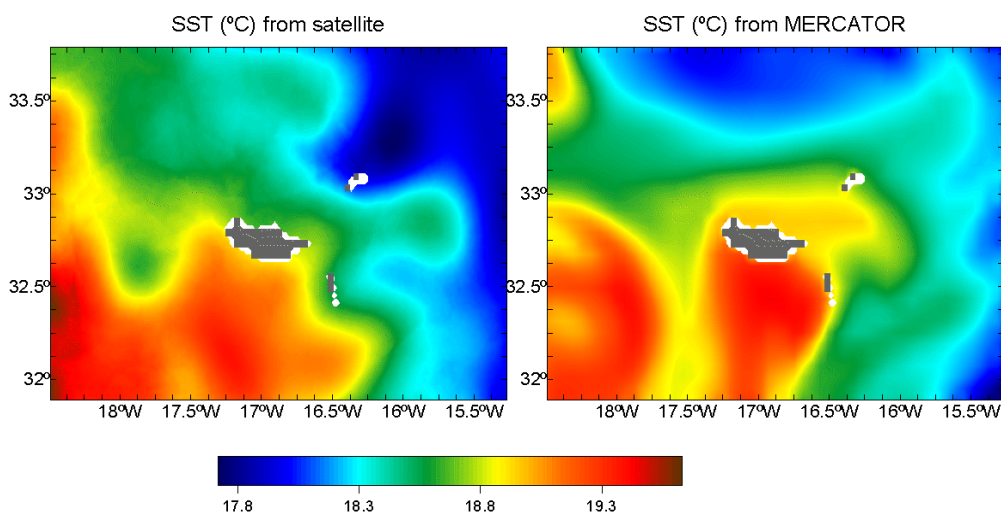


Figura 8 Temperatura Superficial no dia 27 de Dezembro de 2008 obtidas pelo satélite (esquerda) e pelo modelo Mohid (direita) no seu nível 2.

#### 4.2 Validação do modelo ecológico

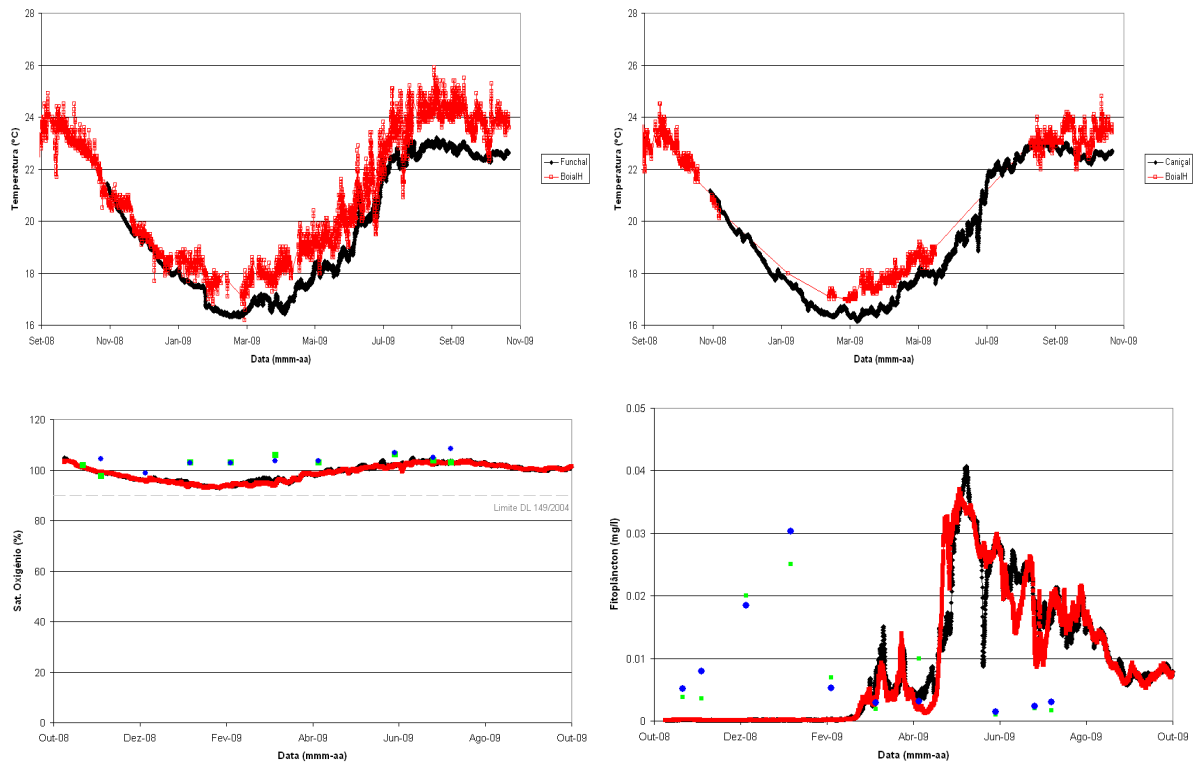
A validação foi feita com valores medidos à superfície das principais propriedades amostradas durante as campanhas mensais do programa de monitorização. A comparação entre as concentrações previstas pelo modelo para o Funchal e o Caniçal (linhas preta e vermelha, respectivamente) e as medidas no (quadrados verdes e círculos azuis, respectivamente) são apresentadas na Figura 9. Na figura apresentam-se os resultados de percentagem de saturação de oxigénio, fitoplâncton, nitrato+nitrato e fosfato.

Os resultados mostram que a percentagem de saturação de oxigénio (a uma determinada temperatura e salinidade) está relacionada com a produção primária (processos de fotossíntese/respiração). Os resultados do modelo são da ordem dos valores observados nas campanhas, embora o modelo estime, nos meses de primavera, um crescimento de fitoplâncton inferior ao observado. Em termos legais, observa-se que o modelo e as medidas estão acima do limite legal do Decreto-Lei n.º 149/2004 (aplicado a águas costeiras menos sensíveis sujeitas a descargas de efluentes, e o qual estabelece um limite mínimo de 90% em águas costeiras).

Os resultados obtidos para o fitoplâncton mostram que o *bloom* acontece mais tarde que as medidas. Os modelos ecológicos precisam dum tempo para equilibrar as condições iniciais até que todas as propriedades abióticas e os aspectos ecológicos se encontrem em equilíbrio. Ao ser este um modelo a grande escala parece precisar dum tempo maior para se adaptar. De esta forma se explica que ao final do ano simulado os valores que apresenta o modelo são da mesma ordem de grandeza que os valores que tem as medidas nos meses iniciais do ano simulado. As medidas apontam para o início do *bloom* no

inverno e máximos na primavera, enquanto que o modelo aponta para concentrações mais altas no fim da primavera. Em termos de produção primária verificam-se concentrações baixas de fitoplâncton ( $0.04 \text{ mgCL}^{-1}$ ). Esta possível explicação deve ser estudada no futuro.

No caso do nitrato+nitrito e do fosfato, aprecia-se nos dados e no modelo um certo padrão que indica um aumento destes parâmetros durante o inverno e primavera, onde volta a decrescer para valores mínimos. O modelo consegue simular os padrões anuais de nutrientes registados nas medidas à superfície, embora tenda a sobrestimar ligeiramente as concentrações previstas face às medidas. As concentrações medidas e as previstas pelo modelo mostram ainda que os nutrientes são baixos e semelhantes aos medidos na zona costeira de estudo (ordem das  $0.1 \text{ mgNL}^{-1}$  para o nitrato,  $0.007 \text{ mgNL}^{-1}$  para a amónia e fosfato).



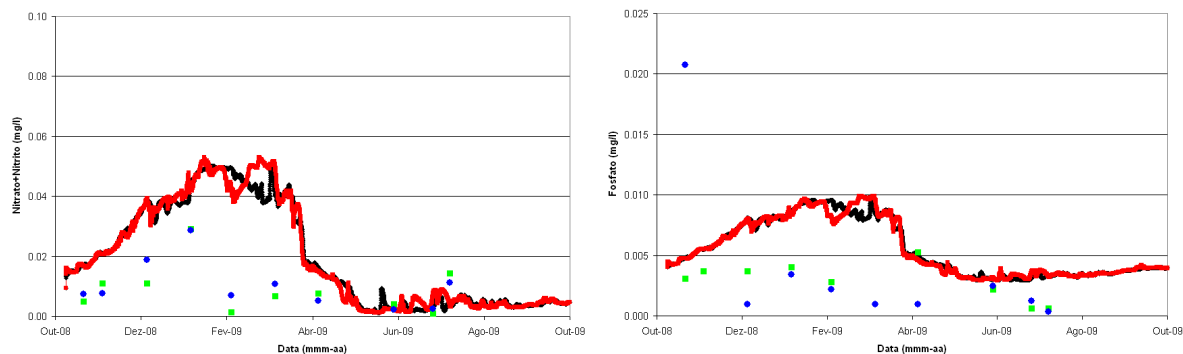


Figura 9 Resultados previstos pelo modelo Funchal e no Caniçal (linhas preta e vermelha) e observados durante as campanhas (quadrados verdes e círculos azuis). Saturação de oxigénio (esquerda superior), fitoplâncton (direita superior), nitrato+nitrito (esquerda inferior) e de fosfato (direita inferior).

### 4.3 Valores obtidos na monitorização

Os dados obtidos ao longo do programa de monitorização mostram que as águas costeiras da orla sul da Ilha da Madeira, apresentam salinidades entre 35.5 e 37.5, valores característicos de águas marinhas, não se detectando a presença de fontes de água doce significativas (i.e., descargas dos emissários e ETA).

Os perfis de oxigénio mostraram níveis representativos de uma coluna de água bem oxigenada. A concentração de clorofila-a foi inferior a  $1 \mu\text{gL}^{-1}$  e a dos nutrientes azotados e fosfatados foi geralmente baixa (inferior a  $0.1 \text{mgNL}^{-1}$ ).

Os parâmetros microbiológicos apresentaram concentrações muito baixas, uma vez que existe uma elevada diluição o que ilustra a grande capacidade depurativa do meio.

### 4.4 Circulação da Ilha da Madeira e dinâmica do fitoplâncton

#### 4.4.1 Circulação da Ilha da Madeira

Tal e 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  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ , a formação de *eddies* e frentes e o aparecimento de águas frias com uma alta produção primária à volta da ilha. Estes fenómenos podem também ser distinguidos através de imagens de satélite, como na Figura 10 onde pode apreciar-se uma esteira de água ao sotavento da ilha.

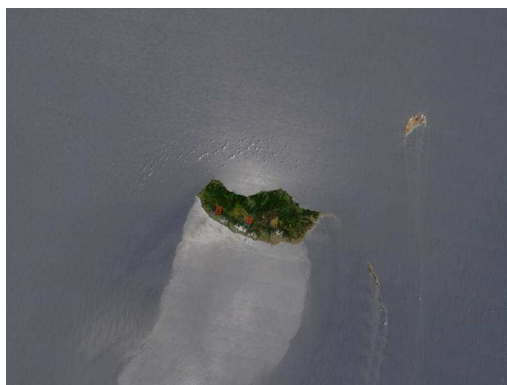


Figura 10 Imagem de satélite da Ilha da Madeira (Fonte: NASA/GSFC, MODIS Rapid Response).

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. A Figura 11 representa uma condição de ventos alísios, e mostra que quando o vento sopra de NE (típico vento alísio), a esteira forma-se a sotavento observando-se uma intensificação da corrente entre a Ilha da Madeira e as Ilhas Desertas (Figura 11, esquerda). A intensificação da corrente a sudeste da Ilha da Madeira produz o ressurgimento de águas mais frias com respeito às envolventes, processo visível através dos resultados de temperatura (Figura 11, direita).

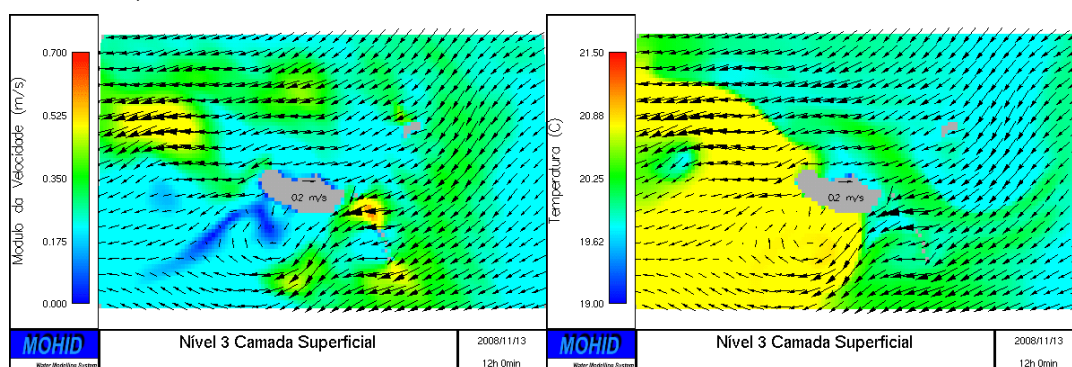


Figura 11 Velocidade (esquerda) e temperatura (direita) superficiais do modelo da Ilha da Madeira no nível 3. As setas representam a intensidade da corrente.

Como já foi referido, é importante estudar a circulação da Ilha da Madeira uma vez que é determinante para os processos ecológicos que ocorrem na ilha. Da análise da circulação, concluiu-se que as esteiras formadas a sotavento afectam a distribuição dos parâmetros físico-químicos e biológicos. Na Figura 12, apresentam-se os resultados do modelo ecológico para o oxigénio dissolvido (esquerda) e nitrato (direita) na camada superficial. Os níveis de oxigénio à superfície são menores que nas massas de águas circundantes, porque existem menores trocas entre o mar e a atmosfera, devido às menores intensidades do vento. Perto das Ilhas Desertas, também ascendem águas com maior concentração de

nutrientes e com menores concentrações de oxigénio dissolvido, tal como pode ser observado através dos perfis da Figura 4.

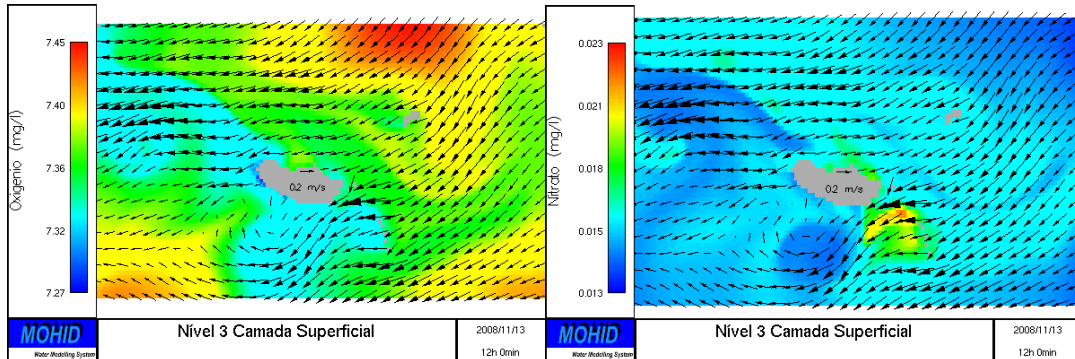


Figura 12 Concentrações de oxigénio (esquerda) e nitrato (direita) superficiais do modelo da Madeira no Nível 3. As setas representam a intensidade da corrente.

#### 4.4.2 Dinâmica do fitoplâncton

A concentração de nutrientes, a luz e a temperatura são parâmetros fundamentais para o crescimento dos organismos. De uma forma geral, o ciclo de nutrientes nas águas do Arquipélago da Madeira consiste, numa primeira fase, na acumulação de nutrientes à superfície devido a condições favoráveis de instabilidade vertical. Estes nutrientes apenas são consumidos quando as condições ambientais de temperatura e radiação favorecem o florescimento da produção primária, principalmente na primavera. Estas condições favorecem também a formação da pycnoclina, que dificulta a entrada de nutrientes provenientes de águas inferiores provocando o decréscimo da produção primária.

Como se pode observar na série temporal do oxigénio e de produtores (Figura 9), o pico de oxigénio coincide com o máximo de produtores. Se explica pelo processo da fotossíntese; os organismos utilizam a energia solar numa complexa série de reacções bioquímicas para combinar o dióxido de carbono com a água e os nutrientes, e assim formar matéria orgânica, desprendendo-se oxigénio nas reacções. Estes máximos culminam com o esgotamento dos nutrientes (Figura 9) e por conseguinte o decréscimo dos produtores primários, mesmo que a temperatura continue a aumentar. É por isto que a produção primária é controlada pelos nutrientes disponíveis no meio e pelos processos físicos. Ao mesmo tempo, a dinâmica de nutrientes na zona costeira de estudo mostra uma variação sazonal que depende dos processos hidrodinâmicos de fundo (i.e., upwelling), da disponibilidade da luz solar e dos nutrientes disponíveis.

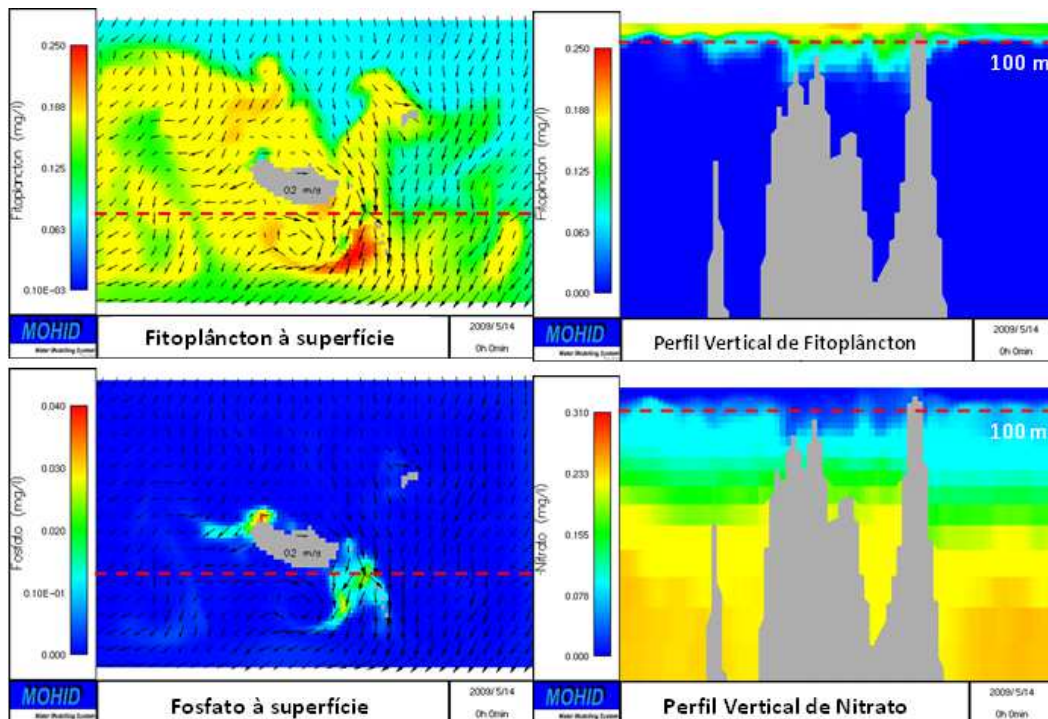


Figura 13. Resultados do modelo ecológico implementado na região da Madeira: Distribuições horizontais de fitoplâncton e de fosfato à esquerda e perfis verticais de fitoplâncton e de nitrato à direita previstas pelo modelo para o dia 14 de Maio de 2009.

Na Figura 13 apresentam-se as distribuições horizontais de fitoplâncton e de fosfato à esquerda e perfis verticais de fitoplâncton e de nitrato à direita previstas pelo modelo para o dia 14 de Maio de 2009. As distribuições horizontais mostram a existência de uma variabilidade espacial elevada em torno das ilhas. Os perfis verticais mostram que essa variabilidade está associada à topografia e à direcção do escoamento. As setas indicam a direcção do escoamento (de Norte/Noroeste nesta altura) e os perfis verticais mostram que antes das ilhas a concentração de fitoplâncton é baixa e que os nutrientes estão esgotados à superfície. Na zona próxima do arquipélago a topografia induz mistura vertical na coluna de água, fazendo aumentar a concentração de nutrientes à superfície e a concentração de fitoplâncton. A concentração máxima de fitoplâncton ocorre longe da costa e mostra que os nutrientes descarregados de terra não são em quantidade suficiente para provocarem o aumento da concentração de microrganismos.

#### 4.5 Plumas dos emissários do Funchal e de Câmara de Lobos

O impacto das plumas dos emissários do Funchal e de Câmara de Lobos, na qualidade da água balnear das praias contíguas a estas descargas, foi avaliado com base nos cenários simulados. Estes incluíram cenários com diferentes tipos de ventos e aumento das concentrações de coliformes nas descargas.

Os resultados obtidos mostram que as plumas têm uma forma circular, com tendência a deslocarem-se em função do regime de ventos. Ao longo do ano, o regime de ventos típicos na Ilha da Madeira são os ventos alísios, logo a pluma está maioritariamente posicionada para sotavento (Figura 14), como resposta aos ventos predominantes. Deste modo, as plumas dos emissários têm tendência para se afastar das praias contíguas a estas descargas.

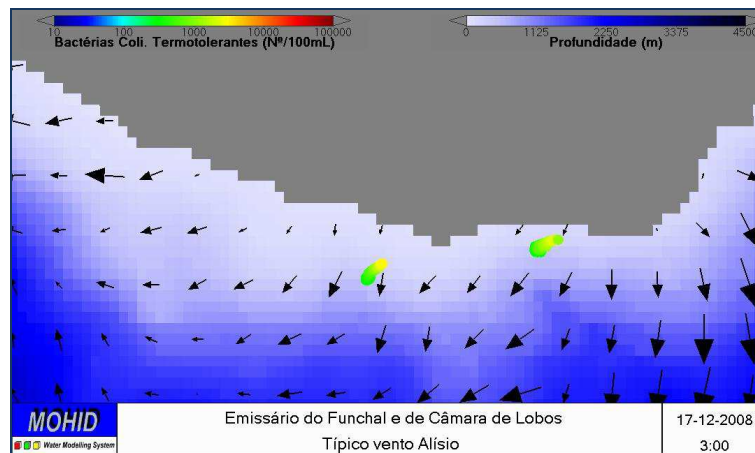


Figura 14 Plumias de Bactérias Coliformes Termotolerantes originadas pelos emissários de Câmara de Lobos e do Funchal: cenário de vento típico alísio.

O impacto em termos microbiológicos nas zonas de descarga é muito localizado e é mínimo, pelo facto destes emissários terem uma grande capacidade de diluição da concentração, a qual é conseguida por descarregarem em zonas muito profundas e de correntes fortes. Nas praias também se prevê um impacto mínimo, porque as concentrações previstas pelo modelo são baixas (ordem dos 100 Coli\_Fecais/100ml) devido ao elevado decaimento das concentrações. Este é conseguido, pela radiação solar, pela salinidade e pela dispersão devido às correntes do meio. As previsões do modelo vão de encontro aos dados obtidos nas praias ao longo do ano de 2009, as quais mostram concentrações baixas ou nulas nas praias contíguas às descargas simuladas neste trabalho.

As descargas dos emissários do Funchal e de Câmara de Lobos não põem em causa a qualidade das águas balneares das praias contíguas a estas descargas pelas razões acima já discutidas.

## 5. CONCLUSÃO

O impacto das descargas dos emissários submarinos e ETAR na produção primária e na qualidade das águas balneares foi analisado com base nos dados de campo obtidos no trabalho de monitorização e nas simulações dos modelos implementados para a zona de estudo. No que se refere à análise dos dados recolhidos para caracterização do meio, pode-se concluir que o impacto das descargas é reduzido e muito



localizado, quer no que se refere à qualidade microbiológica da água, quer no que se refere ao nível trófico do ecossistema. Da mesma forma, nenhuma água balnear é afectada pela descarga dos emissários ou ETAR, porque existe uma elevada mortalidade pela radiação solar, salinidade e dispersão devido às correntes do meio.

Em relação à ecologia das águas do arquipélago, as observações de satélite mostram uma certa relação inversa entre as temperaturas e a produção primária nesta região. As maiores temperaturas observam-se nos meses de Agosto e Setembro, coincidentes com as menores concentrações de clorofila-a. O período com maior produção primária tem lugar na primavera nos meses de Fevereiro a Abril. Este fenómeno pode ser explicado por que é na primavera quando se encontram as condições óptimas para o crescimento devido ao aumento das temperaturas e a concentração de nutrientes presentes na superfície que foram acumulando-se durante os meses de Inverno característicos de uma maior hidrodinâmica.

## BIBLIOGRAFIA

BECKER, J.J.; SANDWELL, D.T.; 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.; TRIMMER, R.; VON ROSENBERG, J.; WALLACE, G.; WEATHERALL, P. – “Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30\_PLUS”, *Marine Geodesy*, **32**, 4, 2009, pp. 355 - 371.

BRAUNSCHWEIG, F.; MARTINS, F.; LEITÃO, P.; NEVES, R. - "A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case", *Ocean Dynamics*, **53**, 3, 2003, pp. 137-145.

CALDEIRA, R.; LEKOU, S. – *Madeira um oásis no Atlântico, Uma introdução aos estudos oceanográficos no Arquipélago da Madeira*. Funchal (Portugal), Marquetizar Ltd., 2000.

CALDEIRA, R.M.A.; GROOM, S.; MILLER, P.; NEZLIN, N. – “Sea-surface signatures of the island mass effect phenomena around Madeira Island, Northeast Atlantic”, *Remote Sensing of the Environment*, **80**, 2002, pp. 336 - 360.

DRILLET, Y.; BADIE, B.R.; SIEFRIDT, L.; LE PROVOST, C. – Meddies in the Mercator North Atlantic and Mediterranean Sea eddy-resolving model, *Journal of Geophysical Research*, **110**, C3, 2005

GARCIA, H.E.; LOCARNINI, R.A.; BOYER, T.P.; ANTONOV, J.I. – *World Ocean Atlas 2005, Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation*. S. Levitus, Washington D.C. (EEUU), U.S. Government Printing Office, 2006a.

GARCIA, H.E.; LOCARNINI, R.A.; BOYER, T.P.; ANTONOV, J.I. – *World Ocean Atlas 2005, Volume 4: Nutrients (phosphate, nitrate, silicate)*. S. Levitus, Washington D.C. (EEUU), U.S. Government Printing Office, 2006b.

IH – *Roteiro do arquipélago da Madeira e Ilhas Selvagens*. Lisboa (Portugal), Instituto Hidrográfico da Marinha, 1979.

LYARD, F.; LEFEVRE, F.; LETELLIER, T.; FRANCIS, O. – “Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004”, *Ocean Dynamics*, **56**, 2006, pp. 394 – 415.