



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Modelação Operacional no Estuário do Tejo

Rodrigo Manuel Antunes dos Santos Fernandes

(Licenciado)

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos**

Orientador: Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves
Co-Orientador: Doutor Paulo Miguel Chambel Filipe Lopes Leitão

Presidente: Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves
Vogais: Doutor Flávio Augusto Bastos da Cruz Martins
Doutor Aires José Pinto dos Santos
Doutor Paulo Miguel Chambel Filipe Lopes Teles Leitão

Março 2005

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Ramiro Neves na qualidade de orientador científico, pelas contribuições para o desenvolvimento deste projecto, mas também pela confiança e motivação transmitidas. E ainda pelo espírito prático e capacidade de tornar fácil o que parece difícil.

Ao colega e co-orientador Paulo Leitão, pela criação do projecto e dinamismo que conseguiu inculcar na sua concretização e desenvolvimento, e pelo incansável apoio e assistência ao longo da realização do mesmo.

Ao colega Frank Braunschweig, que com o seu espírito prático, permitiu a resolução de diversos problemas relacionados com a operacionalidade do sistema.

Ao colega João Silva, por todo o trabalho desenvolvido na parte técnica de aquisição automática de dados.

Às colegas Susana Nunes e Ângela Canas, por fazer parte integrante do mesmo projecto e terem ajudado de forma incansável a manter e a fazer crescer o modelo operacional.

A todos os restantes colegas do grupo Maretec, pela união e apoio demonstrados.

ABSTRACT

An operational modelling system for the Tagus Estuary is implemented, providing historical and real-time observations and daily predictions of several atmospheric and water conditions, including hydrodynamic and biogeochemical properties. A brief review of major water operational modelling systems is done. We characterize the system application area, mainly his circulation patterns. Modelling system framework is explained, as well as main tools involved and developed are described. Different components of data acquisition are analyzed, and water modelling system applied – MOHID – is studied. We make an analysis of modelling scheme configuration, and main options taken in that subject. A Meteorological model was coupled to the water modelling system, and his results are compared with the meteorological station built in Guia. The way information is published and accessed is also subject of analysis. Operational modelling results are compared with information obtained from automatic stations, monitoring campaigns, acoustic Doppler profilers (ADCP) and empirical data estimated from historical measurements made by tidal gauges.

Palavras-Chave: MOHID, monitoring, modelling, operational modelling, Tagus estuary, hydrodynamics

RESUMO

É implementado um sistema integrado de modelação operacional para o estuário do Tejo, em que são disponibilizados dados registados históricos e em tempo real, e previsões diárias de condições do meio atmosférico e aquático através de uma interface na internet. É efectuada uma sintética revisão dos principais sistemas de modelação operacional. Caracteriza-se a área de aplicação do sistema, principalmente o seu padrão de correntes. É explicada a arquitectura de implementação do sistema, e das principais ferramentas envolvidas e desenvolvidas. Descrevem-se as diferentes componentes da rede de monitorização envolvida, bem como o sistema de modelação utilizado - MOHID. É analisada a configuração do esquema de modelação adoptado e as principais opções tomadas. É ainda caracterizado o modelo atmosférico que foi acoplado ao modelo operacional, e é feita uma comparação com os dados da estação meteorológica da Guia. A forma de acesso e publicação dos produtos do sistema é também descrita. Os resultados da modelação operacional são comparados com informação recolhida por estações automáticas, campanhas de monitorização, perfiladores acústicos (ADCP), e valores empíricos estimados a partir de dados históricos de marégrafos.

Palavras-Chave: MOHID, modelação, modelação operacional, monitorização, estuário do Tejo, hidrodinâmica

ÍNDICE

1.	Introdução	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Contexto	2
1.3	Objectivos	2
1.4	Descrição	3
2.	Estado da arte em modelação operacional	4
2.1	Conceito de Modelação Operacional.....	4
2.2	Produtos, Serviços e Comunidade de Utilizadores Finais	5
2.3	Principais Sistemas Operacionais	7
2.3.1	Modelos à escala global	7
2.3.2	Modelos à escala regional e local	8
	GoMOOS – <i>Gulf Of Maine Observing System</i>	8
	PORTS – Physical Oceanographic Real-Time System.....	9
	Modelo Operacional do Estreito Juan de Fuca.....	10
	Sistema MERMAID – OPMOD	10
	Modelo Farvands	10
	Mediterranean Forecasting System	10
	Outros Modelos	12
2.4	Arquitectura do Sistema	12
2.5	Rede de Monitorização	13
2.6	Modelação Física	15
2.7	Modelação Ecológica / Qualidade da Água.....	18
2.8	Assimilação de Dados	19
2.9	Interface para os utilizadores finais	19
3.	Área de estudo – Estuário do Tejo.....	21
3.1	Caracterização do estuário	21
3.2	Rio Tejo	22
3.3	Embocadura do estuário	23
3.3.1	Padrão de Correntes.....	23

4.	Implementação do Sistema.....	25
4.1	Metodologia / Arquitectura do Sistema.....	25
4.2	Dados de Campo	26
4.2.1	Sistemas de Aquisição Fixos.....	26
4.2.1.1	Estação Meteorológica da Guia	26
4.2.1.2	Estação de Monitorização de Correntes e Qualidade da Água em Paço de Arcos	28
4.2.1.3	Estação Hidrométrica de Ómnias	29
4.2.1.4	Gestão dos dados das estações automáticas.....	30
4.2.2	Campanhas de Amostragem Clássica	30
4.2.3	Campanhas de Amostragem por Sensores.....	31
4.2.4	Detecção Remota.....	32
4.3	Modelação e Previsão.....	32
4.3.1	Sistema de modelação MOHID	33
4.3.1.1	Descrição Geral do Sistema	33
4.3.1.2	MOHID Water.....	34
4.3.1.3	Interface Gráfica para o utilizador.....	46
4.3.2	Validação do Sistema MOHID na área de estudo.....	47
4.3.3	Condições do Modelo Operacional Implementado.....	47
4.3.4	Acoplamento a um modelo atmosférico.....	50
4.3.4.1	Descrição geral do modelo de previsão meteorológica do IST.....	50
4.3.4.2	Validação do modelo de previsão meteorológica do IST na área de estudo.....	52
5.	Resultados	61
5.1	Publicação / Acesso aos produtos do sistema operacional.....	61
5.1.1	Estações automáticas	61
5.1.2	Campanhas de monitorização.....	62
5.1.3	Modelação.....	63
5.2	Análise e Discussão de Resultados.....	64
5.2.1	Hidrodinâmica.....	64
5.2.1.1	Níveis.....	64
5.2.1.2	Correntes	68
5.2.2	Temperatura e Salinidade	74
5.2.3	Parâmetros Microbiológicos (Coliformes Fecais)	78
5.2.4	Parâmetros Biogeoquímicos	81
5.2.4.1	Sedimentos Coesivos	83
5.2.4.2	Clorofila	84
5.2.4.3	Nitratos.....	85

5.2.4.4	Azoto Amoniacal	86
5.2.4.5	Oxigénio Dissolvido.....	86
6.	Conclusões e Trabalho Futuro	88
7.	Referências	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 – Factores envolventes na oceanografia operacional.....	4
Figura 3-1 – Estuário do Tejo (ortofoto).....	21
Figura 3-2 - Estuário do Tejo: Costa do Estoril e Emissário da Guia	23
Figura 3-3 – Principais processos que influenciam as correntes na embocadura do estuário do Tejo (Leitão, 2002)	24
Figura 4-1 - Esquema ilustrativo das componentes de um modelo operacional	25
Figura 4-2: Localização da estação meteorológica da Guia	27
Figura 4-3 - Estação Meteorológica da Guia.....	27
Figura 4-4: localização da bóia no estuário do Tejo	28
Figura 4-5 - Suporte com Equipamento do Sistema de Monitorização da Qualidade de Água	28
Figura 4-6: Localização da estação hidrométrica automática de Ómnias (INAG).....	29
Figura 4-7: Posições de fundeamento do ADCP durante o ano de 2003.....	31
Figura 4-8 - Cálculo da velocidade média dos traçadores.	42
Figura 4-9 - Movimento aleatório forçado por vórtices maiores que o traçador (círculo cinzento).....	42
Figura 4-10 - Malha ilustrativa das potencialidades de discretização vertical do sistema MOHID	43
Figura 4-11 – Exemplo de aplicação de passo variável ao estuário do Tejo.....	44
Figura 4-12 - Modelos encaixados aplicados ao estuário do Tejo. Estudo efectuado no âmbito do plano de monitorização da qualidade da água das praias da costa do Estoril.....	45
Figura 4-13 – <i>MOHID Scheduler</i> : exemplo de ferramenta operacional integrada na interface gráfica MOHID	46
Figura 4-14 - Modelos encaixados em três níveis. Nível 1: modelo de larga escala para a parte da costa oeste portuguesa; Nível 2: modelo de escala regional para o estuário do Tejo; Nível 3: (modelos de escala local) – (a) zona do emissário da Guia, e (b) zona de entre Carcavelos e Paço de Arcos.	49
Figura 4-15 - Velocidade do vento às 12 horas no dia 24 de Março de 2003. Estes resultados são produzidos pelo Prof. Delgado Domingos (Departamento de Ambiente do IST) recorrendo ao modelo atmosférico MM5	51
Figura 4-16 - Evolução da radiação solar na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST	52
Figura 4-17 - Evolução da radiação solar na zona da Guia para um período de 72 horas, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST	53
Figura 4-18 - Evolução da pressão atmosférica na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST.....	53
Figura 4-19 - Evolução da precipitação atmosférica na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST.....	54
Figura 4-20: Evolução da magnitude do vento na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST.....	54

Figura 4-21: Evolução da componente zonal do vento na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST.....	55
Figura 4-22: Evolução da componente meridional do vento na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST.....	55
Figura 4-23: Frequência do vento por rumo na zona da Guia em 2004, registada pela estação meteorológica da Guia e simulada pelo modelo atmosférico do IST	56
Figura 4-24: Intensidade média do vento por rumo na zona da Guia em 2004, registada pela estação meteorológica da Guia e simulada pelo modelo atmosférico do IST	56
Figura 4-25: Evolução da componente meridional do vento (filtrada para valores positivos) na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST	58
Figura 4-26 - Evolução da temperatura na zona da Guia, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST	59
Figura 4-27 - Evolução da temperatura na zona da Guia para um período de 72 horas, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST	59
Figura 4-28 - Evolução da humidade relativa na zona da Guia, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST	60
Figura 4-29 - Evolução da humidade relativa na zona da Guia para um período de 72 horas, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST	60
Figura 5-1 – Resultados na Internet: Gráfico com temperatura medida pela estação meteorológica.....	62
Figura 5-2 - Resultado do modelo para o dia 18 de Março de 2003. A figura representa a salinidade e velocidades à superfície	63
Figura 5-3 – Pontos de validação da evolução do nível da água simulado pelo modelo.....	64
Figura 5-4 – comparação das componentes harmónicas obtidas do IH com os resultados do modelo operacional em (a) Cascais e (b) Vila Franca de Xira.....	65
Figura 5-5: Enviesamento do Modelo para os níveis de maré.....	66
Figura 5-6: Coeficiente de Correlação para os níveis de maré.....	66
Figura 5-7: Raiz do erro quadrático médio (RMSE) do modelo e desvio padrão dos valores empíricos para os níveis de maré	67
Figura 5-8 – Dados do sensor de corrente e resultados do modelo (intensidade da corrente).....	68
Figura 5-9 - Dados do sensor de corrente e resultados do modelo (intensidade e direcção da corrente)....	68
Figura 5-10 - Diagramas de dispersão a diferentes profundidades das medidas de velocidades das correntes com o ADCP ao longo do período de 24 de Outubro e 25 de Novembro de 2003. (a) 0m; (b) 15m; (c) 25m; (d) média na coluna de água	70
Figura 5-11 - Perfil de velocidades residuais das correntes medidas pelo ADCP e simuladas pelo modelo operacional MOHID, entre 24 de Outubro e 25 de Novembro de 2003	71
Figura 5-12 - Velocidades à superfície das correntes medidas pelo ADCP e simuladas pelo MOHID, e velocidade do vento, entre 2 e 4 de Novembro de 2003. (a) velocidade-Este perto da superfície; (b) velocidade – Norte perto da superfície; (c) velocidade-Este perto do fundo; (d) velocidade – Norte perto do fundo.....	72
Figura 5-13: Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) do modelo operacional e Desvio Padrão do ADCP na zona da Guia, obtida a partir do período entre 24 de Outubro e 25 de Novembro de 2003.....	73
Figura 5-14: Coeficiente de correlação entre o modelo operacional face ao ADCP na zona da Guia, obtida a partir do período entre 24 de Outubro e 25 de Novembro de 2003	73

Figura 5-15 - Simulação da temperatura à superfície para 20/11/2003 na costa de Estremadura.....	74
Figura 5-16: Evolução da temperatura e salinidade à superfície, na zona do emissário da Guia	75
Figura 5-17: Evolução da temperatura e salinidade a meia-água, na zona do emissário da Guia.....	75
Figura 5-18: Evolução da temperatura e salinidade junto ao fundo, na zona do emissário da Guia.....	75
Figura 5-19: Comparação de SST entre imagem de satélite MODIS (NASA) e modelo operacional MOHID no dia 14-4-2004.....	76
Figura 5-20: Comparação de SST entre imagem de satélite MODIS (NASA) e modelo operacional MOHID no dia 20-1-2005.....	76
Figura 5-21: Comparação de entre imagem de satélite MODIS (NASA) e modelo operacional MOHID no dia 25-1-2005.....	77
Figura 5-23 - Comparação de resultados de coliformes fecais do modelo 3D de diluição inicial e dispersão com os valores medidos para o mesmo parâmetro e local (P8), às respectivas profundidades, no ano de 2004.....	79
Figura 5-24 - Comparação de resultados de coliformes fecais do modelo 3D de diluição inicial e dispersão com os valores medidos para o mesmo parâmetro e local (P1), às respectivas profundidades, no ano de 2004.....	79
Figura 5-25 - Comparação de resultados de coliformes fecais do modelo 3D de diluição inicial e dispersão com os valores medidos para o mesmo parâmetro e local (P6), às respectivas profundidades, no ano de 2004.....	80
Figura 5-26 - Comparação de resultados de coliformes fecais do modelo 3D de diluição inicial e dispersão com os valores medidos para o mesmo parâmetro e local (P12), às respectivas profundidades, no ano de 2004.....	80
Figura 5-27 – Comparação de concentração de Coliformes fecais na zona do emissário da Guia a 26/11/2004, para uma simulação com taxa de mortalidade (T90) constante – (a) e variável (b)	81
Figura 5-28 - Dados de campo incluídos na comparação com resultados de qualidade da água do modelo operacional MOHID	82
Figura 5-29: localização do perfil horizontal utilizado para comparar resultados de matéria em suspensão	83
Figura 5-30: Perfis horizontais da concentração de sedimentos em suspensão obtida através de imagens de satélite (MERIS) e do modelo Mohid em Maio (a) Agosto (b) e Outubro (c)	83
Figura 5-31: Comparação de resultados do modelo de qualidade da água no P8 com a média dos valores medidos nos pontos mais próximos da zona do emissário, para a clorofila_a (C/Chla a = 60 e C/Chla a = 30), no ano de 2004.....	84
Figura 5-32 - Comparação de resultados do modelo de qualidade da água no P8 com a média dos valores medidos nos pontos mais próximos da zona do emissário, para os Nitratos, no ano de 2004.....	85
Figura 5-33 - Comparação de resultados do modelo de qualidade da água no P8 com a média dos valores medidos nos pontos mais próximos da zona do emissário, para o azoto amoniacal, no ano de 2004.....	86
Figura 5-34 - Comparação de resultados do modelo de qualidade da água no P8 com a média dos valores medidos nos pontos mais próximos da zona do emissário, para o oxigénio dissolvido, no ano de 2004.....	86

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4-1: Posições de fundeamento do ADCP e respectivos períodos.....	31
Tabela 4-2 – Configuração do modelo operacional.....	48
Tabela 5-1 - Sistema de informação geográfica desenvolvido para gestão e pesquisa dos dados armazenados.....	62
Tabela 5-2 - Propriedades simuladas pelo modelo operacional que são divulgadas sob a forma de mapas	63
Tabela 5-3: Posições e períodos de fundeamento do ADCP da SANEST na zona do emissário da Guia	70

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A Directiva Quadro da Água (2000/60/EC) adoptada pelo Parlamento Europeu e pelo Conselho da União Europeia a 22 de Dezembro de 2000 reforça a ideia de que a gestão da água deve ser considerada do ponto de vista do ecossistema e que devem ser estabelecidos sistemas de monitorização e acompanhamento, capazes de, não apenas detectarem fenómenos pontuais onde parâmetros específicos sobem acima de determinados valores estabelecidos, mas também de compreender os processos que determinam esses eventos e as suas tendências espaciais e temporais. Isto torna-se particularmente claro quando é afirmado que os Estados Membros deverão estabelecer um sistema de monitorização de vigilância e um sistema de monitorização operacional, definindo-se que tais programas deverão usar a informação existente, meios adequados e modernos e ferramentas de modelação capazes de funcionar como elemento de integração, interpretação e previsão.

Tradicionalmente a monitorização dos sistemas aquáticos era feita com recurso a medidas pontuais no espaço e no tempo. Um sistema de monitorização que tenha por base apenas esta metodologia tem dificuldade em dar respostas objectivas sobre a evolução da qualidade da água de um determinado sistema aquático, tendo em conta as exigências actuais. Cada vez mais são propostas abordagens mistas, de forma a obviar o carácter discreto da metodologia anteriormente referida que, por vezes, levanta dificuldades na análise de sistemas muito dinâmicos como é o caso dos estuários.

As abordagens mistas consistem em cruzar dados obtidos pela forma clássica com medidas feitas em contínuo por sistemas de aquisição automática de dados (ex: ADCP's, sondas multiparâmetro) e por detecção remota (ex: sensores instalados em satélites e aviões). No entanto, apesar da espectacular evolução que se verificou na recolha de dados de campo, estes ainda fornecem apenas uma visão discreta dos sistemas aquáticos. Os modelos numéricos, que reproduzem os processos que condicionam a variabilidade dos parâmetros de qualidade da água, apresentam-se como a melhor solução para dar continuidade espacial e temporal aos valores medidos. Este tipo de ferramentas numéricas tem a vantagem adicional de possuir um carácter de previsão que permite o estudo de cenários e o teste da eficácia das políticas delineadas.

É assim que surge o conceito de sistema de modelação operacional. O conceito passa pelo desenvolvimento de uma ferramenta integrada de apoio à decisão que combine diferentes tecnologias (modelação, sistemas de aquisição de dados e gestão de bases de dados), capazes de lidar eficientemente com os problemas complexos associados à gestão ambiental costeira. Um modelo operacional pode ser visto como uma ferramenta de utilidade imediata que produz

previsões que podem ajudar à gestão de situações de acidente, na calendarização de actividades (ex.: obras, regatas, ida à praia), na delineação de campanhas de monitorização, etc. Todavia, pode também ser visto como uma ferramenta de estudo dum sistema natural (ex.: estuário do Tejo). Um modelo operacional exige um aprofundamento contínuo dos processos responsáveis pela variabilidade dos parâmetros. A informação produzida ao longo do tempo pode ser encarada como o "historial" do sistema que permite interpretar, com mais segurança, resultados de campanhas de medidas convencionais.

1.2 Contexto

O contexto para a realização desta tese foi a experiência existente no Grupo de Investigação MARETEC em modelação de sistemas aquáticos, bem como na realização de campanhas de monitorização de qualidade da água, especialmente na zona do estuário do Tejo. Este trabalho surge como a sequência lógica do trabalho desenvolvido ao nível de validação do modelo MOHID para a zona do estuário do Tejo, associado à metodologia desenvolvida ao nível do modelo no sentido de integrar diferentes escalas e processos na modelação do ambiente marinho (Leitão, P.C 2003). Estes itens, aliados ao esforço que tem sido feito no sentido de dotar o modelo MOHID de capacidade de apoio a eventuais situações de emergência (Leitão, J.C. 2003), bem como a aprendizagem que tem sido feita pelo grupo ao nível de gestão, tratamento e divulgação de dados e informação, resultam nos pilares fundamentais ao desenvolvimento de uma ferramenta integrada de monitorização e modelação operacional no estuário do Tejo.

As forças motrizes deste trabalho têm sido a participação do grupo em programas de monitorização do estuário do Tejo financiados pela SANEST, REALTIME e mais recentemente pela SimTejo, assim como a crescente preocupação do INAG na monitorização da evolução espacial e temporal dos níveis tróficos no Estuário de Tejo.

1.3 Objectivos

Com este trabalho pretende-se atingir o objectivo essencial de desenvolvimento de uma ferramenta com capacidade de modelação em tempo real de sistemas aquáticos como é o caso do estuário do Tejo. Outro objectivo passa pelo armazenamento, processamento e divulgação de toda a informação relacionada com aquisição de dados medidos pontualmente e em contínuo e resultados do modelo na referida zona. Por último, pretende-se ainda a validação e comparação dos resultados da modelação com os dados de campo. Este passo deve ser atingido através de comparações feitas em tempo real e em análises "à posteriori". A execução de todos estes objectivos em conjunto resulta no desenvolvimento de uma ferramenta integrada de modelação operacional para o estuário do Tejo.

1.4 Descrição

No segundo capítulo é feita uma breve descrição do estado da arte em modelação operacional, bem como a exemplificação de alguns sistemas de modelação de sistemas aquáticos em funcionamento em tempo real.

No terceiro capítulo é analisado o estuário do Tejo, nomeadamente as suas características morfológicas e ecológicas, afluentes, e principalmente, o padrão de correntes nele existente.

Segue-se o capítulo que se refere ao processo de implementação do sistema. É esquematizada a arquitectura do sistema, efectuando uma descrição e análise das diferentes componentes e ferramentas que o compõem. Fazem parte integrante desse sistema diferentes tipos de aquisição de dados, e sistemas de modelação, bem como todo o mecanismo inerente à gestão da informação. Assim, são descritos os diferentes sistemas fixos de aquisição automática, as campanhas de monitorização por amostragem clássica e por sensores, a detecção remota, e o sistema MOHID. Neste, são focadas essencialmente as componentes utilizadas no modelo operacional, e a validade do MOHID na área de estudo. Acoplado ao modelo MOHID, é utilizado o modelo de previsão meteorológica do IST, que também é alvo de uma análise e comparação com os dados registados pela estação meteorológica da Guia.

A informação que é manipulada no sistema de monitorização é alvo de divulgação e publicação na internet, sendo a descrição deste processo efectuada já no capítulo 5. É ainda neste capítulo que se procede à análise de resultados, através de comparações com o correntómetro instalado em Paço de Arcos, com os níveis de maré obtidos a partir das componentes harmónicas, comparações com o perfilador acústico (ADCP), com imagens de satélite, e, por último, com dados de campanhas de monitorização com amostragem clássica.

2. ESTADO DA ARTE EM MODELAÇÃO OPERACIONAL

2.1 Conceito de Modelação Operacional

A modelação operacional pode ser entendida com fazendo parte da oceanografia operacional.

De acordo com Prandl (2000a), a oceanografia operacional inclui a realização, disseminação e interpretação de medidas nos mares e oceanos, de modo a tornar disponíveis previsões de condições futuras, e consiste em simulações em tempo-real, e previsões. Porém, a ideia de um sistema operacional não se resume apenas a um modelo numérico com previsões diárias. Um sistema operacional deve ser entendido como uma infra-estrutura de modelos acoplados, um conjunto de dados de entrada (incluindo batimetrias a condições iniciais) e uma rede de monitorização automática (incluindo detecção remota, embarcações, bóias, etc.), todos integrados num modelo operacional. Através de uma aplicação, bases de dados para armazenamento de medidas e previsões, mecanismos e ferramentas de validação das diferentes fontes de informação, esse conjunto de informação e resultados é disponibilizado em formato útil para os utilizadores finais.

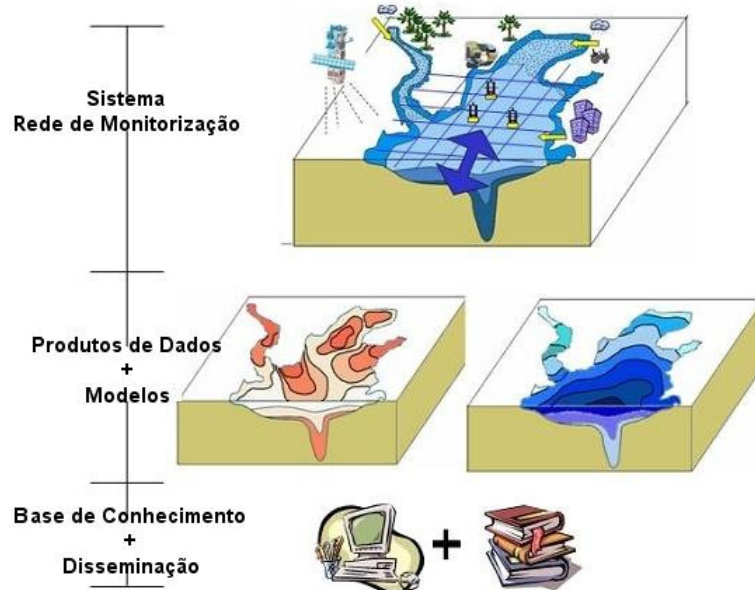


Figura 2-1 – Factores envolventes na oceanografia operacional

Na mesma filosofia, no projecto EuroGOOS, o objectivo de um sistema de previsão operacional é a produção de previsões do estado do mar, e respectivos componentes bioquímicos marinhos para um determinado período de tempo. De modo a produzir essas previsões, o sistema deve incluir de forma sistemática, uma rede de observação / monitorização com sistemas de análise e aquisição em tempo-real, modelos numéricos e procedimentos de assimilação de dados (Pinardi e Flemming, 1998).

2.2 Produtos, Serviços e Comunidade de Utilizadores Finais

Um sistema de modelação operacional pode gerar uma vasta lista de diferentes produtos e serviços. Esses produtos envolvem diversas escalas temporais, não só futuras, mas também presentes e passadas, isto é:

- *Nowcasts* (previsões em tempo útil) – disponibilizam a informação detalhada mais exacta possível do actual estado do mar, incluindo os recursos vivos
- *Forecasts* (previsões) – disponibilizam previsões contínuas da futura condição do mar, para o período mais longo possível
- *Hindcasts* (reconstituições) – Associação de uma série de dados que fornecerão dados suficientes para a descrição de estados passados, e séries temporais mostrando tendências e alterações.

De seguida são descritos alguns dos produtos e serviços que podem surgir num sistema de modelação operacional, agrupados pelas diferentes escalas temporais envolvidas.

Previsão (até 10 dias):

- Procura e resgate
- Evolução de derrames de petróleo
- Potenciais blooms de algas tóxicas
- Transporte e dispersão de partículas e distribuição de massas de água (p.ex., ovas e larvas de peixes, contaminantes, matéria suspensa, águas dos rios)
- Clima "costeiro" (p.ex., correntes, turbulência, temperatura, salinidade, ondas, nível do mar, vento, temperatura do ar)

Reconstituições mensais, sazonais ou anuais; Previsões em tempo útil

- Produção primária (p. ex., aparecimento/magnitude/distribuição de diatomáceas e flagelados)
- Eutrofização (p.ex., nutrientes, oxigénio)
- Transporte de nutrientes e de material em suspensão
- Padrões de transporte e diluição de descargas potencialmente poluídas
- Clima "costeiro" (p.ex., correntes, turbulência, temperatura, salinidade, ondas, nível do ar, vento, temperatura do ar)

Observações plurianuais, reconstituições, e cenários de simulação:

- Produzir e actualizar longas séries temporais do clima de meios aquáticos, e variabilidade de ecossistemas (especialmente ao nível dos níveis tróficos mais baixos)

2 - Estado da arte em modelação operacional

- Demonstrar o estado potencial de climas costeiros, ou regionais, e estado e variabilidade de ecossistema, face a hipotéticos futuros cenários climáticos
- Quantificar os efeitos de diferentes cenários de gestão nos ambientes costeiros (nomeadamente ao nível produção primária, eutrofização, e transporte de nutrientes).

A avaliação cuidada de muitos destes produtos e serviços torna mais clara a vasta comunidade de potenciais utilizadores a quem um sistema operacional pode de facto interessar.

Castellucci (2002) caracteriza a importância da oceanografia operacional da seguinte forma:

- Para grandes empresas com impacto nos recursos aquíferos (através de localização espacial ou tecnologia adoptada), pode providenciar uma certificação sobre os resultados previstos a curto e a longo prazo, por exemplo, para responder a grupos ecologistas e a exigências da concorrência;
- Pode fornecer aos governos nacionais informação para "libertar as suas intervenções económicas e ambientais da pressão dos lobbies;
- É útil em casos específicos como:
 - A avaliação de risco de certas decisões (por exemplo, em estudos de segurança);
 - Disputas na adopção de tecnologia;
 - Validação de regulamentos;
 - Aconselhamento em políticas de implementação.

Contudo, e com base nos produtos e serviços gerados por um sistema operacional para oceanos ou zonas costeiras, é possível estabelecer uma lista bem mais exaustiva de interesses e comunidades envolvidas:

- Autoridades ambientais costeiras responsáveis pela gestão da área costeira e seus recursos vivos;
- Autoridades locais ou centrais responsáveis pela gestão de situações de emergência ocorridas nas suas águas territoriais. A constante monitorização, disponibilização de análises e previsões do mar e dos parâmetros bioquímicos associados fornecem importantes auxílios para as decisões necessárias em caso de situações de emergência (derrames de hidrocarbonetos, fenómenos de eutrofização extrema, dispersão de poluentes e monitorização, tsunamis, etc.)
- Indústrias de transporte marítimo, bem como as restantes companhias associadas, como empresas de seguros, Administração de Portos, etc.
- Turismo e Lazer: empresas, associações e indivíduos relacionados com actividades recreativas em zonas costeiras, como por exemplo tomar actividades balneares, surf, windsurf, vela, canoagem, etc. Este tipo de

utilizadores pretende não só obter previsões de ondulação na zona costeira como também previsões de correntes e ainda qualidade da água.

- Toda a comunidade associada à aquacultura e actividade piscatória. Toda a actividade deste tipo está fortemente ameaçada por blooms de algas tóxicas; para além disso a necessidade de perceber as limitações e possibilidades de expansão quer da pesca quer da aquacultura em determinados locais ou períodos de tempo, leva a que o estudo contínuo de propriedades como temperatura, oxigénio dissolvido, nutrientes, clorofila, turbidez, entre outros, permitam uma análise mais racional e sustentável deste tipo de actividades;
- Empresas de exploração *offshore* de petróleo, gás natural, ou que envolvam a passagem de cabos no mar; todas podem ter particular interesse em conhecer padrões de correntes campos de circulação;
- Companhias energéticas que utilizem água do mar como sistemas de refrigeração: os resultados de modelos operacionais podem ser importantes para estimar o impacte de indústrias desse tipo, nos locais de descarga, e de extracção, bem como para planear actividades de manutenção
- Empresas de Gestão de Águas Residuais: estas empresas podem ter necessidade de possuir programas de monitorização da zona costeira envolvente ao local em que sejam descarregados efluentes de sua responsabilidade. Estes estudos podem envolver parâmetros como sedimentos, clorofila, nutrientes, microbiologia, entre muitos outros.
- Comunidade científica: um sistema operacional fornece de forma continuada e organizada uma vasta informação sobre a área de aplicação, sendo uma óptima base de suporte a investigadores em diferentes áreas de recursos marinhos.

Refira-se ainda que se torna cada vez mais comum a utilização de resultados de modelos operacionais por parte de diversas companhias ou organizações intermédias no sentido de desenvolverem produtos de dados específicos, muitas vezes com um valor acrescentado, mais virados para os utilizadores finais.

2.3 Principais Sistemas Operacionais

2.3.1 Modelos à escala global

A oceanografia operacional é neste momento mais visível ao nível da previsão oceânica de larga escala. Dois importantes exemplos são os sistemas HYCOM e o MERCATOR.

O consórcio HYCOM é um esforço multi-institucional fundado pelo *National Ocean Partnership Program* (NOPP), como parte da *U. S. Global Data Assimilation Experiment* (GODAE), no sentido

de desenvolver e avaliar um modelo com assimilação de dados, de coordenadas híbridas – isopícnicas no oceano aberto e estratificado, sigma nas regiões costeiras pouco profundas, e coordenadas de pressão na camada de mistura e/ou águas sem estratificação –. O seu nome tem origem na abreviatura de *HYbrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM) (Bleck, 2002). Este sistema abrange o Atlântico-Norte, com uma malha de 1/12°.

O sistema MERCATOR é também um sistema de previsão global cuja missão foi estabelecida em 1996 por 6 organizações francesas: Cnes, CNRS/Insu, Ifremer, IRD, Météo France, e Shom. O Mercator é composto actualmente por mais de 30 engenheiros de investigadores suportados pela CERFACS e CLS, e ocasionalmente por companhias externas de informática e engenharia. O sistema Mercator está em modo operacional desde Janeiro de 2002, e disponibiliza análises e previsões em tempo real de condições do oceano no Atlântico-Norte e no mar Mediterrâneo com uma resolução de 1/15° (Zodiatis *et al.*, 2003). Utiliza o sistema de coordenadas Z OPA com “rigid lid”.

Existem ainda outros modelos de larga-escala, como o Foam (Reino Unido), Topaz (Noruega).

2.3.2 Modelos à escala regional e local

Desenvolveram-se também em todo o mundo vários modelos para áreas costeiras que estão numa fase operacional ou pré-operacional. Nos parágrafos seguintes é apresentada a selecção de alguns desses modelos.

GoMOOS – *Gulf Of Maine Observing System*

Este é um dos mais avançados modelos operacionais, acessível através da Internet (www.gomooos.org) e gerido pelo Grupo de Oceanografia Física da Universidade do Maine, a Instituição Oceanográfica Woods Hole e o Laboratório Bigelow para as Ciências do Oceano. O GoMOOS é uma organização não-lucrativa onde estão representados todos os possíveis utilizadores.

Este projecto é constituído por um serviço de fornecimento de dados em tempo real, via Internet ou telefone, resultantes dos dados fornecidos por bóias de superfície (vento, ondulação, temperatura do ar e nevoeiro) e de profundidade (correntes, temperatura, salinidade, cor, turvação, oxigénio dissolvido e outros parâmetros), pertencentes à rede de projectos ou à NOAA (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica, E.U.A). Também é fornecida informação de satélite (temperatura do oceano, cor e ventos de superfície) e radar (mapas de correntes oceânicas), utilizando o sistema CODAR (Radar de Aplicação da Dinâmica das Costas Oceânicas).

Uma segunda parte do projecto consiste na previsão utilizando modelos numéricos. As previsões atmosféricas da Marinha Americana, do NOAA e de outras entidades são fornecidas, baseadas em várias fontes. No contexto do projecto faz-se a previsão da ondulação (altura da ondulação e período), baseada em vários modelos, e da circulação oceânica (Corrente e temperatura, além de outros parâmetros), utilizando o Modelo Oceanográfico de Princeton (POM).

Essa informação, na fase actual do projecto, é orientada para ajudar a actividade comercial dos pescadores. No entanto, o projecto tentará ajudar, no futuro, os interesses dos cientistas (para a compreensão de ecossistemas complexos e para a previsão de mudanças climáticas), dos educadores (para alertar para a complexidade e urgência da ciência dos oceanos), dos grupos de investigação, de salvamento e de emergência (para atenuar os efeitos de desastres / acidentes) e das autoridades de saúde pública (nomeadamente sobre surtos de algas perigosas).

No futuro, espera-se que o GoMOOS seja ligado a outros sistemas regionais e incluído num sistema nacional, no Sistema Integrado Sustentado de Observação Oceânica – ISOOS, onde também aparecerá uma componente relacionada com o alto mar e com o sistema climático (Hankin *et al.*, 2002). Hoje, o GoMOOS é o protótipo activo de um sistema regional. O ISOOS Será constituído por três subsistemas: observação (medidas); rede de comunicações e gestão de dados (integração) e serviços de aplicações, modelação e produtos (previsão). Este sistema deverá ser então ligado ao Sistema de Observação Global do Oceano (GOOS), que, tal como o ISOOS, será composto por dois módulos: um referente ao oceano global, outro à zona costeira.

PORTS – *Physical Oceanographic Real-Time System*

Este é um conjunto de sistemas operacionais em áreas costeiras os E.U.A., acessível através da Internet (www.co-ops.nos.noaa.gov/d-ports.html). Estes sistemas são, como o GoMOOS, primeiramente destinados a ajudar a navegação local. No entanto, têm sido utilizados para responder a situações de derrame de petróleo e ajudar na monitorização da qualidade das águas e dos ecossistemas e as observações da costa (NOAA, 2002).

Os sistemas para a Baía Cheasepeake e para o Porto de Nova Iorque e Nova Jersey incluem a recolha e fornecimento de medidas a partir de estações de medição próprias e o fornecimento de dados actuais e previsões para o nível das águas (Baía Cheasepeake e Porto de Nova Iorque / Nova Jersey) e correntes (Porto de Nova Iorque / Nova Jersey). As previsões são feitas pelo POM, com base em dados obtidos em tempo real das estações próprias mas também em modelos meteorológicos.

Modelo Operacional do Estreito Juan de Fuca

Definido para as águas do sudoeste da British Columbia, no Canadá, e utilizado no Estreito Juan de Fuca, na fronteira com o estado americano de Washington, este modelo efectua previsões de correntes de superfície (Tinis e Thomson, sem data). O modelo numérico utilizado é também o POM, com duas versões de diferentes resoluções que consideram a foz do rio Fraser. Previsões com um avanço de 24 horas estão disponíveis na intranet do Instituto de Ciências Oceânicas (não acessíveis ao público em geral), baseadas em observações de outras entidades. Considera-se a pesquisa sobre os dados da assimilação da corrente de superfície do sistema de radar CODAR, de tal forma que permite a modelação de fenómenos de intrusão salina no estuário devido à acção do vento.

Sistema MERMAID – OPMOD

O sistema composto pelo sistema de medição e monitorização MERMAID e pelo sistema de modelação operacional OPMOD, mede a temperatura da água, a condutividade, a turvação, o pH, o oxigénio dissolvido e outros parâmetros químicos e bioquímicos (tais como os nutrientes e a clorofila) e faz previsões do nível da água da corrente, da salinidade, temperatura e densidade (Pfeiffer *et al.*, sem data).

Este sistema foi desenvolvido pela Hydromod Scientific Consulting, GKSS Research Center Geesthacht GmbH, Federal Maritime Hydrographic Agency of Germany e pela ME MeeresTechnik Elektronik GmbH, da Alemanha. Depois de ter sido testado no Mar do Norte e em estuários alemães, actualmente faz parte da Rede Alemã de Monitorização do Ambiente Marinho (MARNET), operada pela Federal Maritime and Hydrographic Agency.

Modelo Farvands

Este modelo, desenvolvido pela DHI – Water & Environment, na Dinamarca, utiliza o modelo numérico MIKE 3 para prever correntes, o nível da água, a salinidade e a temperatura, fazendo parte do Programa NOVA – 2003 (o Programa Dinamarquês de Monitorização e Avaliação Aquática) entre 1998 e 2003 (Erichsen and Hansen, 2001) para as águas interiores dinamarquesas e também para o Mar Báltico e uma grande parte do Mar do Norte. Este esquema inclui já um módulo de assimilação de dados.

Mediterranean Forecasting System

Desenvolvido a partir do Projecto-piloto do Sistema de Previsão do Mediterrâneo (MFSPP) – 1998-2000, este sistema permite a previsão em tempo quase real da variabilidade do ecossistema nas zonas costeiras mediterrânicas (Zavatarelli and Pinardi, 2003). A resolução deste modelo é de cerca de 12.5 km.

Todas as semanas são lançadas previsões para o prazo de dez dias na Internet. A rede deste sistema consiste em: centros de fornecimento de dados no local e dados de satélite para a inicialização do modelo de previsões; um centro de dados meteorológicos para a recolha e transmissão de campos atmosféricos; um centro de modelação e assimilação de dados que produz a previsão.

Os dados utilizados para assimilação na inicialização das previsões incluem:

- Anomalias no nível do mar (SLA) e temperaturas da superfície do mar (SST) fornecidas por satélite;
- Perfis de temperatura adquiridos em rotas de navios de observação voluntária com uma frequência bissemanal.

A condição inicial é ainda forçada com os campos superficiais de previsão atmosférica.

O sistema de previsão é composto por cinco módulos:

1. Um motor de assimilação;
2. Um modelo de previsão: *Ocean General Circulation Model* (OGCM);
3. Um acoplador dos parâmetros de forçamento e do modelo de previsão;
4. Um interface de controlo de qualidade entre os dados observados e o motor de assimilação, para alimentar as observações no formato apropriado ao modelo e para conferir as observações antes de as inserir no motor de assimilação;
5. Um interface de pós-processamento que traduz a previsão-modelo em produtos com imagem para publicação na web e disseminação da informação.

Os dados da temperatura superficial (SST) obtida por satélite não são assimilados no esquema mas são utilizados, na fase de análise, para corrigir os fluxos de calor de superfície através de um termo de correcção de fluxo.

Diversos modelos de maior resolução estão encaixados com o sistema MFS, que dão previsões em tempo real, com condições de fronteira encaixadas. Alguns desses modelos são localizados no Mar Adriático (<http://www.ingv.it/adricosm/>), na zona costeira de Chipre (<http://www.ucy.ac.cy/cyocean/New/index.php>), na Costa Levantina, no Mar Egeu, e ainda na zona noroeste da costa mediterrânica, no Golfo de Lion e na costa de Malta.

Outros Modelos

Para além de todos os sistemas já referidos, existem ainda muitos outros sistemas operacionais em zonas costeiras na Europa, de acordo com Flather (2000):

- O sistema baseado no 3D ECOM (Estuarine, Coastal and Ocean Model, uma versão do POM), operado no *Norwegian Meteorological Institute* (DNMI), e fornecendo previsões de correntes e tempestades com uma malha de 20 km para o Mar da Noruega, e o Mar de Barents.
- Modelo 2D encaixado, gerido pelo *Danish Meteorological Institute* (DMI), disponibilizando informação dos níveis, com resoluções de 18, 6 e 2 km, para alertas de inundações numa área ao longo da Dinamarca, compreendendo o Mar do Norte, Mar Báltico, Skagerrak e Danish Belts.
- O modelo operacional 3D para o estuário de Elbe, gerido pela *Hydromod*, com uma malha horizontal de 250 m, e uma resolução vertical de 2 m;
- Modelo 2D para a Holanda – *Dutch Continental Shelf Model* (DCSM) gerido pela KNMI, e que fornece previsões de maré e tempestades para a plataforma do Noroeste da Europa, com resoluções de $1/4^{\circ}$ para longitude e $1/6^{\circ}$ na latitude (cerca de 16 km);
- Modelo Belga 2D MUMM (*Management Unit of the North Sea Mathematical Model*), que cobre toda a plataforma continental do Noroeste da Europa, com uma resolução de 2,5' na latitude e 5' na longitude;
- Modelo de previsão de maré e tempestades, efectuado pelo MetOffice (*Meteorological Office*), no Reino Unido. O modelo utilizado é o CS3, e a área de aplicação é a plataforma continental do Noroeste da Europa, com uma resolução de $1/6^{\circ}$ na longitude e $1/9^{\circ}$ na latitude (cerca de 12 km);
- Modelo 2D espanhol Nivmar, que é um sistema de previsão dos níveis de maré desenvolvido e gerido pelo *Clima Marítimo / Puertos del Estado*. As previsões são efectuadas para toda a costa Espanhola, com uma resolução de $1/4^{\circ}$ de longitude e $1/6^{\circ}$ de latitude.

2.4 Arquitectura do Sistema

De modo a gerir eficientemente as exigências de escala, forçamento e de processos envolvidos em sistemas operacionais, tem sido referida a necessidade de uma racionalização em sistemas de modelação em termos de organização das diferentes tarefas em estruturas modulares, e

ainda na normalização da entrada de dados, por exemplo, batimetria e condições de fronteira da maré. Este primeiro ponto é bastante relevante, uma vez que permite que o sistema seja mais flexível, e facilmente escalável (Prandle, 2000b).

É também bastante importante que o sistema de previsão seja suficientemente flexível para ser facilmente operável em diferentes máquinas e sistemas operativos, especialmente para se poder tirar partido da computação paralela (James, 2002). Este tipo de procedimento computacional, e que é utilizado pelo sistema DNMI (Flather, 2000), demonstra ser extremamente útil quando se lida com modelos extremamente exigentes do ponto de vista computacional, como é o exemplo da ligação de um modelo biológico complexo a um modelo físico com uma resolução espacial e temporal típicas de um modelo 3D (James, 2002).

Um sistema deste tipo é o caso do acoplamento do ERSEM e do modelo físico POL3DB referido por Allen *et al.* (2002), e que envolve a utilização de protocolos de comunicação entre processadores do tipo *Message Passing Interface* (MPI). A computação paralela é um grande avanço na modelação operacional, uma vez que ser operacional pode implicar qualquer coisa como um custo computacional cerca de 100 vezes superior ao tempo computacional de uma simulação em tempo não-real (Prandle, 2000b).

2.5 Rede de Monitorização

O ponto de partida de um sistema de modelação operacional é o acesso às medidas de campo em tempo real, e, se possível a dados históricos. Este tipo de informação devidamente organizada e estruturada, para além de possibilitar ao utilizador testar hipóteses e retirar conclusões a partir dos dados existentes, permite validar de uma forma sistemática os resultados dos modelos numéricos. Desta forma os modelos são validados duma forma contínua para uma grande variedade de cenários aumentando assim o seu grau de fiabilidade.

O tipo de rede de monitorização que pode ser utilizada em oceanografia operacional depende da cobertura espacial e temporal. Assim, de acordo com Prandle (2000b) uma rede fixa (*in-situ*) é a melhor escolha para sistemas costeiros, enquanto que a detecção remota – em que a frequência temporal é muito menor – é uma fonte geralmente mais utilizada em sistemas operacionais de maiores escalas.

Contudo, a utilização de imagens de satélite em zonas costeiras é uma área em expansão. Tipicamente os algoritmos utilizados são indicados para o oceano em que a “cor” da água depende quase exclusivamente da clorofila existente. Em zonas costeiras a presença de sedimentos em suspensão e matéria orgânica inviabilizam a utilização destes algoritmos sendo por isso necessário o desenvolvimento de novas soluções. Recentemente, o aparecimento de novos sensores como o MODIS-Aqua (NASA) e MERIS (ESA) e mesmo de novos algoritmos

aplicados a sensores mais antigos como o Seawifs (NASA), permitiu avanços significativos nestas áreas.

Têm também sido registados diversos avanços tecnológicos em diversos sensores, e sistemas de medição *in-situ*, transformando procedimentos como a aquisição, manutenção e calibração em processos muito menos dispendiosos e com maior fiabilidade e precisão. Como consequência, a utilização de sistemas de medição *in-situ* verificou um enorme aumento no que respeita à sua aplicação em programas de controlo e monitorização de qualidade da água. Quando integrados em sistemas e processamento e aquisição de dados em tempo real, este tipo de medições permitem uma monitorização permanente do meio aquático, incluindo a detecção imediata de fontes de poluição pontuais e difusas, ou fenómenos esporádicos e atípicos causados por origens naturais e antropogénicas.

Outra importante evolução numa vasta maioria de sensores utilizados em medições *in-situ* é a fácil integração com outros equipamentos. Assim sendo, quando não possuem capacidade de medição programável ou memória interna permitem uma ligação analógica ou digital, que por intermédio de um sistema de conversão do sinal ou protocolo de comunicação específico permitem o armazenamento e tratamento da informação. Desta forma é possível integrar num único sistema, sensores de diversas marcas otimizando o sistema em função do pretendido. Em sistemas onde se manifesta necessário integrar mais do que um sensor recorre-se normalmente a um *datallogger* onde os sensores de medição estarão ligados, sendo a conversão dos sinais, rotinas de medição e armazenamento de resultados gerida por este.

Um protocolo que tem sido cada vez mais utilizado desde a sua criação por fabricantes de sensores de monitorização de água na década de 80 é o Serial Digital Interface Protocol (SDI-12) que permite a ligação até dez sensores num único cabo eliminando problemas associados a sensores analógicos de baixo consumo como o reduzido cumprimento de cabo permitido, um cabo de ligação por sensor analógico ou a necessidade de programação do *datallogger* para calibração do sensor analógico.

No que respeita ao processamento e disponibilização de dados medidos em tempo real, são utilizados variados métodos, entre os quais: GSM, telemetria, satélite, cabos físicos ou Ethernet/Internet.

Os parâmetros frequentemente analisados em sistemas de medição *in-situ* para ambientes aquáticos são: direcção e velocidades do escoamento, oxigénio dissolvido, temperatura, salinidade, clorofila e nutrientes. Pelas razões anteriormente referidas pode-se constatar então que devido à elevada eficácia e baixo custo, quando comparados com sistemas de medição tradicionais, os sistemas de aquisição de dados em tempo real revelam-se muitas vezes como a

melhor ferramenta, ou pelo menos como um instrumento complementar imprescindível na monitorização e protecção do meio hídrico.

Em sistemas operacionais costeiros, a informação de campo é geralmente disponibilizada através de medidas *in-situ*, frequentemente níveis de maré, medidos por marégrafos. Alguns desses exemplos são encontrados por exemplo no sistema de modelação do DMI para estações na Dinamarca, Grã-Bretanha e Suécia; ou mesmo pelo sistema DCSM e no sistema de previsão de marés operado pelo Meteorological Office (Flather, 2000). Nestes dois últimos casos, a informação dos marégrafos é também utilizada para assimilação de dados. Os resultados do modelo operacional para o estuário de Elbe são validados com dados meteorológicos e hidrográficos medidos no campo por estações ao longo do rio (Flather, 2000).

No que respeita ao fluxo proveniente dos rios, é prática comum considerar um fluxo médio em vários períodos (James, 2002). Esse é o caso do sistema ADRICOSM, em que é considerada como condição de fronteira uma climatologia mensal do runoff do rio (Zavatarelli and Pinardi, 2003). Esta metodologia pode revelar-se inadequada em sistemas cujo caudal do rio apresente variações muito bruscas.

Uma recente tecnologia que se apresenta como muito interessante para a oceanografia operacional é a utilização de radares em zonas costeiras, para medir ventos, ondas, correntes superficiais, batimetria e derrames de petróleo. Espera-se que este tipo de equipamentos permita uma melhor compreensão dos processos de propagação de ondas em águas pouco profundas (Prandle, 2000b).

2.6 Modelação Física

O sistema físico é a base para os sistemas químico e biológico (James, 2002), sendo que a modelação física é a pedra de canto de qualquer sistema operacional de qualidade de água.

Alguns dos aspectos mais importantes em modelação física de águas costeiras pouco profundas são (James, 2002):

- Parameterização da turbulência, uma vez que o escoamento é frequentemente turbulento e o actual estado de compreensão da turbulência e do modo de parameterizar no modelo os processos de difusão é visto como uma importante condicionante dos modelos físicos;
- Informação das ondas, de modo a permitir uma melhor descrição da tensão de corte no fundo, disponibilizada por um modelo de ondas, ou uma aproximação simplificada da actividade das ondas;

2 - Estado da arte em modelação operacional

- Contabilização da instabilidade baroclínica, que constitui um importante mecanismo para o transporte de material dos rios para o mar, através das correntes costeiras;
- Escoamento de larga escala, dominado pela maré e vento, que tem de ser devidamente considerado nos diversos modelos.

Actualmente os modelos físicos são reconhecidamente aceitáveis nos resultados para a elevação do mar, correntes, temperatura e salinidade para uma resolução de cerca de 10 km, uma vez que a esta escala as condições de fronteira são de boa qualidade (James, 2002). De facto, as resoluções espaciais e temporais das previsões podem, especialmente quando considerando previsões numéricas de pequena escala temporal, ser limitados pela resolução correspondente das condições iniciais e de fronteira (Prandle, 2000a).

Em sistemas de previsão um requisito crucial é a existência de um bom esquema numérico para a condição de fronteira aberta, e a disponibilidade de dados na fronteira aberta a partir de outros modelos (James, 2002). Em síntese, estes aspectos demonstram a importância de dois temas essenciais na modelação operacional em áreas costeiras: forçamento atmosférico e modelos "encaixados".

De modo a melhorar as previsões, em vez de basear todo o sistema na especificação de condições de fronteira, que precisa de ser muito precisa de modo a permitir boas previsões, um modelo pode ser encaixado noutro de maior escala, que lhe fornecerá a informação necessária com maior detalhe. A metodologia de modelos encaixados pode ser usada para obter maior detalhe onde tal é necessário (James, 2002). São vários os exemplos de modelos que usam metodologia de modelos encaixados: o sistema de modelação para o Mar Adriático (Zavatarelli and Pinardi, 2003) e modelos de previsão de níveis, operados pelo *Danish Meteorological Institute* (DMI) no Mar do Norte, Skagerrak, Danish Belts e o Báltico, com resoluções de 18km, 6km e 2 km (Flather, 2000).

A forma mais avançada de modelos encaixados é o "two-way" (bidireccionalidade): com esta metodologia, há um "feedback" da malha mais fina para a malha maior (James, 2002). A relevância prática de encaixar modelos é materializada em projectos como o GODAE, que tem como objectivo a integração de modelos em sistemas mais vastos (James, 2002). Para uma área mais detalhada, uma alternativa a efectuar modelos encaixados é a utilização de malhas de passo espacial variável dentro do mesmo modelo (James, 2002).

Em zonas costeiras e estuarinas, uma vez que se tratam de sistemas com hidrodinâmica de águas pouco profundas, a influência do vento e condições meteorológicas em geral são reconhecidas como muito importantes nos mecanismos de circulação (Prandle, 2000a; James, 2002), pelo que é crítica a inclusão de boas condições de fronteira aos modelos físicos (James, 2002). Assim, é comum encontrar sistemas em que os modelos físicos são forçados com modelos atmosféricos. Um dos desenvolvimentos fundamentais para melhorar o forçamento

atmosférico consiste no desenvolvimento de modelos oceano-atmosfera acoplados (Prandle, 2000b).

Geralmente o acoplamento é assumido só numa via, isto é, apenas a atmosfera influencia o mar, e não vice-versa; porém um acoplamento bidireccional pode ser bastante vantajoso (Prandle, 2000b; James, 2002).

Entre os vários modelos que consideram forçamento atmosférico a partir de modelos encontram-se (Flather, 2000): o sistema espanhol de previsão de mares Nivmar, que utiliza o forçamento do modelo HIRLAM operado pelo *Instituto Nacional de Meteorologia* (vento e pressão à superfície); o modelo 2D holandês DCSM (Dutch Continental Shelf Model), que corre com o auxílio do KNMI HIRLAM (vento e pressão de superfície); o modelo encaixado operado pelo DMI que utiliza o forçamento do LAM (*Limited Area Model*), operado pelo *Meteorological Office* britânico; o sistema de previsão de correntes e marés do grupo norueguês DNMI, que utiliza as previsões operacionais do modelo HIRLAM (vento e pressão à superfície); o sistema de previsões de marés e tempestades do Reino Unido, que utiliza o LAM do *Meteorological Office* (vento e pressão).

Outra condição de fronteira importante em áreas costeiras é as descargas dos rios, que mantêm o balanço de salinidade e origina as circulações induzidas pela densidade nas zonas costeiras e, na modelação de qualidade da água, fornecem a entrada de poluentes e nutrientes no sistema (James, 2002).

É comum encontrar batimetrias sem a resolução adequada, e assim limitando a exactidão do escoamento do modelo em regiões costeiras: se por um lado a resolução deve ser elevada, por outro lado a batimetria real pode sofrer rápidas alterações e assim gerar a necessidade de levantamentos frequentes (James, 2002).

Foram conseguidos diversos avanços na última década, no que respeita à modelação costeira e hidrodinâmica em oceanos:

- Melhoria e diversificação das condições de fronteira aberta (Palma and Matano, 2000; Marchesiello *et al.*, 2001);
- Generalização da discretização vertical (Adcroft e Marshall, 1997; Martins *et al.*, 2001, Pietrzak *et al.*, 2002; Mellor *et al.*, 2002);
- Esquemas de advecção de ordem superior (Pietrzak, 1997; Shchepetkin e McWilliams, 1998; Webb *et al.*, 1998);
- Discretização da pressão baroclínica (Kliem and Pietrzak, 1999; Shchepetkin and McWilliams, 2003);
- Modelos encaixados com bidireccionalidade (Oey e Chen, 1992; Perkins *et al.*, 1997, Ginis *et al.*, 1998);

- Pressão não-hidrostática (Marshall *et al.*, 1997);
- Novas parameterizações da turbulência vertical (Canuto *et al.*, 2001; Burchard e Karsten Boulding, 2001);
- Mistura vertical induzida pelas ondas (Burchard, 2001; Kantha and Clayson, 2004).

Porém, diversos modelos numéricos operacionais ainda não beneficiam da aplicação de alguns destes desenvolvimentos enumerados acima (Bleck, 2002).

2.7 Modelação Ecológica / Qualidade da Água

A oceanografia operacional em áreas costeiras está a estender a sua área de aplicação de parâmetros essencialmente físicos, como as marés, ondas, temperatura e salinidade, para parâmetros químicos relacionados com a qualidade da água, através de parâmetros biológicos / ecológicos que indicam a variabilidade dos ecossistemas (Prandle, 2000a).

Na modelação ecológica e de qualidade da água, alguns dos principais aspectos a ter em conta, são a importância das interações com as partículas, incluindo sedimentos, nomeadamente o seu papel no transporte de poluentes, e a diversidade do ecossistema, no qual o fitoplâncton e o zooplâncton são componentes importantes. Este último aspecto é usualmente representado na modelação como diferentes grupos biológicos, cada um dos quais com variáveis e processos fisiológicos específicos.

A dinâmica de população é descrita em termos de fluxos de carbono e nutrientes entre grupos, e entre os grupos e o meio. Esta abordagem resulta bem em organismos nos níveis tróficos inferiores, contudo, nos níveis tróficos mais elevados, são preferíveis outras abordagens, por exemplo modelos de população, ou modelos de indivíduos (James, 2002).

No que respeita à modelação da qualidade da água, a existência de dados é particularmente relevante: a (pouca) informação disponível tem vindo a limitar a desejável consistência na validação e testes de modelos, que devem incluir estimativas de barras de erro e análises de sensibilidade à informação de entrada dos modelos. A limitação de dados existentes continua a ser considerado o mais importante factor limitativo do progresso de modelos operacionais de qualidade de água (James, 2002). De acordo com Prandle (2000b), um dos maiores desafios consiste em associar informação de diferentes fontes de modo a minimizar as suas deficiências.

A modelação de qualidade da água representa uma carga computacional muito mais elevada que a modelação física, devido ao facto de ser necessário considerar um número mais elevado de variáveis e processos. Um exemplo de um complexo modelo de ecossistemas apontado por James (2002) é o ERSEM – *European Regional Seas Ecosystem*.

Em suma, a existência de modelos ecológicos complexos acoplados a modelos físicos com a mesma resolução, para zonas costeiras, é um fenómeno recente: apenas nos últimos tempos o poder computacional exigido, e sistemas de paralelização tornaram-se disponíveis a um preço aceitável (James, 2002).

Similarmente, o conceito de modelos operacionais de qualidade da água, com disponibilização de previsões em tempo real para zonas costeiras está agora a dar os primeiros passos, e é previsto um forte desenvolvimento nesta área nos próximos tempos. Um das aplicações importantes de um sistema deste tipo seria a previsão de blooms de plâncton que podem resultar em blooms de algas tóxicas ou marés vermelhas.

2.8 Assimilação de Dados

A assimilação de dados encontra-se pouco disseminada em sistemas de previsão costeiros. A principal razão para isto suceder prende-se com a problemática da informação disponível: se é verdade que no oceano há menos observações que na atmosfera – em que a assimilação joga um papel fundamental nas previsões meteorológicas –, nas áreas costeiras a informação obtida é ainda menor (James, 2002). Principalmente de forma relativa, uma vez que a variabilidade espacial e temporal das condições de um meio costeiro é muito maior que as mesmas no oceano. Logo, a aquisição de dados é muito mais problemática.

2.9 Interface para os utilizadores finais

Esta é no fundo a parte essencial de um sistema operacional, e deve preferencialmente consistir numa interface, que envolva melhorias adicionais e especificidades para ir de encontro às necessidades dos diferentes utilizadores (Prandle, 2000a).

A informação deve não só incluir os melhores valores previstos, mas também barras de erro associadas, que possam ser incorporadas em procedimentos de análises de risco socio-económico (Prandle, 2000a). Esta informação deve ser disponibilizada de uma forma facilmente perceptível e analisada, porquanto a utilização de técnicas de visualização avançadas, e padrões de formatos para os dados devem ser sempre tidas em conta (James, 2002). Em modelos ecológicos complexos essa questão é especialmente importante, devido à habitual dificuldade de análise dos resultados.

A Internet é o meio mais utilizado para a disponibilização de resultados nos sistemas DMI e MUMM, por exemplo (Flather, 2000).

De um modo mais concreto, de acordo com Brian MacNamara (Le Provost e Flemming, 1998) é possível caracterizar melhor a forma de disseminar os resultados de sistemas operacionais.

2 - Estado da arte em modelação operacional

Assim, com a proliferação de sistemas GIS (*Geographic Information System*), conjuntamente com o avanço no poder de cálculo, o PC é hoje em dia uma plataforma viável para a base de sistemas de apoio à decisão, bem como do desenvolvimento de produtos de dados. Também não são raras as vezes em que os resultados dos modelos são utilizados para serem acoplados a outros modelos.

Assim sendo, os formatos mais úteis a informação de saída de sistemas operacionais e modelos são os seguintes (Le Provost e Flemming, 1998):

- Informação na estrutura de malha ("grid data", ou dados "raster". Muito útil para a utilização em outros modelos)
- Informação vectorial (muito útil para a utilização em GIS)
- Temas de pontos
- Temas de linhas
- Temas por regiões
- Informação a partir de contornos

Usualmente, a tipologia dos dados utilizados é a seguinte:

- Parâmetros típicos (temperatura, batimetria, salinidade, padrões de correntes, etc.)
- Meta-dados ("qualidade dos dados", confiança)
- Resolução espacial
- Resolução temporal

3. ÁREA DE ESTUDO – ESTUÁRIO DO TEJO

3.1 Caracterização do estuário

O estuário do Tejo constitui a zona de transição onde o Rio Tejo encontra o Oceano Atlântico. Trata-se de um dos maiores estuários da Europa e a zona húmida mais extensa do território nacional. Compreende uma área de aproximadamente 320 km² e a sua largura varia entre os 2 e os 15 km. Apresenta ainda uma profundidade média de 10,6 m. Tem um comprimento de aproximadamente 80 km desde o seu limite superior (perto de Muge) até à sua embocadura (perto de S. Julião da Barra-Bugio). Assim, a cunha salina faz-se sentir até à zona de Vila Franca de Xira (a 50 km da foz) e as marés deixam de se fazer sentir a partir da zona de Muge (a 80 km da foz).



Figura 3-1 – Estuário do Tejo (ortofoto)

O efeito de maré é de extrema importância no Estuário do Tejo uma vez que o volume médio da maré tem grande significado em relação ao volume de água que se encontra abaixo do nível mínimo de maré. A amplitude média de maré é cerca de 2,6 m e o seu valor mais baixo aproxima-se de 1 m. Quando as marés atingem a sua amplitude máxima, durante a baixa-mar, cerca de 40% da superfície do estuário fica emersa - a área submersa varia entre 30000 ha em marés de águas mortas e 34000 ha em marés de águas vivas. As marés apresentam um regime semi-diurno sendo dominado pela vazante. As zonas intertidais rondam os 116 km² e são constituídas por zonas sem vegetação, antigas ostras, bancos de areia e extensos sapais.

Com base nas suas características morfológicas, o Estuário do Tejo pode ser dividido em três zonas:

3 - Área de estudo – Estuário do Tejo

- O troço superior, uma zona pouco profunda que consiste num delta interior, com extensas áreas de espraiado de maré e de sapal. Esta região engloba na sua quase totalidade, a Reserva Natural do Estuário do Tejo, sendo a riqueza biológica desta área enorme. É a zona de nursery mais importante do estuário e alberga anualmente cerca de 100.000 aves invernantes.

- O troço central é o mais largo do Estuário. Tem uma profundidade média de 7m e é onde vêm desaguar rios e ribeiras e onde se localizam os grandes empreendimentos industriais que circundam o estuário.

- O troço terminal contrasta por ser um canal profundo e estreito. Nas suas margens localizam-se as cidades de Lisboa e Almada. A zona terminal forma uma boca que começa a dar lugar às águas marinhas.

Como outros estuários, o estuário do Tejo é uma zona de elevada produtividade biológica e caracteriza-se pelas flutuações extremas de factores abióticos, nomeadamente da salinidade, temperatura, correntes e turbidez. Estes factores, aliados à alternância de períodos de imersão e emersão e à grande mobilidade dos sedimentos, produzem um ambiente físico e químico difícil para fauna e flora que em conjunto com a heterogeneidade dos habitats condiciona a diversidade dos organismos vivos.

3.2 Rio Tejo

A principal fonte de água doce é o rio Tejo, com contribuições mais pequenas de outros rios como o Trancão ou o Sorraia (ver Figura 3-2). O Rio Tejo tem a sua nascente na Serra de Albarracin – Espanha. Atravessa território Espanhol e Português, desaguardo no Oceano Atlântico em Lisboa. É um dos maiores rios da Península Ibérica, tendo um comprimento de cerca de 1060 km.

Os seus principais afluentes são o Jarama, Alberche, Alagon, Guadéla, Almonte e Salor em Espanha e Erges, Ponsul, Zêzere e Sorraia em Portugal.

A bacia hidrográfica tem uma área aproximada de 80 500 km², estando cerca de dois terços (69%) em Espanha e um terço (31%) em Portugal.

Em regime natural o seu caudal ronda os 600 m³/s, tendo uma elevada variação mensal com grandes picos em situação de cheia. Os padrões de descarga do rio dependem da estação do ano, de variações inter-anuais e da regularização com Espanha, variando a descarga média entre os 100 e os 2200 m³.s⁻¹. O tempo de residência da água doce no estuário é variável sendo de 65 dias para uma descarga de 100 m³.s⁻¹ e de 6 dias para uma descarga de 2200 m³.s⁻¹.

3.3 Embocadura do estuário

A zona da Guia é, claramente, uma zona influenciada por uma descarga de água doce (rio Tejo). Na literatura científica de expressão inglesa estas zonas são denominadas por ROFI (Region Of Freshwater Influence). Estas áreas costeiras são as principais vias de transferência de matéria dos continentes para os oceanos, sendo neste caso a qualidade do meio receptor muito influenciado pela qualidade da fonte de água doce.

É também na zona da Guia que se situa a emissão do efluente proveniente da Estação de Tratamento de Águas Residuais da responsabilidade da SANEST – Saneamento da Costa do Estoril, S. A. (emissário da Guia – Figura 3-2).

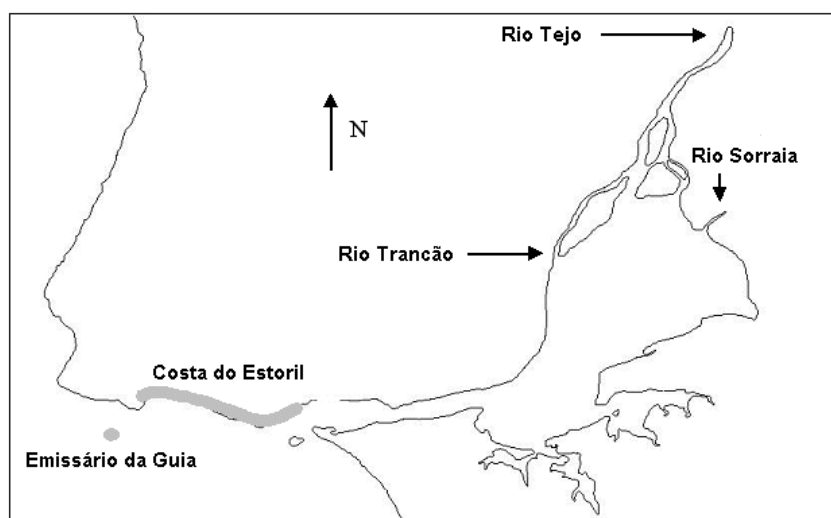


Figura 3-2 - Estuário do Tejo: Costa do Estoril e Emissário da Guia

3.3.1 Padrão de Correntes

De acordo com Leitão (2002), esta é uma zona caracterizada por uma forte mistura forçada por um intenso hidrodinamismo. Nesta área os principais agentes forçadores são o vento e a maré (ver Figura 3-3). O vento tem um efeito de larga escala que produz correntes ao longo da costa e um efeito local que produz mistura vertical. A estratificação condiciona a capacidade de mistura vertical forçada pelo vento.

3 - Área de estudo – Estuário do Tejo

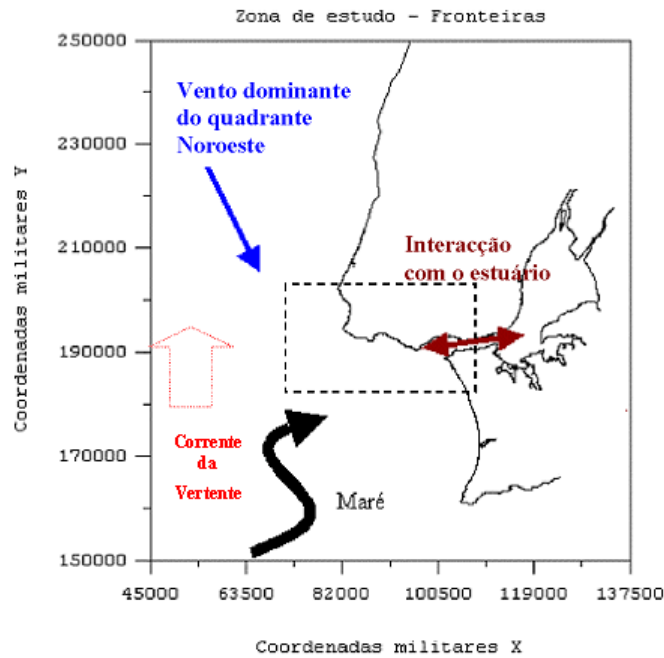


Figura 3-3 – Principais processos que influenciam as correntes na embocadura do estuário do Tejo (Leitão, 2002)

Num cenário típico de Inverno, havendo fortes afluições de água doce, estabelece-se na zona da embocadura do estuário uma forte corrente residual em toda a coluna de água com direcção NW. Normalmente a fortes afluições de água doce está associado vento de Sul. Desta forma tanto o efeito da maré como o do vento dão origem a uma corrente na zona da embocadura com direcção NW.

Num cenário típico de Verão, o vento tem uma direcção mais estável, ao contrário do que sucede no Inverno. Durante o Verão o vento sopra usualmente forte do quadrante N/NW numa forma persistente. Este vento induz, durante os períodos de Verão afloramento costeiro. Desta forma, o gradiente de densidades na embocadura é condicionado não só pelas trocas com o interior do estuário como pelo afloramento de água fria junto à costa.

Quer no Inverno, quer no Verão, forma-se uma corrente residual da ordem de 10 cm/s com direcção NW. Esta corrente tende a transportar mais depressa para o largo a água doce com origem no interior do estuário. A maré é responsável por uma corrente residual barotrópica na embocadura do estuário com direcção NW mas com uma intensidade de da ordem dos 2 cm/s. A corrente da vertente tende a reforçar esta corrente e o vento, dependendo da sua variabilidade, pode ou não reforçar. O efeito da topografia situada a Norte da costa do Estoril (ex: Serra de Sintra) tende a condicionar o campo de ventos quando este sopra do quadrante N ou NW. O efeito de amortecimento que esta topografia tem sobre o vento condiciona muito a circulação residual na embocadura.

4. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

4.1 Metodologia / Arquitectura do Sistema

A ideia de sistema de modelação operacional não passa só por um modelo numérico que faz previsões todos os dias. Um sistema operacional pode ser visto como uma infra-estrutura que pode incluir um ou mais modelos numéricos, uma rede de monitorização automática, dados obtidos em campanhas de monitorização e detecção remota, bases de dados para armazenamento de medições e previsões, mecanismos de validação da informação e ferramentas que disponibilizem os resultados num formato útil aos clientes finais (ver Figura 4-1).

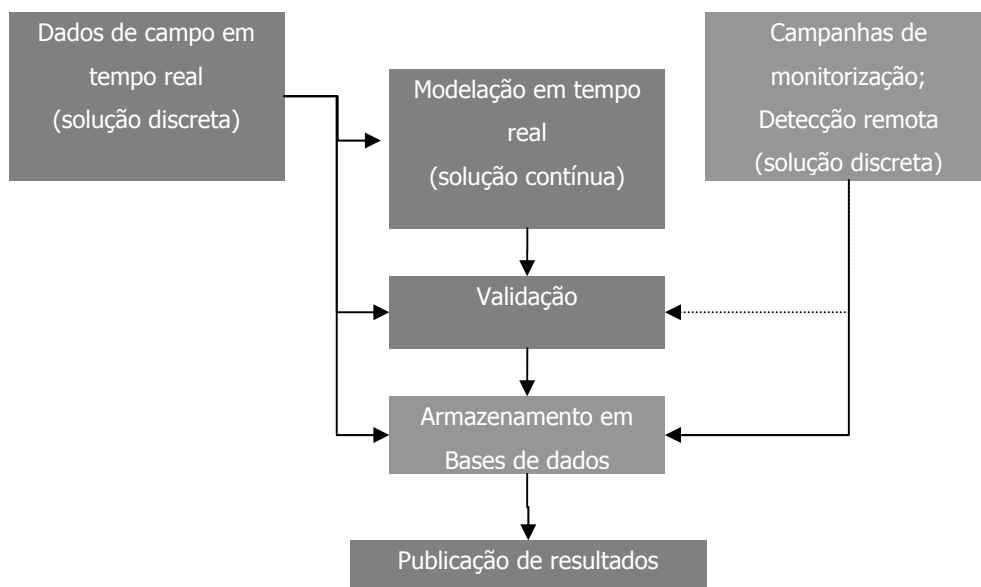


Figura 4-1 - Esquema ilustrativo das componentes de um modelo operacional

É a integração de todas estas componentes que permite desenvolver no seu conjunto um sistema de modelação operacional. Assim, foi necessário desenvolver uma série de ferramentas de tratamento e transferência de informação, de forma a tornar todo o processo desde a chegada de dados até à disponibilização de informação ao utilizador final, um processo relativamente automatizado, em que a intervenção humana se focaliza essencialmente na análise e validação dos dados de campo e resultados da modelação numérica. As linguagens de programação das ferramentas desenvolvidas baseiam-se essencialmente nas plataformas VisualStudio.NET (ASP.NET, VB.NET) e VisualStudio 6.0 (VB e ASP), com recurso a outras linguagens auxiliares – HTML e JavaScript (para a páginas de internet), SQL (comunicação com bases de dados). As bases de dados utilizadas estão todas em Access, estando previsto num futuro próximo a migração de algumas delas (as mais pesadas) para estruturas de bases de

dados relacionais mais bem estruturadas, e eventualmente com motores de busca espaciais, como é o caso de MySQL e PostgreSQL.

Ao longo dos próximos capítulos, no decorrer do texto serão referidos os equipamentos e modelos utilizados na aquisição de dados e modelação (bem como as condições em que os mesmos foram aplicados), mas também as ferramentas desenvolvidas para a integração, tratamento e transferência da informação gerida e gerada por essas duas vertentes do sistema de monitorização – os dados de campo e a modelação / previsão.

4.2 Dados de Campo

De seguida, serão descritos os dados e as medições incluídos no sistema operacional. Neste momento, as principais fontes de dados são os sistemas de aquisição em tempo real e a aquisição de dados através de campanhas dedicadas. No entanto, a utilização de sensores para medição em movimento, bem como a detecção remota, encontram-se em fase de operacionalização.

4.2.1 Sistemas de Aquisição Fixos

Está instalada uma estação meteorológica, tendo estado instalada em determinada fase uma estação fixa para monitorização da qualidade de água. Qualquer um dos sistemas caracteriza-se pela integração de vários sensores num *datalogger*, aquisição de dados por intermédio de GSM, filtragem e tratamento dos dados, disponibilização diária dos mesmos na Internet, e integração em modelos operacionais.

Existe também uma estação hidrométrica automática cuja gestão é efectuada externamente pelo INAG, e cujos valores de nível medidos são disponibilizados na Internet (<http://snirh.inag.pt>). Essa estação está localizada em Ómnias (Rio Tejo).

4.2.1.1 Estação Meteorológica da Guia

A estação meteorológica está instalada no topo do edifício da ETAR da Guia (ver Figura 4-3), e é propriedade da SANEST SA no concelho de Cascais e com as coordenadas 38° 41' 41" de Latitude e 9° 26' 48" de Longitude (Figura 4-2).

4 - Implementação do Sistema



Figura 4-2: Localização da estação meteorológica da Guia

Os sensores instalados na estação meteorológica são: sensor de temperatura e humidade relativa 50Y da *Campbell Scientific* (CS); barómetro *Druck* RPT410F para a pressão atmosférica. piranómetro *Kipp & Zonen* CM3 para a radiação solar. Udómetro ARG100 para a precipitação. Anemómetro A100R e Catavento W200P da *Vector Instruments* para medição da componente horizontal da velocidade e direcção do vento respectivamente (Figura 4-3).

Todos os sensores estão ligados directamente a um *datalogger* CS CR10X que por intermédio de um módulo GSM Siemens TC35T vai permitir a aquisição de dados em tempo real e qualquer eventual alteração ao programa de medição nas instalações da MARETEC no Instituto Superior Técnico. A estação meteorológica é alimentada por um sistema de dois painéis solares e uma bateria que garantem a autonomia da estação meteorológica, no caso da tensão da bateria descer abaixo de um determinado valor os responsáveis pela estação meteorológica recebem uma SMS nos seus telemóveis a alertar para a situação.



Figura 4-3 - Estação Meteorológica da Guia

4.2.1.2 Estação de Monitorização de Correntes e Qualidade da Água em Paço de Arcos

Um sistema automático de medição de parâmetros de qualidade da água é uma excelente forma de obter dados em contínuo e em tempo real de um dado sistema aquático. No âmbito do projecto REALTIME foi implementado um sistema deste tipo. De seguida segue-se uma breve descrição do sistema instalado.

O sistema de monitorização da qualidade de água esteve instalado numa bóia de balizagem ao tráfego à navegação pertencente à Direcção de Faróis à saída do estuário do Tejo, com as coordenadas 38° 40' 29" de Latitude e 9° 17' 36" de Longitude (Figura 4-4).



Figura 4-4: localização da bóia no estuário do Tejo

Neste sistema esteve instalado uma sonda multiparamétrica *H20* da *Hydrolab* com sensores de temperatura, oxigénio dissolvido, condutividade/salinidade, turbidez e profundidade. A clorofila-a era medida por intermédio de um fluorímetro *MiniTracka II* da *Chelsea*, e a componente horizontal da velocidade do escoamento e a direcção do mesmo com recurso a um sensor de corrente 3900R da *Aanderaa*.



Figura 4-5 - Suporte com Equipamento do Sistema de Monitorização da Qualidade de Água

4 - Implementação do Sistema

Todos os instrumentos foram ligados a um *datalogger* CS CR10X por intermédio de um módulo CS SDM-SIO4 via RS-232, de forma semelhante foi ligado um GPS Motorola Oncore II que no caso de a bóia sair do interior de uma célula pré-definida, de forma semelhante à estação meteorológica, enviava uma SMS de alerta aos responsáveis do sistema. Este alerta, que visava a localização e recuperação do equipamento no caso da bóia se encontrar à deriva, estava condicionado contudo à área de abrangência de rede de GSM do operador escolhido, pois uma vez fora desta não é possível comunicar com o sistema, logo acompanhar o trajecto da bóia. O elevado investimento que seria necessário efectuar para eliminar esta restrição, que seria a transmissão de dados por satélite, não se justificou neste caso.

O *datalogger* enviava igualmente com recurso a um módulo GSM *Siemens* TC35T mensagens escritas aos responsáveis do sistema em caso de qualquer outra anomalia nas medições com os restantes instrumentos. A autonomia energética do sistema estava garantida com uma bateria alimentada por dois painéis solares.

A determinada fase este aparelho deixou de se encontrar em operação, devido inicialmente a uma avaria no *datalogger*, e posteriormente a problemas logísticos registados, como por exemplo fortes correntes no local que condicionavam a qualidade dos resultados para as velocidades medidas.

4.2.1.3 Estação Hidrométrica de Ómnias

Esta estação é operada pelo INAG (pertence à CCDR LVT), e mede níveis hidrométricos através de um limnígrafo, localizado em Ómnias, concelho de Almeirim. A sua localização exacta em coordenadas geográficas (WGS84) é 39° 13' 05" (Latitude) e -8° 40'05" (Longitude) Figura 4-6. A estação de Ómnias está em fase produtiva desde 11-12-2001, período desde o qual regista medições intervaladas de 15 minutos. A informação é transferida desde o local para a central através de telemetria, e actualizados em tempo-real no sítio do INAG.

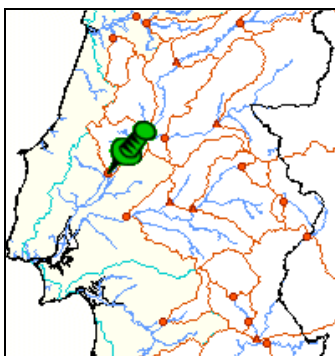


Figura 4-6: Localização da estação hidrométrica automática de Ómnias (INAG)

4.2.1.4 Gestão dos dados das estações automáticas

À excepção da estação de Ómnias (cujo processo de transferência e processamento dos dados medidos é efectuado inteiramente pelo INAG), os restantes sistemas de aquisição de dados enviam a informação medida para o servidor central mediante um pedido no mesmo servidor. Esta informação chega em formato ASCII, pelo que há a necessidade de inserir a mesma informação numa base de dados. Este processo de contacto com as estações e migração dos dados desde as estações para a base de dados é neste momento desenvolvido numa rotina diária. Quer a base de dados, quer a aplicação de importação de dados em formato ASCII para a base de dados, são produtos específicos do sistema operacional. A base de dados está construída em Access, enquanto a aplicação de importação dos dados é desenvolvida em VisualBasic.

Nessa mesma base de dados são ainda arquivados os valores medidos na estação hidrométrica de Ómnias. Contudo, foi desenvolvida uma ferramenta específica em VisualBasic.NET responsável pela importação diária para essa mesma base de dados, da informação referente aos níveis medidos, e que como já foi referido, são disponibilizados na Internet.

É utilizada uma curva de vazão da DRAOT (2000/2001) para converter os níveis em caudais, sendo esses valores também armazenados na base de dados. Posteriormente esses valores de caudal são utilizados como condição de fronteira no modelo operacional (este procedimento iniciou-se em apenas em Setembro de 2004).

Em resumo, consegue-se assim um sistema de monitorização em contínuo com capacidade de gestão e armazenamento dos dados, com comunicação em tempo real e controlo automático, e com mecanismos de resposta a eventos externos.

4.2.2 Campanhas de Amostragem Clássica

Para além da monitorização de parâmetros em contínuo e em tempo real, é comum o desenvolvimento de amostragens de água e sedimentos efectuados na área de estudo, a partir especialmente de campanhas de amostragem, no âmbito do programa de monitorização da Costa do Estoril. Os resultados destas análises consistem em mais uma fonte de informação histórica do estuário de Tejo, essencial à compreensão de processos e mecanismos envolvidos na dinâmica deste estuário.

Os resultados provenientes destas análises discretas no tempo, são armazenados numa base de dados desenvolvida para contemplar a variabilidade da informação recolhida. Esta base de dados tem a informação georreferenciada, podendo ser visualizada num sistema de informação

geográfica da Internet (MapServer). O processo de inserção dos resultados das análises na base de dados é efectuado através de uma aplicação com extensão aos laboratórios, enviando estes a informação compilada para as instalações do Maretec, onde a informação é finalmente validada e exportada para a base de dados central.

Na fase final da resolução desta tese, mais dados estão agora disponíveis para a área de estudo, provenientes do projecto SimTejo iniciado em 2004. Estes dados, embora sejam de facto de enorme valor para o estudo do estuário e validação do modelo operacional para o mesmo local, não serão alvo de análise no presente documento, por questões de ordem temporal.

4.2.3 Campanhas de Amostragem por Sensores

Durante o ano de 2003 foram realizados pelo Instituto Hidrográfico diversos fundeamentos de um perfilador acústico (ADCP) na zona do emissário da Guia. O ADCP utilizado foi um *Workhorse Sentinel* de frequência de 600 KHz, da *RD Instruments*. Este ADCP foi retirado do fundo mensalmente, para operações de manutenção.

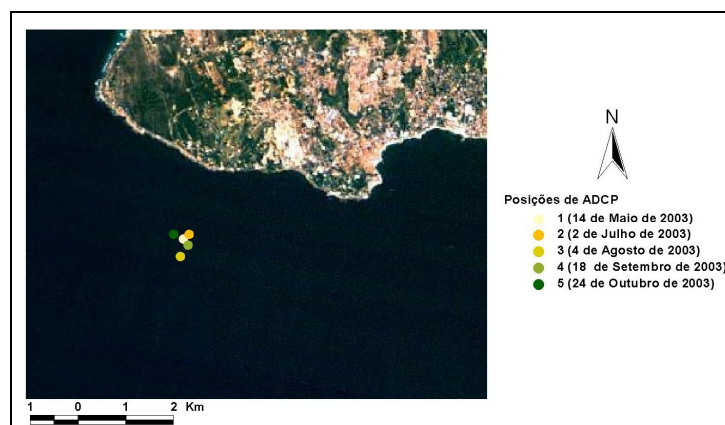


Figura 4-7: Posições de fundeamento do ADCP durante o ano de 2003

Data de Fundeamento	Data de Recuperação	Latitude (WGS-84)	Longitude (WGS-84)
14-5-2003	9-6-2003	38° 40.95' N	009° 27.89' W
2-7-2003	4-8-2003	38° 41.00' N	009° 27.81' W
4-8-2003	18-9-2003	38° 40.75' N	009° 27.93' W
18-9-2003	24-10-2003	38°40.88'N	009° 27.82' W
24-10-2003	25-11-2003	38°41.00' N	009° 28.03' W

Tabela 4-1: Posições de fundeamento do ADCP e respectivos períodos

Encontra-se ainda em implementação um sistema para efectuar leituras contínuas da qualidade da água dentro de uma embarcação em movimento. As medições são feitas através de uma sonda multiparamétrica e integradas com dados de um medidor de caudal e de um GPS. Desta forma é possível a obtenção de perfis horizontais do local em estudo. No momento da

elaboração deste documento o sistema aqui referido encontra-se em fase de finalização de protótipo.

4.2.4 Detecção Remota

Esta fonte de informação não é nova no sentido estrito uma vez que existe há bastante tempo mas a verdade é que os desenvolvimentos recentes em termos de acesso à informação e esforços para a tornar mais fiável em zonas costeiras vieram abrir novos horizontes na sua aplicação. Como já foi referido anteriormente (ver capítulo 2.5), a utilização de imagens de satélite em zonas costeiras é uma área em expansão, devido ao aparecimento de novos sensores como o MODIS-Aqua (NASA) e MERIS (ESA) e mesmo de novos algoritmos aplicados a sensores mais antigos como o Seawifs (NASA), permitiu avanços significativos nestas áreas.

Têm vindo a ser desenvolvidos sérios esforços no sentido de tornar o acesso e processamento deste tipo de informação mais eficiente. Neste momento, para além do acesso à informação de vários sensores (Seawifs, Meris, Modis), está também em fase de implementação o processamento e integração da informação derivada das imagens de satélite, através da adaptação de ferramentas que já existiam no âmbito do processamento e análise das grandes quantidades de informação geradas pelo modelo MOHID.

4.3 Modelação e Previsão

Uma das partes mais importantes do sistema de modelação operacional para o estuário do Tejo é, sem dúvida, a componente de previsão. Neste sistema operacional, são implementadas simulações da circulação e hidrodinâmica costeira, bem como de propriedades biogeoquímicas, de forma a monitorizar a qualidade da água na zona da costa do Estoril e a actividade trófica do estuário (dinâmica dos nutrientes e produção primária). É também desenvolvida a simulação integrada da dispersão de poluentes no campo próximo e afastado do emissário da Guia, verificando o seu impacto sobre a qualidade da água no meio receptor, principalmente através de contaminação bacteriológica. Estas previsões são efectuadas diariamente, para as 24 horas do dia seguinte.

Para assegurar a componente de modelação, foi necessário o recurso a uma filosofia de modelação integrada, capaz de simular todos os processos físicos e biogeoquímicos num sistema costeiro, utilizando a mesma malha de cálculo. Mas mais do que isso, é vantajosa a adopção de ferramentas capazes de considerar a troca de informação através de interfaces comuns entre diferentes sistemas físicos e onde os processos simulados possam ser diferentes. Recorreu-se assim ao sistema de modelação MOHID, originalmente desenvolvido no Instituto Superior Técnico desde 1985. Este modelo, para além das suas potencialidades, tem sido largamente aplicado à área de estudo. Estes dois pontos serão analisados em detalhe na próxima secção.

4.3.1 Sistema de modelação MOHID

Nesta secção opta-se por explicar apenas as principais componentes deste sistema de modelação que têm aplicação directa no modelo operacional.

4.3.1.1 Descrição Geral do Sistema

O desenvolvimento deste sistema iniciou-se na década dos 80 (Neves, 1985), tendo vindo a ser objecto de sucessivos aperfeiçoamentos na sequência da sua aplicação a diferentes projectos, científicos e tecnológicos (Portela e Neves, 1994; Cancino e Neves, 1998; Martins *et al.*, 2001; Santos *et al.*, 2002). Hoje em dia pode ser classificado com um dos mais elaborados entre os sistemas existentes deste tipo, nomeadamente a sua inovação face a descrição vertical e a sua programação robusta e fiável.

O sistema de modelação MOHID permite a adopção de uma filosofia de modelação integrada já referida, não só de processos (físicos e biogeoquímicos), mas também de diferentes escalas (possibilitando a utilização de modelos encaixados) e sistemas (estuários + bacias hidrográficas), graças à adopção de uma filosofia de programação orientada por objectos, como a que é descrita em Decyk (Decyk, et al, 1997). Esta metodologia utilizada na programação do modelo torna a sua utilização, tal como a sua expansão, muito robustas (Miranda *et al.*, 2000). Este tipo de programação tem provado ser uma metodologia muito útil no desenvolvimento de programas complexos, em especial para aqueles que têm por objectivo simular problemas "do mundo real" (Decyk et al., 1998), como é o caso da modelação de processos marinhos ou estuarinos.

Este modelo é programado em ANSI Fortran 95, garantindo a independência do sistema MOHID face ao sistema operativo em qual se pretende executar o modelo (Windows, Linux, Unix, etc.) e uma fácil implantação do código em qualquer ambiente. Embora a linguagem FORTRAN 95 não seja uma OOL (*object oriented language*), os módulos de FORTRAN podem funcionar como classes de uma normal OOL (Decyk, *et al.*, 1997; Akin, 1999), em que os objectos são criados a partir das classes. A comunicação entre os diferentes módulos que compõem o sistema é feita numa base de cliente/servidor garantindo assim o encapsulamento da informação de cada módulo (Duffy, 1995).

O tempo de execução do programa (tempo simulada *versus* tempo da unidade central de processamento) varia em função da malha de cálculo e do passo de tempo utilizado. A possibilidade de correr os vários módulos (hidrodinâmica, turbulência, deriva, etc.) que compõem o sistema MOHID com passos de tempo diferentes, permite ao utilizador obter resultados num reduzido espaço de tempo. Todo o modelo utiliza a alocação dinâmica da memória, tornando-se assim mais versátil, podendo para qualquer tipo de simulação sempre ser utilizado o mesmo executável do programa. Com esta filosofia de programação também é

possível utilizar uma metodologia de modelos encaixados (*nested modelling*) de tal modo que o número de modelos encaixados que o utilizador pode definir é ilimitado. Na realidade, esta escolha está limitada à capacidade de cálculo disponível.

Esta filosofia de programação, possibilita ainda a execução dos diferentes modelos em paralelo em processadores separados, comunicando entre eles recorrendo ao protocolo MPI (*Message Passing Interface*), possibilitando assim um ganho muito significativo no tempo de cálculo.

Presentemente, o sistema MOHID é um conjunto de diversas ferramentas numéricas, agrupado em três grandes grupos: (i) MOHID Water, (ii) MOHID Land and (iii) MOHID Soil. A primeira ferramenta é responsável pela modelação dos processos hidrodinâmicos, simulação de fenómenos de dispersão (abordagens lagrangeana e euleriana), propagação de ondas, transporte de sedimentos, qualidade da água / processos biogeoquímicos na coluna de água e trocas com o fundo; A segunda é um modelo de bacia e a terceira simula o fluxo de água através de meios porosos.

A versatilidade do MOHID Water pode ser facilmente demonstrada pela série de aplicações levadas a cabo nos últimos anos: aplicações no Norte Atlântico para estudar a circulação geral (Neves, *et al.*, 1998, Coelho, *et al.*, 2002; Santos, *et al.*), derrames de petróleo (Leitão, *et al.*, 2003), circulação, eutrofização e tempos de residência em estuários (Cancino e Neves, 1998; Taboada *et al.*, 1998; Villareal, *et al.*, 2002; Braunschweig, *et al.*, 2003) e albufeiras (Braunschweig, 2001). O MOHID Land é a ferramenta mais recente do sistema MOHID, não apresentando ainda a maturidade do MOHID Water. Foi aplicado a algumas bacias hidrográficas, entre as quais a Bacia do Trancão.

4.3.1.2 MOHID Water

O MOHID Water pode ser dividido em quatro grandes classes: as duas primeiras gerem as propriedades do escoamento não turbulentas (ex. velocidade, elevação, viscosidade turbulenta, fluxos de água) e turbulentas (viscosidades, difusividades, energia cinética turbulenta, comprimentos de mistura, etc.), as outras duas as propriedades da água (ex. salinidade, temperatura, densidade, amónia, sedimentos coesivos). As três primeiras classes calculam a evolução das propriedades relativamente a um referencial eulereano e a discretização das equações é feita em volumes finitos.

Esta metodologia consiste em aplicar as leis (físicas, químicas e biológicas), que regem os processos que se pretendem simular, directamente a um volume de controlo na forma de uma divergência de um fluxo. Como consequência automaticamente este método garante a conservação de massa das propriedades simuladas (Adcroft *et al.*, 1997). A última classe utiliza um referencial lagrangeano para calcular a evolução das propriedades da água neste caso outra propriedade importante é a localização da massa de água. Esta classe evolui de um modelo de

partículas utilizado nas versões anteriores do Mohid (Leitão, 1997). Hoje em dia o modelo lagrangeano pode ser utilizado para simular processo de qualidade de água, tal como a deriva de manchas de petróleo.

4.3.1.2.1 Módulo Hidrodinâmico

O módulo hidrodinâmico do sistema MOHID gera e actualiza a informação do escoamento, resolvendo as equações primitivas do movimento no espaço tridimensional para fluidos incompressíveis. Assume-se o equilíbrio hidrostático, bem como a aproximação de Boussinesq. A discretização espacial destas equações é feita utilizando uma técnica de volumes finitos (Martins *et al.*, 2001) a qual permite a utilização de um sistema de coordenadas verticais genérico, tornando o modelo independente da discretização vertical. Assim, o modelo pode facilmente ser aplicado a diferentes locais com geometrias variadas. A discretização temporal é baseada na utilização de um esquema semi-implícito. É também incorporado um esquema de turbulência baseado no modelo GOTM, largamente validado numa vasta gama de locais. O modelo permite a consideração de condições de fronteira abertas ou fechadas. As condições de fronteira abertas podem ser do tipo nível imposto, radiativas ou um misto das duas.

4.3.1.2.1.1 Equações Resolvidas

As equações resolvidas pelo módulo hidrodinâmico têm todas por base a equação que descreve na forma integral da evolução de uma variável genérica P , no interior de um volume de controlo:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V P dV = - \oint_A \vec{F} \cdot d\vec{A} + Fontes - Poços \quad (1)$$

sendo A a superfície que define a fronteira do volume controlo e V o integral de superfície de \vec{F} corresponde ao fluxo da propriedade P através de A .

O módulo hidrodinâmico tem como objectivo simular a evolução das propriedades do escoamento. As velocidades segundo X e Y (horizontais) são umas dessas propriedades, as quais são calculadas com base na equação (1) e admitindo que:

$$P = \rho \cdot \vec{v} \wedge \vec{F} = P \cdot (\vec{v} \cdot \vec{n}) = \rho \cdot \vec{v} \cdot (\vec{v} \cdot \vec{n}) \quad (2)$$

$$Fontes - Poços = \sum Forças = Gravíticas + Pressão + Viscosas \quad (3)$$

As forças gravíticas englobam as forças de atracção gravítica exercidas sobre o volume de

controlo em estudo pelo planeta Terra $\left(\vec{g} \int_V \rho dV \right)$, pela Lua e pelo Sol (potencial da maré).

O potencial de maré é um termo que adquire importância em domínios de grandes dimensões, da ordem das centenas de quilómetros, sendo resolvido com base na formulação proposta por Choi *et al.* (1997).

As forças de pressão e as forças viscosas são exercidas sobre a superfície fronteira do volume de controlo e resultam da interacção deste com o meio envolvente. As forças de pressão são normais à superfície de fronteira $\left(-\oint_A p \cdot \vec{n} dA\right)$ enquanto que as forças viscosas $\left(\oint_A \vec{\tau} dA\right)$ podem ser subdivididas em tangenciais e normais.

No que diz respeito às forças viscosas tangenciais é necessário definir condições de fronteira no fundo e à superfície. No fundo é utilizada uma lei quadrática em que a tensão de corte é igual ao coeficiente Chezy vezes o quadrado da velocidade. Na superfície, caso um dos agentes forçadores seja o vento, a tensão de corte é a tensão de corte do vento caso contrário o seu valor é nulo.

Outra propriedade fundamental a ter em consideração é a nível da superfície livre cuja evolução é calculada com base na equação (1) admitindo que o meio é 2D, isto é, a sua evolução só é condicionada pelos fluxos de água. Neste caso os termos da equação podem-se escrever na forma:

$$P = \rho \wedge \vec{F} = \rho \cdot \vec{v} \quad (4)$$

$$\text{Fontes} - \text{Poços} = \text{Descargas} + \text{Precipitação} - \text{Evaporação} \quad (5)$$

A equação (1) torna-se então numa equação de conservação de massa 2D:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = -\oint_A \rho \vec{v} \cdot d\vec{n} + \text{Descargas} + \text{Precipitação} - \text{Evaporação} \quad (6)$$

Ao contrário da equação anterior em que a propriedade transportada era a incógnita, aqui a propriedade é conhecida (ρ) e a incógnita é o próprio volume de controlo.

Uma vez que se trata de um abordagem 3D é ainda necessário especificar uma equação para o cálculo da velocidade vertical, a qual é obtida a partir da equação de conservação de massa anteriormente descrita admitindo a hipótese hidrostática.

4.3.1.2.1.2 Principais aproximações

A equação (1) aplicada à conservação de quantidade de movimento é válida para um referencial fixo. No entanto, o referencial natural, a Terra, está em permanente rotação, sendo

o efeito desta rotação sobre o escoamento usualmente contabilizado na forma de uma força inercial denominada força de Coriolis.

Outra aproximação, usualmente efectuada na aplicação da lei de conservação de quantidade de movimento a escoamentos oceânicos e costeiros, explora o facto das variações de densidade da água nestes casos ser muito pequena, menos de 3%. Neste caso a densidade pode ser considerada constante para o cálculo da sua massa e forças de inércia, excepto para as forças que são função da aceleração da gravidade. A esta simplificação chama-se aproximação de Boussinesq.

Uma terceira simplificação adoptada tem em consideração que, no oceano e em águas costeiras, as escalas na vertical são pequenas e, conseqüentemente, o escoamento tem de uma forma geral velocidades muito baixas nessa direcção. Para além da dimensão das escalas verticais a estratificação vertical de densidade estável tem também um papel importante, porque tende a inibir qualquer movimento vertical por acção da impulsão. As acelerações verticais são baixas tal como as forças viscosas. O fluido por sua vez, no que diz respeito aos movimentos verticais, comporta-se como se estivesse num equilíbrio estático. Nestas condições é válida a hipótese hidrostática, isto é, é possível desprezar todos os termos de inércia e admitir que o gradiente de pressão vertical está em equilíbrio com a força da gravidade. A pressão, no caso da hipótese hidrostática, é então apenas função da profundidade e do gradiente vertical de densidade.

Na discretização do termo de pressão optou-se pela divisão deste numa componente barotrópica e outra baroclínica. A primeira contabiliza o efeito do gradiente de nível sobre a pressão, enquanto a segunda contabiliza o efeito do gradiente de densidade. Esta divisão permite correlacionar directamente a variação da superfície livre com a pressão (barotrópica). Desta forma a superfície livre pode ser utilizada para calcular o volume de controlo e simultaneamente servir como estimativa da pressão barotrópica. Por outro lado, podem-se aplicar métodos numéricos diferentes a cada um dos termos.

A consideração das aproximações à lei de conservação de quantidade de movimento, apresentadas anteriormente, dá origem à equação (7).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \vec{v} dV = & - \oint_A (\vec{v} \cdot \vec{n}) d\vec{n} + \oint_A v_T \frac{\partial(\vec{v})}{\partial n} d\vec{n} - \underbrace{g \oint_A (\eta - z) \cdot d\vec{n}_x}_{\text{Força barotrópica segundo X}} - \underbrace{g \oint_A \left(\int_z^\eta \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} dz \right) \cdot d\vec{n}_x}_{\text{Força baroclínica segundo X}} \\ & - \underbrace{g \oint_A (\eta - z) \cdot d\vec{n}_y}_{\text{Força barotrópica segundo Y}} - \underbrace{g \oint_A \left(\int_z^\eta \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} dz \right) \cdot d\vec{n}_y}_{\text{Força baroclínica segundo Y}} - \underbrace{\oint_A p_{atm} d\vec{n}_x}_{\text{pressão atmosférica X}} - \underbrace{\oint_A p_{atm} d\vec{n}_y}_{\text{pressão atmosférica Y}} \end{aligned}$$

$$+ \underbrace{\int_V 2\vec{\Omega} \times \vec{v} dV}_{\text{Força de coriolis}} + \text{Potencial da Maré} \quad (7)$$

O módulo hidrodinâmico resolve assim a equação de conservação de quantidade de movimento 3D (7) para calcular as componentes horizontais da velocidade e uma equação de conservação de massa (6), para um meio 2D, para calcular a variação da superfície livre no tempo. Finalmente resolve mais uma vez a equação (6), agora para um meio 3D, para calcular a velocidade vertical do escoamento.

4.3.1.2.2 Módulo de Turbulência

A resolução numérica das equações do módulo hidrodinâmico além de ser discreta no espaço também o é no tempo. Por este motivo, o módulo hidrodinâmico resolve na realidade as equações apresentadas anteriormente com base numa decomposição à Reynolds.

Esta decomposição pode ser perspectivada como uma filtragem temporal, em que os valores instantâneos das propriedades (f) são substituídos por quantidades médias (\bar{f}) mais flutuações turbulentas (f').

A integração temporal da equação (7) permite escrevê-la em termos de valores médios surgindo, devido aos efeitos não lineares, termos adicionais (tensores de Reynolds). Estes termos representam a contribuição do transporte turbulento para o campo médio e podem ser vistos como o transporte das flutuações do campo variável em estudo pelas flutuações do campo da velocidade.

Levanta-se assim um novo problema usualmente designado por “fecho da teoria da turbulência”. Existem diversos métodos de resolver este problema sendo comum admitir que este novo termo é proporcional ao gradiente da propriedade média transportada, ou seja:

$$\overline{v'v'} = \nu_T \frac{\partial \bar{v}}{\partial n} \quad (8)$$

A variável ν_T é designada por viscosidade turbulenta. Nos casos em que o meio possa ser considerado isotrópico pode-se admitir que ν_T é constante. Caso contrário é necessário calcular para cada uma das direcções um valor, $\nu_T = (\nu_x, \nu_y, \nu_z)$.

Na maioria dos casos admite-se $\nu_x = \nu_y$, uma vez que na horizontal os processos normalmente podem-se considerar homogéneos. A grande diferença reside nas escalas características das direcções horizontal e vertical. Nesta perspectiva, o coeficiente de

viscosidade turbulenta pode ser dividido em viscosidade turbulenta horizontal e vertical, $\nu_T = (\nu_H, \nu_H, \nu_V)$.

Uma vez que se admitiu que o novo termo tem uma natureza matemática semelhante ao termo das forças viscosas, a sua ordem de grandeza é facilmente comparável. As escalas normalmente resolvidas pelos modelos hidrodinâmicos são da ordem dos metros, a que corresponde uma viscosidade turbulenta várias ordens de grandeza superiores à viscosidade molecular, pelo que as forças viscosas podem ser consideradas desprezáveis.

O fecho turbulento vertical é feito com base o módulo de turbulência do modelo GOTM (*General Turbulence Ocean Model*). Neste módulo podem-se encontrar um conjunto de diferentes modelos para a descrição das trocas turbulentas nas camadas de mistura. Todos os modelos usam o princípio de viscosidade turbulenta, que permite obter os coeficientes de troca turbulenta em função de propriedades do escoamento médio. Para mais informação sobre as aplicações e os avanços teóricos no módulo de turbulência do modelo GOTM pode consultar-se a página web (<http://www.gotm.net>).

4.3.1.2.3 Módulo de Transporte Euleriano / Propriedades da Água

Para além do cálculo das propriedades do escoamento, e dos coeficientes de difusão turbulenta, é preciso estudar o transporte e evolução de propriedades da água. Este cálculo é efectuado com base num módulo independente da hidrodinâmica responsável pela evolução relativa a um referencial eulereano de todas as propriedades da água (incluindo salinidade e temperatura), o qual resolve a equação (1) aplicada a um meio 3D – é o modulo de propriedades da água (*ModuleWaterProperties*), que resolve explicitamente os termos advectivos e difusivos horizontais e implicitamente os termos advectivos e difusivos verticais, podendo o termo advectivo ser resolvido recorrendo a um dos seguintes tipos de discretização: diferenças centradas, upwind e QUICK.

A densidade é calculada com base na equação de estado para a salinidade e a temperatura (Leendertsee e Liu, 1978):

$$\rho = (5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S) / ((1779.5 + 11.25T - 0.0745T^2) - (3.8 + 0.01T)S + 0.698(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S)) \quad (9)$$

A temperatura e a salinidade podem ser valores constantes ou evoluir no tempo devido ao efeito do transporte por parte do escoamento de descargas pontuais, de fluxos à superfície, de trocas de calor no caso da temperatura (radiação solar, radiação infravermelha, calor latente e sensível) e trocas de massa no caso da salinidade (evaporação/precipitação).

4.3.1.2.3.1 Transporte de Sedimentos Finos

A simulação do transporte de sedimentos finos é efectuada com base no módulo de transporte euleriano, com formulações específicas para a velocidade de queda, para as trocas com o fundo e para a floculação. A representação dos fenómenos de floculação e erosão/sedimentação dos sedimentos é efectuada com base em formulações empíricas que devem ser calibradas com base em medidas locais

4.3.1.2.4 Ecologia / Modelo Biogeoquímico

Neste momento a modelação ecológica no MOHID Water pode ser feita por 3 abordagens diferentes, uma baseada no modelo ERSEM, outra baseada no CE-QUAL-W2, e outra no modelo WASP (EPA, 1985). A abordagem utilizada no modelo operacional é a do modelo WASP e simula a dinâmica e produtividade de produtores, consumidores, e também ciclos de azoto, carbono e oxigénio, interagindo como sistema bêntico (coluna sedimentar) e hidrodinâmica. (Miranda, 1999; Pina, 2001).

O modelo ecológico / biogeoquímico / qualidade da água utilizado no modelo operacional é responsável pelo cálculo da evolução espacial e temporal da concentração do termo relativo às fontes e poços específicos para cada parâmetro biogeoquímico, que estão associadas aos ciclos do Carbono e Azoto. Assim, este módulo é responsável pela resolução das reacções químicas e biológicas na coluna de água e no fundo, que conjugadas com o transporte (calculado advecção-difusão + hidrodinâmica), fornecem a distribuição espacial dos parâmetros biogeoquímicos.

O modelo encontra-se preparado para fornecer em cada célula da malha o valor da concentração de Fitoplâncton, Zooplâncton, Azoto (na forma de Amónia, Nitrato, Nitrito, Azoto Orgânico Dissolvido Refractário ou não e Azoto Orgânico Particulado), Oxigénio dissolvido e ainda Carência Bioquímica de Oxigénio. Os processos ecológicos são simulados seguindo uma abordagem de fontes e poços, permitindo a flexibilidade de acoplamento a um modelo de resolução euleriana ou lagrangeana.

Para o estudo da interacção entre os sistemas bêntico e pelágico, é também tida em conta a evolução das propriedades dissolvidas e particuladas nos dois sistemas. A evolução das propriedades dissolvidas nos dois sistemas depende maioritariamente dos fluxos de água, quer na coluna de água, quer na água intersticial do sedimento. A evolução das propriedades particuladas é simulada considerando uma dependência dos fluxos de água e da velocidade de sedimentação. Uma vez depositada no fundo, a matéria particulada pode permanecer ou ser ressuspensa. Caso permaneça no fundo, a mesma matéria pode tornar-se parte do compartimento do sedimento por consolidação, e tornar-se-á disponível para os processos

biogeoquímicos que ocorrem na camada do fundo. Os produtos destes processos modificam a composição sedimentar, mas podem também ser exportados para a coluna de água.

4.3.1.2.5 Módulo de Transporte Lagrangeano

Os modelos de transporte lagrangeano baseiam-se na simulação do movimento de traçadores num referencial lagrangeano, bem como de uma série de propriedades que lhe podem estar associadas. As principais propriedades habitualmente associadas a traçadores lagrangeanos são a origem, posição espacial, geometria, velocidade de sedimentação, propriedades indicadoras da qualidade da água (coliformes, petróleo, temperatura, fitoplâncton, etc.). A aplicação de modelos de transporte lagrangeano justifica-se sobretudo quando se pretende seguir efectivamente a trajectória de um conjunto de traçadores, ou quando se está em presença de gradientes muito acentuados, ou diferenças de escala muito grandes entre a dimensão dos traçadores e a área simulada. Neste tipo de aplicações, a aproximação lagrangeana constitui uma boa solução, pois permite manter gradientes elevados uma vez que esta metodologia não possui os problemas de difusão numérica que caracteriza os modelos eulereanos.

O módulo lagrangeano tridimensional, foi inicialmente desenvolvido para ser acoplado à primeira versão do modelo hidrodinâmico MOHID (Neves, 1985) que era um modelo bidimensional. Numa segunda fase foram sendo adicionadas novas potencialidades permitindo a simulação de processos tais como descargas de águas residuais, emissão pontual de sedimentos (ex: rios e material dragado), trajectórias de manchas de petróleo e cálculo de tempos de residência.

Numa terceira fase o módulo foi generalizado para ser facilmente acoplado tanto a modelos 2D como 3D (Leitão, 1997). Assim, os traçadores (ou partículas) possuem seis características principais: coordenadas espaciais (x, y, z), velocidade horizontal/vertical, tempo durante o qual o traçador mantém a velocidade, velocidade de sedimentação, massa e volume. Para cada umas destas propriedades é resolvida uma equação de evolução. A massa pode ser um *array* de mais de 30 propriedades (ex: nutrientes, fitoplâncton, matéria em suspensão).

4.3.1.2.5.1 Deslocamento de traçadores

As coordenadas espaciais são calculadas a partir da definição de velocidade:

$$\frac{dx_i}{dt} = U_i(x_i, t) \quad (10)$$

A qual é resolvida com base num método explícito simples:

$$x_i^{t+\Delta t} = x_i^t + \Delta t \cdot u_i' \quad (11)$$

A aplicação de métodos de ordem mais elevada, implica a utilização de procedimentos iterativos. O método de *Heun* utilizado por Monteiro (1995) corresponde a um esquema de previsão-correcção de dois níveis temporais, com um grau de precisão de 2ª ordem no tempo. Costa (1991) concluiu que a adopção de esquemas de ordem mais elevada só é necessária quando as linhas de corrente apresentam uma curvatura acentuada e o passo temporal é elevado. Para a maioria dos escoamentos naturais, a precisão, associada ao método explícito, é suficiente para se obterem bons resultados.

Para calcular a velocidade em qualquer ponto do domínio, é utilizada uma interpolação linear (Figura 4-8), também neste caso se poderia optar por um método de interpolação mais preciso, como a interpolação bilinear utilizada por Monteiro (1995), embora este aumento de precisão torne o algoritmo mais lento.

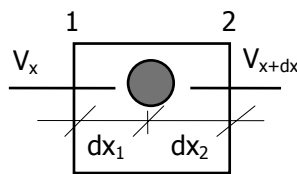


Figura 4-8 - Cálculo da velocidade média dos traçadores.

Às velocidades U_x e U_{x+dx} segundo x , nas faces 1 e 2 podem ainda ser adicionadas uma velocidade de deriva devido ao vento, uma velocidade representativa do transporte difusivo / turbulento e ainda a velocidade de espalhamento do petróleo, caso se simule um derrame de hidrocarbonetos. O transporte turbulento é forçado pelos vórtices não resolvidos pelo modelo. O efeito destes vórtices, sobre os traçadores, depende da razão entre o tamanho dos vórtices e dos traçadores. Os vórtices maiores que os traçadores induzem um movimento aleatório ao traçador, como está esquematizado na

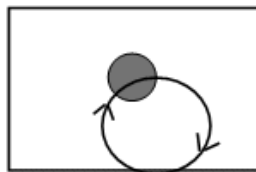


Figura 4-9 - Movimento aleatório forçado por vórtices maiores que o traçador (círculo cinzento)

4.3.1.2.6 MOHID JET

Este módulo é responsável pela simulação da diluição inicial (no campo próximo), que resolve de uma forma integral jactos com impulsão. A diluição inicial é simulada recorrendo à evolução de um traçador com uma forma geométrica cilíndrica, utilizando um referencial lagrangiano para a discretização espacial (Leitão, 2004). Os respectivos resultados podem ser utilizados pelo sistema MOHID para gerar as condições iniciais do módulo de traçadores lagrangianos, este responsável pela simulação da dispersão da pluma de emissários no campo afastado.

Desta forma, é possível a adoção de uma metodologia de simulação tridimensional integrada de dispersão de poluentes nos campos próximo e afastado da emissão.

4.3.1.2.7 Geometria / Discretização Espacial

Tal como na horizontal, na discretização vertical é comum a utilização de transformação de coordenadas para otimizar a precisão da malha. Na vertical este problema é ainda mais importante porque os gradientes são normalmente muito superiores. Uma discretização grosseira na vertical pode dar origem a excesso de difusão numérica e pode tornar impraticável, por exemplo, a simulação do efeito da estratificação sobre um escoamento.

Os modelos de volumes finitos permitem uma grande flexibilidade, ao nível da discretização espacial, uma vez que a geometria é introduzida numa forma explícita através das áreas e volumes de cada célula. Esta versatilidade permite subdividir o domínio tanto na horizontal como na vertical, em zonas com diferentes discretizações (ver Figura 4-10).

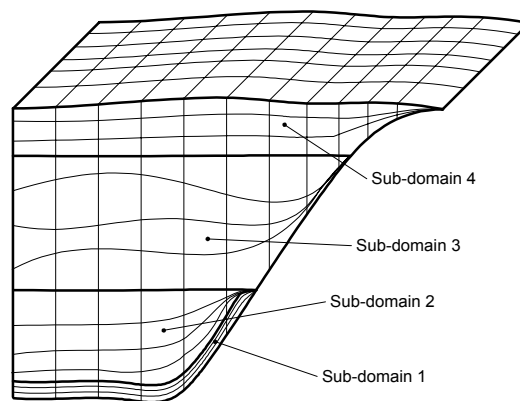


Figura 4-10 - Malha ilustrativa das potencialidades de discretização vertical do sistema MOHID

Esta metodologia possibilita igualmente o desenvolvimento, sem muito esforço, de coordenadas verticais alternativas que melhor se adaptem a um caso particular.

A flexibilidade do sistema Mohid ao nível da discretização vertical permite a respectiva utilização tanto em ambientes oceânicos, como escoamentos, em circulação em albufeiras ou até processos de pequena escala como seja a dispersão de plumas térmicas.

A resolução horizontal do sistema MOHID é variável na sua extensão, possibilitando simulações mais detalhadas em zonas específicas da malha de cálculo.

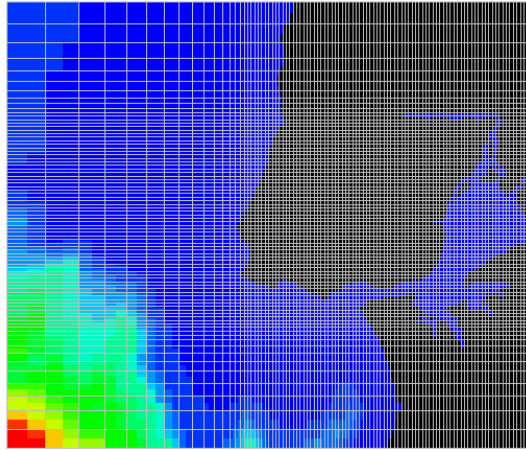


Figura 4-11 – Exemplo de aplicação de passo variável ao estuário do Tejo

4.3.1.2.8 Discretização Temporal

Os termos que condicionam a estabilidade das equações são a pressão barotrópica (ondas gravíticas), o atrito no fundo e a difusão vertical. Ao primeiro está associada uma celeridade elevada, \sqrt{gh} , sendo h a profundidade e g a aceleração gravítica. A discretização do atrito levanta alguns problemas quando o gradiente de velocidade junto ao fundo é muito intenso. Por fim a difusão vertical introduz maiores dificuldades quando a discretização vertical é muito fina.

Como o objectivo de não impor limites muito restritivos aos critérios de estabilidade foi adoptada uma discretização semi-implícita do tipo ADI "*Alternante Direction Implicit*"). Os três termos que apresentam mais problemas de estabilidade foram discretizados implicitamente, enquanto que para os restantes optou-se por uma abordagem explícita. A vantagem de um método semi-implícito sobre um método totalmente implícito é o sistema de equações resultante poder ser do tipo tridiagonal. Estes sistemas são resolvidos de uma forma muito eficiente pelo algoritmo de Thomas. Os métodos implícitos, quando aplicados a domínios 2D e 3D, dão origem a sistemas de equações esparsos, sendo por isso, necessário recorrer a métodos dispendiosos em termos de rapidez de cálculo.

4.3.1.2.9 Condições de Fronteira

4.3.1.2.9.1 Fronteiras Abertas

Este é um tema complexo e exige um acompanhamento constante do estado da arte e investigação das várias soluções. A experiência acumulada tem mostrado que não existe uma solução universal e que, em cada caso, é necessário testar diferentes soluções, optando pela que menos perturbe a solução e simultaneamente não deixe o modelo divergir.

A metodologia para definir condições de fronteira abertas é extremamente versátil. Uma forma que o utilizador tem de garantir que a simulação não tende a divergir da solução conhecida, é

4 - Implementação do Sistema

definindo uma solução exterior (ou de referência) e fornecê-la ao módulo hidrodinâmico na entrada de dados. Esta solução exterior pode ser definida de uma forma contínua para cada ponto de cálculo recorrendo a campos de propriedades definidos em arquivos ASCII, que podem ser constantes ou variáveis no tempo.

Outra hipótese é definir a solução em alguns pontos, e o módulo hidrodinâmico durante o *Run* interpolar a solução para os pontos fronteira. Esta é a metodologia utilizada na imposição da maré. Esta abordagem tem a vantagem de minimizar a entrada de dados. A informação pode ser dada na forma duma série temporal ou na forma de componentes harmónicas no caso da maré.

Em alternativa, também é possível utilizar o próprio módulo hidrodinâmico para calcular a solução de referência recorrendo ao conceito de modelos encaixados (ver Figura 4-12). Uma vez que toda a programação do sistema MOHID está orientada por objectos, o número de modelos encaixados que o utilizador pode definir é ilimitado. Na realidade, esta escolha está limitada à capacidade de cálculo disponível.

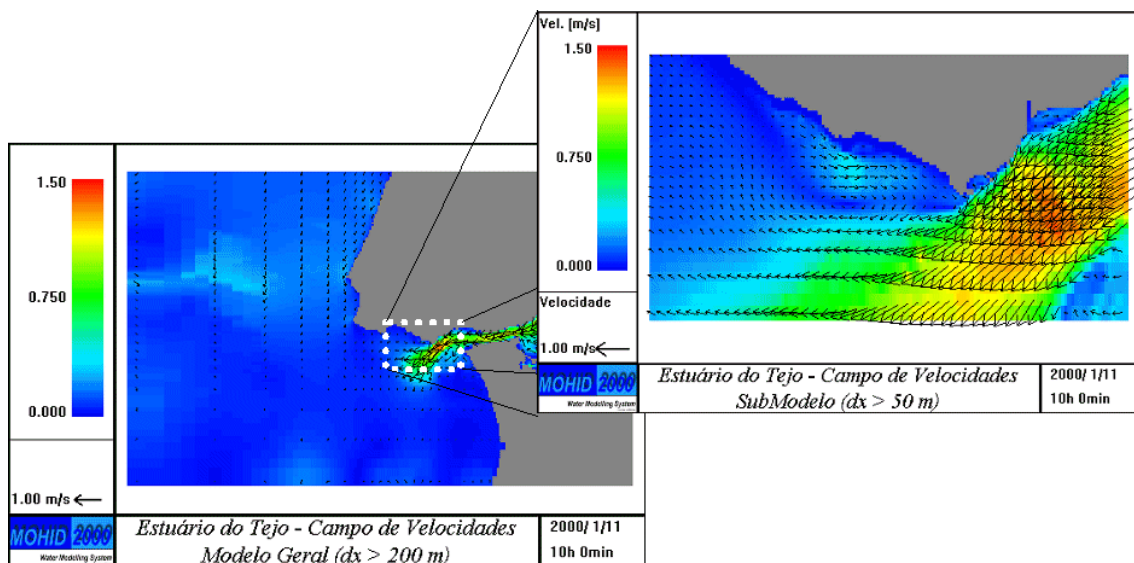


Figura 4-12 - Modelos encaixados aplicados ao estuário do Tejo. Estudo efectuado no âmbito do plano de monitorização da qualidade da água das praias da costa do Estoril.

Esta metodologia é extremamente poderosa, uma vez que permite a definição de um modelo de larga escala com um passo espacial grosseiro, onde seja relativamente fácil definir as condições de fronteira, e de seguida ir implementando modelos encaixados que, na zona de estudo, tendam a reduzir o passo da malha até se obter a precisão desejada. Esta metodologia tem como única desvantagem a exigência em termos de capacidade de cálculo.

4.3.1.2.9.2 Fronteiras Fechadas

Fisicamente existem trocas de quantidade de movimento entre a costa e o escoamento por atrito lateral. Todavia este processo é desprezável relativamente ao atrito no fundo, devido à diferença existente entre o passo espacial na horizontal e na vertical. O seu efeito do atrito lateral sobre o escoamento só será visível no escoamento para passos de malha inferior a 10 m. Nestes casos o utilizador tem que escolher a opção de não escorregamento lateral.

Como foi anteriormente referido, a fronteira móvel é uma fronteira fechada cuja posição evolui no tempo. Este tipo de fronteira é utilizado para simular zonas intertidais. Neste caso é necessário fazer uma verificação constante de todos os pontos de cálculo de velocidades que estão descobertos onde é imposta a condição de fluxo de massa e fluxo de quantidade de movimento nulos.

4.3.1.3 Interface Gráfica para o utilizador

A interacção com o modelo MOHID é efectuada através de uma interface gráfica *MOHID GUI* – esta é uma aplicação desenvolvida em ambiente Windows, que permite a manipulação de ficheiros e directorias necessárias à realização das simulações do MOHID, e integra todo o software MOHID, como por exemplo o *MOHID GIS* – gere dados georreferenciados – e o *MOHID PostProcessor* - permite a visualização e reprodução gráfica dos resultados do MOHID. A interface gráfica foi devidamente adaptada para poder executar o modelo e tratar os respectivos resultados de forma operacional. Para tal, a interface gráfica integra ainda outras ferramentas auxiliares, como o *Mohid Scheduler* (permite o agendamento de tarefas, por exemplo, correr o modelo ou fazer figuras), ou o *MOHIDTimeSeriesCreator* (responsável pela entrada e saída de séries temporais do modelo, com ligação a bases de dados). Esta última ferramenta, corre a partir da linha de comandos. O MOHID PostProcessor pode correr também a partir da linha de comandos, de modo a tornar mais operacional e automático o processo de criar figuras com resultados do modelo, para posterior publicação na internet

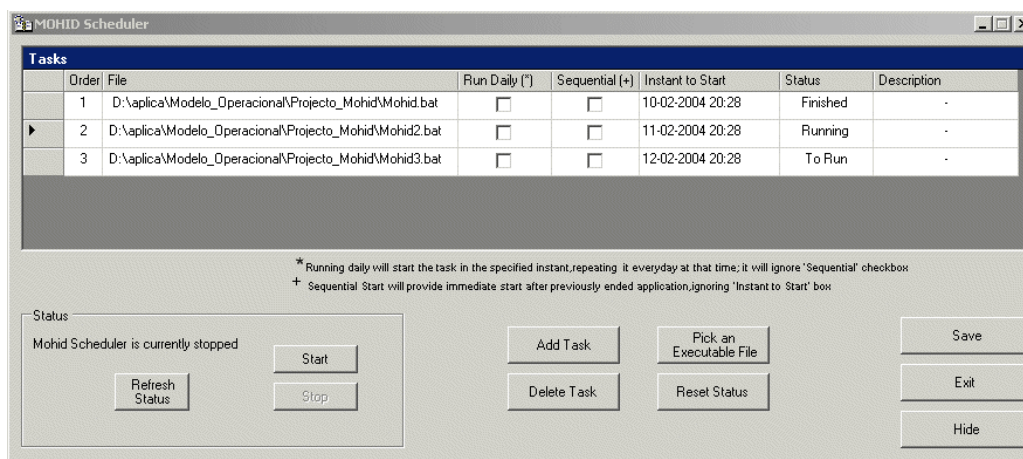


Figura 4-13 – *MOHID Scheduler*: exemplo de ferramenta operacional integrada na interface gráfica MOHID

4.3.2 Validação do Sistema MOHID na área de estudo

A componente MOHID Water tem sido largamente aplicada no estuário do Tejo. Leitão (2002) apresenta a validação dos processos hidrodinâmicos na embocadura do estuário simulados pelo sistema MOHID Water. Esta validação foi feita para dois cenários, um típico de Verão e outro típico de Inverno.

O modelo forçado com a maré e com um vento variável no tempo e constante no espaço não é capaz de reproduzir a corrente residual abaixo da termoclina permanente com direcção NW da ordem dos 10 cm/s medida pelo ADCP em ambos os períodos que foi fundeado (Junho/Julho e Outubro/Novembro de 1998). No entanto, com este forçamento o modelo simula de uma forma consistente a variabilidade 3D medida pelo ADCP. Tendo em conta estes factos a hipótese mais lógica é a de que esta corrente residual barotrópica (2D) é forçada por algum mecanismo não considerado no modelo. Os mecanismos mais prováveis já foram anteriormente identificados e são respectivamente: a corrente da vertente (Coelho, 2002) e/ou o rotacional do vento induzido pela topografia (Munchow, 2000).

De qualquer modo, o grau de fiabilidade dos resultados obtidos permitem avançar numa forma segura para a implementação de um modelo numérico que faça previsões todos os dias.

4.3.3 Condições do Modelo Operacional Implementado

Como já foi referido no capítulo 4.3.1.2.9.1 (condições de fronteira aberta), a metodologia de modelos encaixados representa uma solução eficiente para resolver problemas de escala. Através desta metodologia, torna-se possível fazer *downscale* da solução, bem como forçar modelos locais com processos de grande escala. Esta metodologia permite ainda a integração numa única ferramenta, de diversos modelos locais forçados pelo mesmo modelo regional, ou pela assimilação de informação (detecção local ou remota). Na próxima tabela é descrita a configuração do modelo operacional desenvolvido, que recorre à filosofia de modelos encaixados.

4 - Implementação do Sistema

Nível	1	2		3	
Zona da Malha	Nazaré - Setúbal	Tejo		Guia	Carcavelos – Paço de Arcos
Número de pontos	168 x 223	162 x 162		100 x 60	301 x 105
Passo espacial mínimo (m)	2000	300		35	10
Passo temporal (seg.)	120 (double splitting)	30 (double splitting)	30 - hidrod. (double splitting) + 60 – qual. água	15 (double splitting)	7.5 (double splitting)
Discretização vertical	☒	☒	11 camadas (cartesianas)	11 camadas (cartesianas)	11 (cartesianas)
Componentes Modeladas	Hidrodinâmica	Hidrodinâmica, Qualidade da água	Hidrodinâmica	Hidrodinâmica, diluição inicial + dispersão da pluma do emissário	Hidrodinâmica
Fluxo	Barotrópico	Barotrópico	Baroclínico	Baroclínico	Baroclínico
Maré Imposta	✓	☒	☒	☒	☒
Esquema de Advecção	Upwind 1ª ordem	Upwind 1ª ordem	Upwind 1ª ordem	QUICK	QUICK
Descargas	☒	Tejo, Sorraia, Trancão, ETAR's	Tejo, Sorraia, Trancão, ETAR's	ETAR Guia	☒
Interface água-atmosfera	Vento	vento, temperatura, radiação, humidade relativa, fluxos de calor	vento, temperatura, radiação, humidade relativa, fluxos de calor	vento, temperatura, radiação, humidade relativa, fluxos de calor	vento, temperatura, radiação, humidade relativa, fluxos de calor
Operacional	Todos os dias	Todos os dias	Todos os dias	Todos os dias	Se necessário

Tabela 4-2 – Configuração do modelo operacional

O esforço de desenvolvimento foi sobretudo dirigido à operacionalidade do modelo. Com a filosofia de modelos encaixados, foi possível afastar a fronteira aberta para o mar alto e forçar modelos de maior detalhe com resultados de um modelo de larga escala. Sintetizando, o modelo operacional do Tejo simula o escoamento no estuário, encaixando este domínio num modelo regional da costa portuguesa de forma a melhorar a condição de fronteira do lado do mar e forçando-o com o caudal do rio do lado de terra e com o forçamento atmosférico fornecido por um modelo de circulação atmosférica.

Assim, o modelo operacional para o estuário do Tejo utiliza três níveis de modelos encaixados diferentes. O maior nível cobre praticamente toda a costa oeste portuguesa. Este é forçado pela solução global de maré (FES 95.2 – Le Provost *et al.*, 1998) e vento, e não apresenta discretização vertical – 2D (sem gradientes de densidade - fluxo barotrópico). A sua única função é fornecer as condições de fronteira de oceano aberto para o segundo nível de modelos encaixados.

Os domínios espaciais deste segundo nível cobrem a totalidade do estuário do Tejo, existindo modelos bidimensionais e tridimensionais (com gradientes de densidade) para este nível. No que respeita às condições de fronteira à superfície (interface água-atmosfera), são considerados vento, temperatura, radiação, humidade relativa e fluxos de calor. São também impostas as descargas dos rios e ETAR's. Os valores utilizados para a descarga do rio Sorraia são médios diários, enquanto que os restantes são valores médios anuais dos últimos anos, à excepção do rio Tejo, cuja descarga é introduzida no modelo a partir da informação hidrométrica da estação Ómnias, que disponibiliza a informação dos níveis em tempo real (ver

4 - Implementação do Sistema

4.2.1.3 e 4.2.1.4). Essa informação é diariamente convertida em caudal e funciona como entrada para as condições de fronteira do modelo (a informação da estação hidrométrica de Ómnias é utilizada pelo modelo operacional desde Setembro de 2004, sendo que anteriormente a isso era também utilizada informação média dos anos anteriores). Estes modelos de nível 2 são utilizados com dois objectivos: (i) simular os processos físicos e ecológicos no estuário e (ii) fornecer condições de fronteira para o nível inferior de modelos, o nível 3.

Estes últimos modelos são de escala local, definidos para monitorizar o impacte do emissário submarino da Guia, e estudar problemas de qualidade da água junto às praias. Estes sub-modelos podem ser rapidamente acoplados a qualquer instante, à medida das necessidades. As condições de fronteira à superfície são em tudo iguais às dos modelos do nível superior (à escala do Tejo) (ver Figura 4-14).

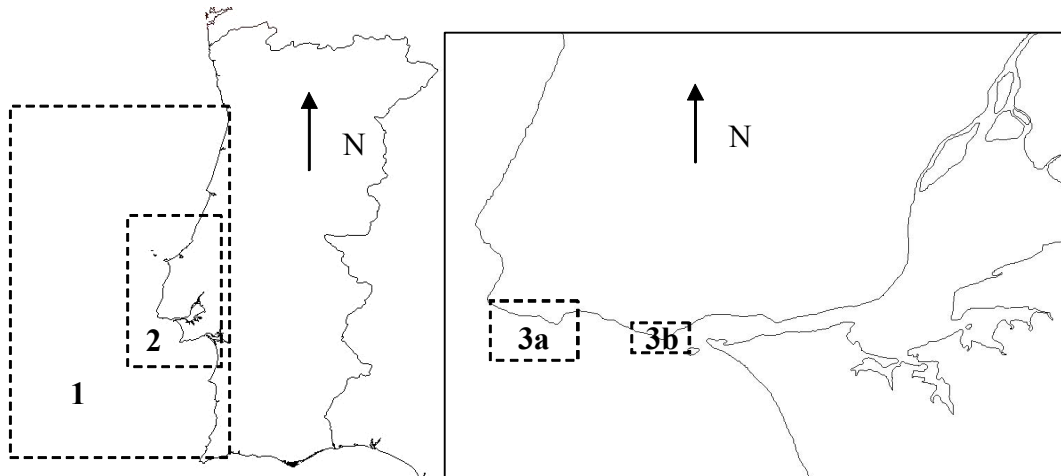


Figura 4-14 - Modelos encaixados em três níveis. Nível 1: modelo de larga escala para a parte da costa oeste portuguesa; Nível 2: modelo de escala regional para o estuário do Tejo; Nível 3: (modelos de escala local) – (a) zona do emissário da Guia, e (b) zona de entre Carcavelos e Paço de Arcos.

O modelo corre diariamente para efectuar previsões de 24 horas, com *outputs* gráficos horários. Embora nesta fase de desenvolvimento tenham existido algumas variações, de uma forma geral tem-se conseguido efectuar previsões para o terceiro dia após do início do cálculo (por exemplo, Segunda-feira o modelo calcula as previsões para Quarta-feira). O tempo de cálculo do conjunto de modelos operacionais (excluindo os modelos locais para Carcavelos - Paço de Arcos) demora cerca de 6 horas sem paralelização de código, e 4 horas com paralelização. Com esta metodologia, que recorre ao protocolo MPI já referido, é possível dispersar as várias malhas de cálculo por processadores diferentes ligados em rede, permitindo uma optimização do tempo de cálculo.

4.3.4 Acoplamento a um modelo atmosférico

O forçamento atmosférico do modelo operacional para o Tejo é conseguido a partir das previsões de um modelo meteorológico. O modelo em questão (<http://meteo.ist.utl.pt>) é um modelo operacional para a costa portuguesa, desenvolvido no Instituto Superior Técnico na Secção de Ambiente e Energia e coordenado pelo prof. Delgado Domingos, que se baseia no modelo MM5. A validade do modelo de previsão do IST deste modelo é comprovada após comparação dos seus resultados com os valores reais registados na estação meteorológica na Guia (ver capítulo 4.3.4.2 mais à frente).

Dada a largura da malha de cálculo deste modelo ($dx = 9$ km) face à dimensão do estuário do Tejo, consideram-se apenas as previsões meteorológicas para um dado ponto no estuário (é um ponto que se situa ao largo da Guia). Portanto, por opção de modelação, não é considerada variabilidade espacial das propriedades atmosféricas no forçamento do modelo operacional para o estuário do Tejo (embora o sistema MOHID permita a interpolação temporal e espacial de previsões atmosféricas para a malha de cálculo, podendo assim utilizar resultados atmosféricos variáveis no espaço e no tempo). A variabilidade temporal é assegurada através de um serviço (*Windows Service* desenvolvido em VB.NET) no servidor central que, via http e com uma frequência horária, descarrega as previsões horárias do modelo atmosférico referido, inserindo esses valores numa base de dados (Access) específica para o efeito. As previsões atmosféricas deste modelo têm um horizonte de tempo de 72 horas, e são actualizadas e corrigidas de 6 em 6 horas, sendo as mesmas correcções também efectuadas nos registos da base de dados. Uma outra aplicação dedicada (VB.NET), é responsável por exportar as previsões atmosféricas existentes na base de dados para uma série temporal em formato ASCII (assimilado pelo MOHID) para o período a ser simulado.

4.3.4.1 Descrição geral do modelo de previsão meteorológica do IST

O modelo de previsão meteorológica do Instituto Superior Técnico foi desenvolvido em 2002, estando operacional desde Janeiro do mesmo ano, com previsões diárias para Portugal Continental.

4 - Implementação do Sistema

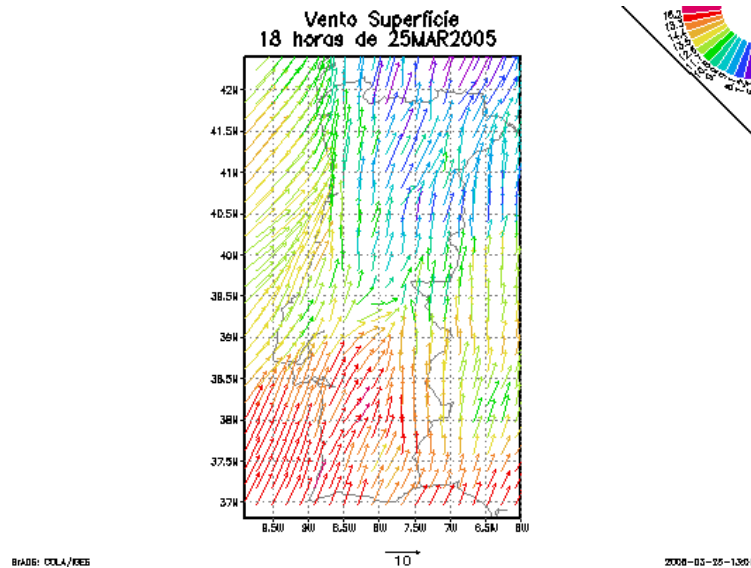


Figura 4-15 - Velocidade do vento às 18 horas no dia 24 de Março de 2003. Estes resultados são produzidos pelo Prof. Delgado Domingos (Departamento de Ambiente do IST) recorrendo ao modelo atmosférico MM5

A implementação deste sistema recorreu ao modelo MM5. Este modelo foi inicialmente desenvolvido em conjunto na *Pennsylvania State University* e pelo *National Center for Atmospheric Research* no final da década de 70, tendo sofrido sucessivos melhoramentos até aos dias de hoje. A adopção deste modelo para aplicação em previsões meteorológicas e como ferramenta de investigação tornou-se comum em várias universidades.

O modelo MM5 é um modelo de mesoscala não-hidrostático com um sistema de coordenadas que segue a topografia, resolvendo as equações de Navier-Stokes em três dimensões, a equação termodinâmica e a equação de conservação da água no sistema de coordenadas sigma (Dudhia *et al.*, 2004). O seu modo de operação é em sistemas operativos UNIX ou LINUX.

O sistema montado funciona assim em tempo real, recorrendo a uma série de informação de base através da internet, que é descarregada e introduzida diariamente no modelo de modo automático. Para tal, é feito o recurso a vários programas desenvolvidos em Fortran que alteram os formatos dos dados para o formato aceite pelo MM5. É utilizada computação paralela de modo a reduzir o tempo de cálculo, e recorre-se a uma filosofia de malhas encaixadas (*nested modelling*), utilizando a troca de informação nos dois sentidos (*two-way nested modelling*), de modo a aproveitar melhor os resultados das malhas mais finas, que são melhores.

O modelo mais pequeno, que inclui toda a costa portuguesa, utiliza uma malha com 70x43 pontos, com passo temporal de 27 segundos e um passo espacial de cerca de 9 km. As previsões são feitas para as 72 horas seguintes ao início do cálculo (Sousa, 2002).

4.3.4.2 Validação do modelo de previsão meteorológica do IST na área de estudo

Aproveitando a informação de base fornecida dentro do sistema operacional, através da estação meteorológica instalada na Guia, é possível comparar os resultados obtidos pelo modelo de previsão meteorológica com esses dados de campo. Essa comparação é efectuada com base nas séries temporais geradas pelo modelo para um ponto ao largo da Guia, as mesmas séries temporais que são utilizadas no forçamento do modelo operacional MOHID. É analisado um período de um ano inteiro de 2004. São assim comparados temperatura, pressão atmosférica, humidade relativa, radiação, precipitação, magnitude e componentes da velocidade do vento. São também apresentados alguns gráficos exemplificativos de variações em períodos de 72 horas, de modo a fornecer uma ideia mais rigorosa da variabilidade temporal à escala dos dias.

- Radiação Solar

O modelo apresenta uma grande proximidade dos dados da estação meteorológica no que respeita à radiação solar, quer no ciclo diário, quer no ciclo anual. Regista-se apenas que o modelo nos meses de verão, apresentou radiações solares máximas superiores às que foram efectivamente medidas pela estação meteorológica.

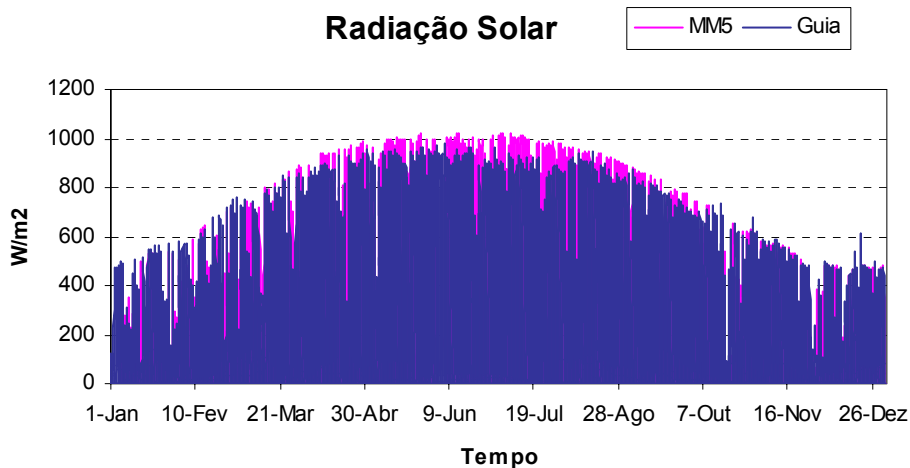


Figura 4-16 - Evolução da radiação solar na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST

4 - Implementação do Sistema

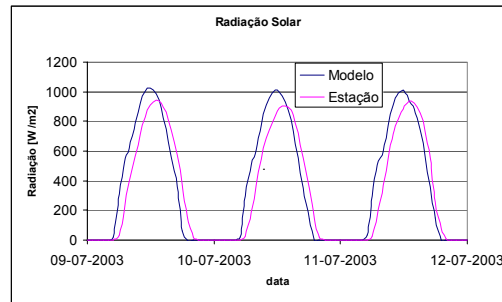


Figura 4-17 - Evolução da radiação solar na zona da Guia para um período de 72 horas, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST

- Pressão atmosférica

As diferenças de pressão de aproximadamente 4 -6 mBar, são explicadas pela diferença de nível entre a estação meteorológica e a superfície do mar. Assim, a estação tem uma elevação de cerca de 30 metros em relação ao nível do mar, pelo que resulta numa pressão medida inferior à que é simulada pelo modelo atmosférico (para o nível do mar).

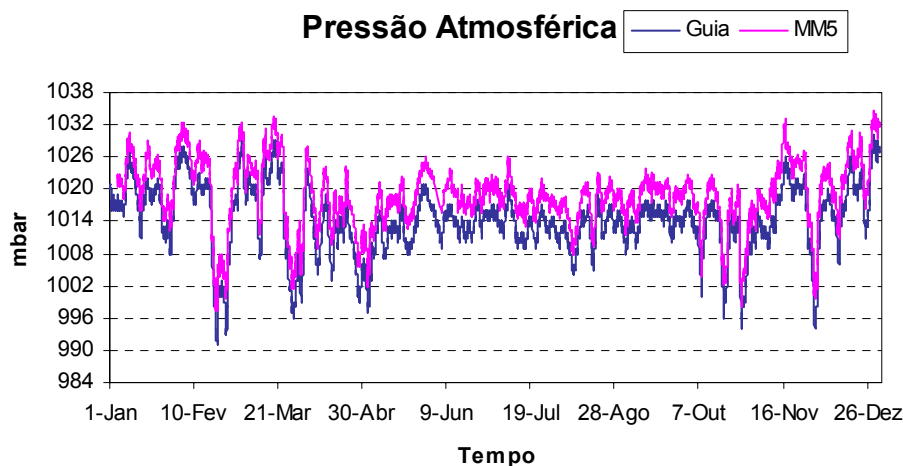


Figura 4-18 - Evolução da pressão atmosférica na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST

- Precipitação

A precipitação é um dos parâmetros mais sensíveis. Na comparação, conclui-se que qualitativamente o modelo consegue simular os episódios de precipitação. Contudo, quantitativamente, observa-se em geral um padrão de subestimação dos valores.

4 - Implementação do Sistema

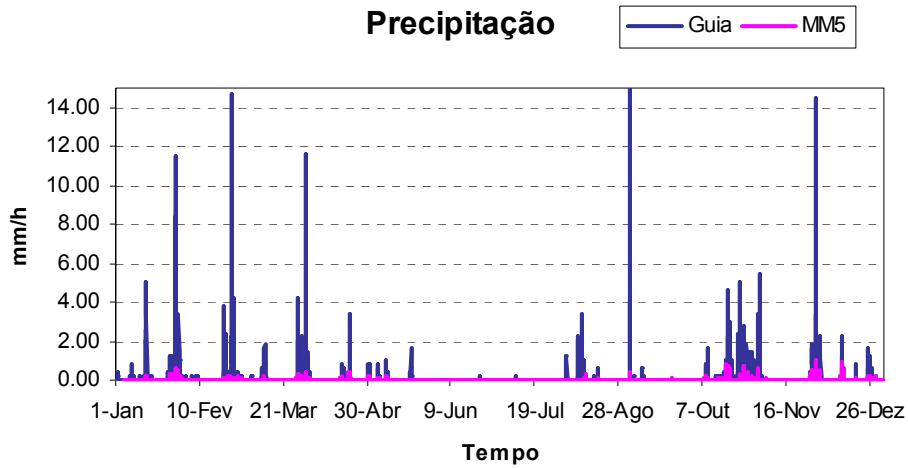


Figura 4-19 - Evolução da precipitação atmosférica na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST

- Vento

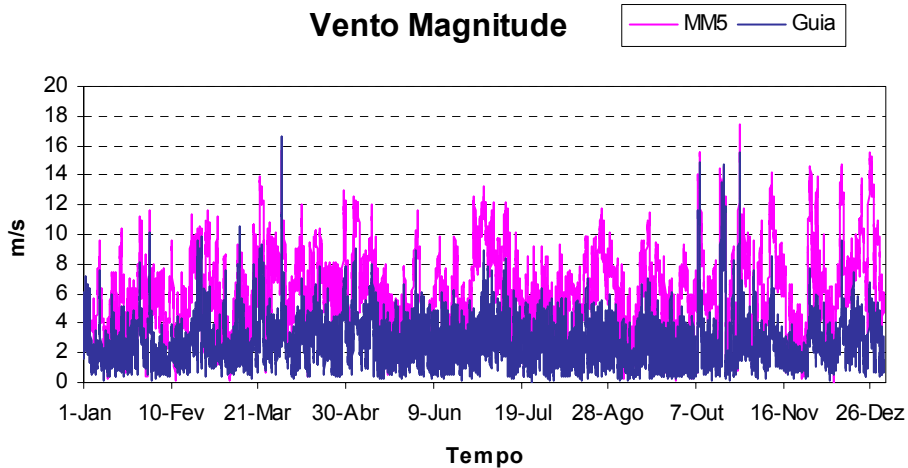


Figura 4-20: Evolução da magnitude do vento na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST

4 - Implementação do Sistema

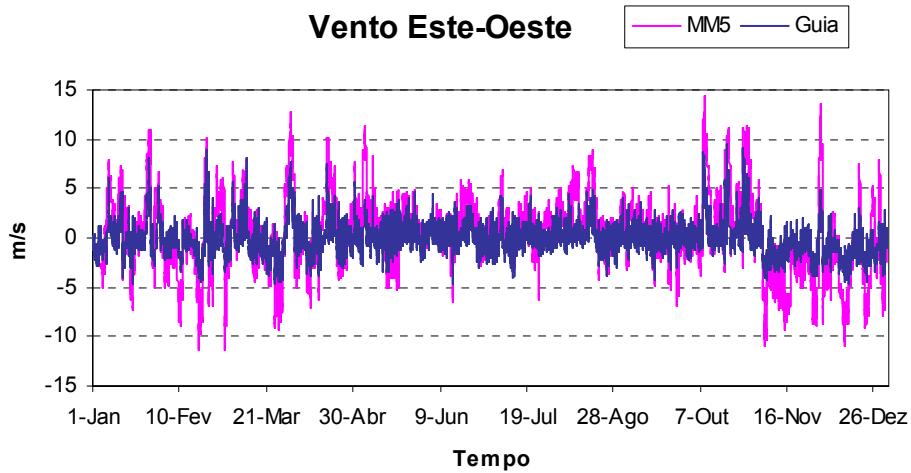


Figura 4-21: Evolução da componente zonal do vento na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST

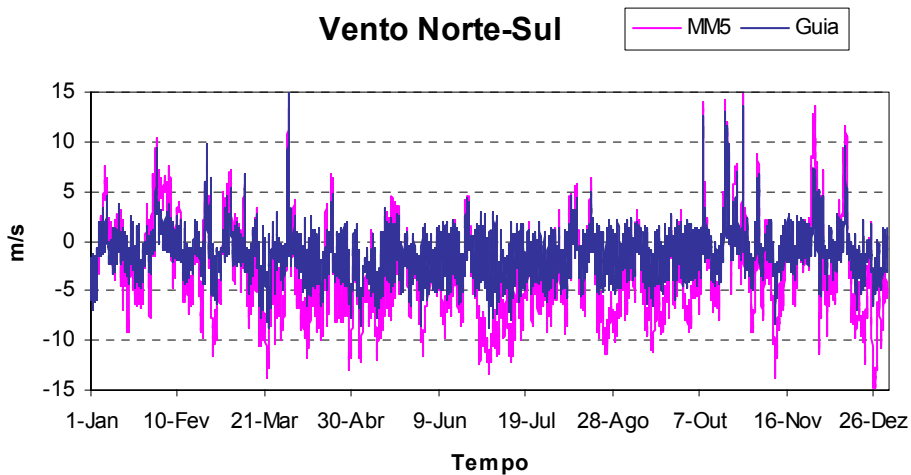


Figura 4-22: Evolução da componente meridional do vento na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST

Frequência do vento por rumo (° do Norte)

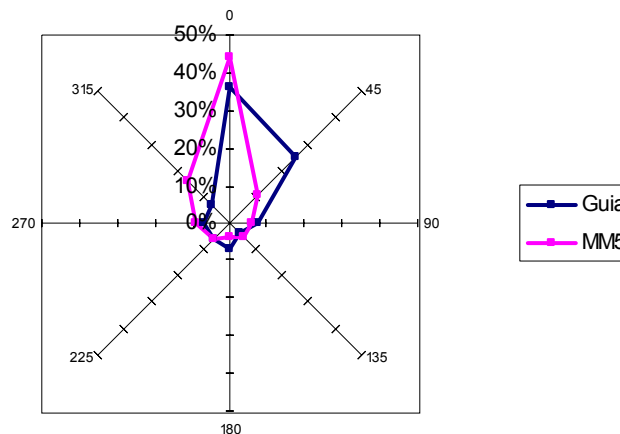


Figura 4-23: Frequência do vento por rumo na zona da Guia em 2004, registada pela estação meteorológica da Guia e simulada pelo modelo atmosférico do IST

Intensidade média do vento (m/s) por direcção (° do Norte)

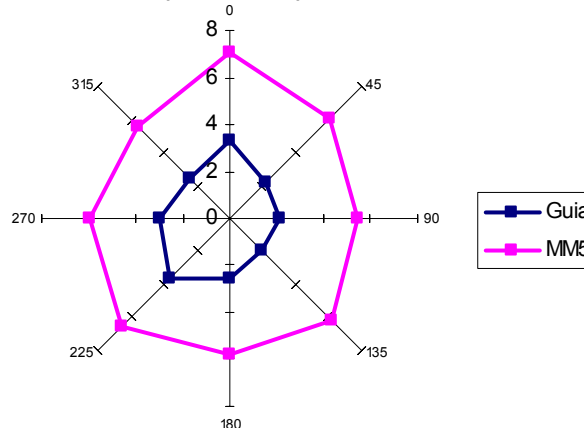


Figura 4-24: Intensidade média do vento por rumo na zona da Guia em 2004, registada pela estação meteorológica da Guia e simulada pelo modelo atmosférico do IST

A análise das diversas figuras anteriores relativas ao vento permite efectuar as seguintes observações:

1. À primeira vista, o modelo parece reflectir tendencialmente o comportamento do vento. Isso é visível pela evolução no tempo na Figura 4-21 e Figura 4-22, e pela análise da distribuição de frequências da Figura 4-23.
2. Uma análise mais cuidadosa mostra que a simulação da direcção e da frequência do vento é melhor quando o mesmo sopra entre os 90 e os 270 graus (Este, Sul e Oeste) (ver Figura 4-24), isto é, quando a componente

4 - Implementação do Sistema

meridional é positiva, ou nula (Figura 4-22). No entanto, quando a componente meridional é negativa, a comparação das frequências medidas e as frequências simuladas mostra uma maior discrepância de valores, isto é, quando o vento sopra entre os 270 e os 90 graus (Figura 4-24). Aliás, é bem visível que a componente meridional apresenta importantes diferenças quando os valores medidos são negativos (Figura 4-22).

3. A Figura 4-20 e de uma forma mais clara, a Figura 4-24, demonstram uma relevante diferença nas magnitudes medidas e simuladas, sendo os valores simulados muito superiores aos medidos.
4. Na Figura 4-23, parece existir uma deslocação do vento simulado no sentido anti-horário, em relação ao que é medido.

Por um lado, pode-se explicar os valores mais baixos registados na estação com base na maior protecção devida à proximidade de obstáculos na zona da estação meteorológica, por outro lado, a própria resolução do modelo também pode estar a resultar numa sobreavaliação dos valores do vento. Ou seja, uma vez que a malha apresenta um passo espacial de 9 km, esta não tem em conta o efeito específico da topografia da serra de Sintra. Esta, situada a Norte da costa do Estoril tende a condicionar o campo de ventos quando a componente meridional é predominantemente negativa, provocando a serra um efeito de amortecimento, não contabilizado pelo modelo atmosférico, e assim, prevendo ventos mais fortes nestes casos. Ainda outro factor que pode ter alguma importância, é o facto de a comparação não ser feita exactamente no mesmo ponto: como foi já referido, os resultados do modelo são para um ponto ao largo da Guia, enquanto a estação está em terra.

Um teste para verificar a hipótese proposta relativamente à serra de Sintra, é filtrar os valores apenas para quando a componente meridional é nula ou positiva (altura em que a serra não influencia o vento), e verificar as melhorias nas comparações:

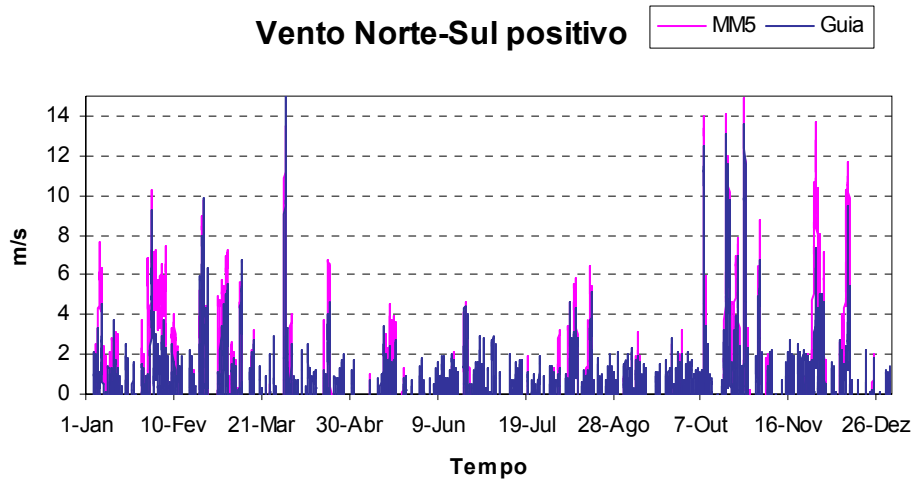


Figura 4-25: Evolução da componente meridional do vento (filtrada para valores positivos) na zona da Guia em 2004, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST

Na figura anterior é possível ver que de facto os resultados são claramente bons quando a componente meridional não é negativa. Conclui-se daqui que o efeito de amortecimento da serra de Sintra tem particular importância neste sistema.

- Temperatura

A observação das duas figuras seguintes (Figura 4-26 e Figura 4-27) permitem verificar que o modelo não descreve a amplitude térmica verificada num ciclo diário registado pela estação, apesar de o modelo tender claramente para a média diária da temperatura. Esta situação verifica-se devido ao facto de o modelo estar a simular as propriedades num ponto acima do mar, enquanto a estação meteorológica está em terra. Será normal que na realidade a temperatura em terra seja mais variável, e para além disso, o modelo considera a temperatura da superfície do mar constante durante o período de simulação (72 horas), resultando assim em temperaturas do ar com menor variabilidade que as reais.

4 - Implementação do Sistema

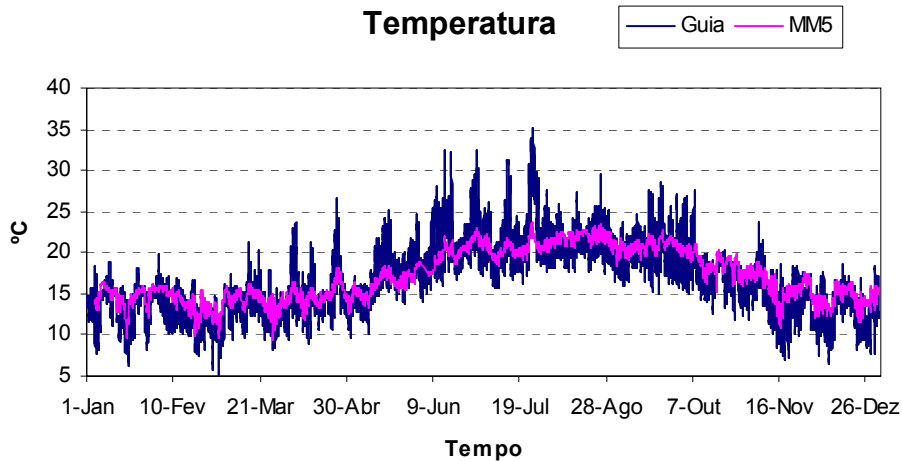


Figura 4-26 - Evolução da temperatura na zona da Guia, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST

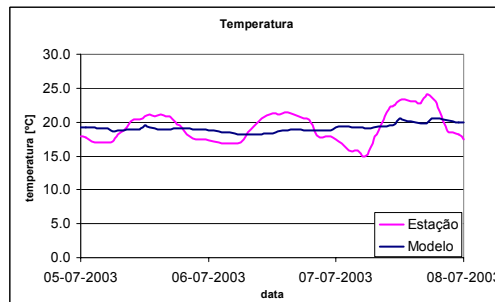


Figura 4-27 - Evolução da temperatura na zona da Guia para um período de 72 horas, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST

- Humidade relativa

O comportamento da humidade relativa é em tudo idêntico ao da temperatura, como se pode ver nas próximas figuras, verificando-se também uma menor variabilidade nos valores determinados pelo modelo. De facto existe uma correlação inversa entre a temperatura e a humidade relativa, uma vez que para uma dada quantidade efectiva de vapor de água na atmosfera, uma temperatura sobrestimada corresponde a uma humidade relativa subestimada, e vice-versa. Outra correlação existente é entre o vento e a humidade relativa. O modelo prevê ventos sobrestimados, e deslocados no sentido anti-horário. O facto do vento predominante na zona da Guia no período de Verão ser de Norte / Noroeste, implica que o erro do modelo resulte numa maior advecção de ar húmido, resultando assim numa sobrestimação de humidade relativa nestes períodos.

4 - Implementação do Sistema

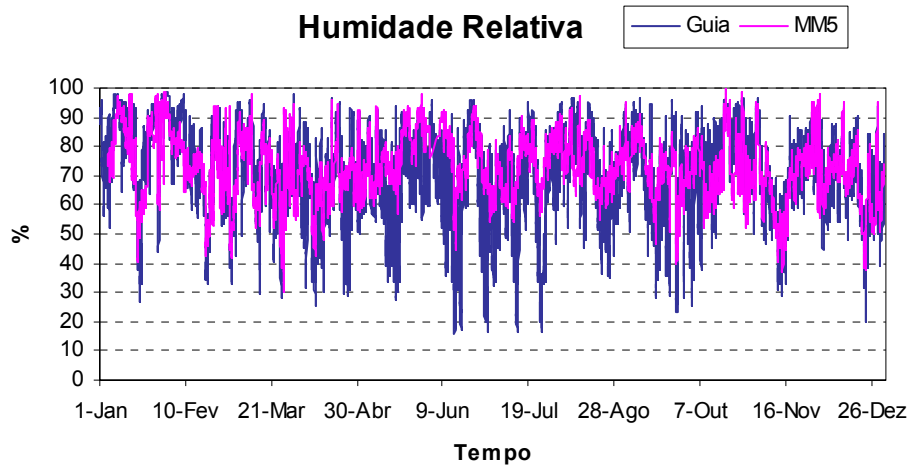


Figura 4-28 - Evolução da humidade relativa na zona da Guia, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST

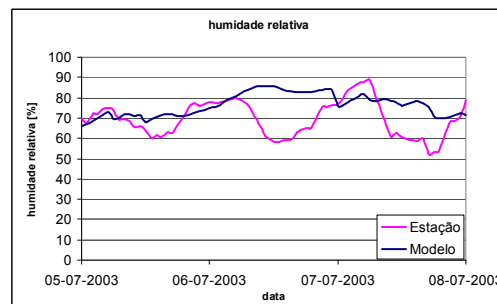


Figura 4-29 - Evolução da humidade relativa na zona da Guia para um período de 72 horas, registada na estação meteorológica, e simulada pelo modelo atmosférico do IST

A avaliação dos diferentes parâmetros permite concluir que o modelo está validado para a zona de estudo. Seria contudo benéfico que o mesmo usasse uma malha de cálculo com maior resolução (principalmente para contabilizar o efeito da serra de Sintra, mas também para considerar outros efeitos de pequena escala, e conceder maior variabilidade espacial aos resultados), e que existissem condições de fronteira variáveis na temperatura da superfície do mar, de forma a melhorar os resultados da temperatura naquela zona.

5. RESULTADOS

5.1 Publicação / Acesso aos produtos do sistema operacional

A informação gerida pelo sistema operacional pode ser explorada pelo utilizador final através da Internet, no sítio com o endereço *www.mohid.com/tejo-op*.

Através desta interface, é possível de uma forma simples, explorar os diversos produtos do sistema, onde são disponibilizados resultados da modelação numérica (previsões), assim como as medidas das diversas fontes. Existe ainda uma ligação para as previsões atmosféricas do modelo atmosférico do IST já referido (*http://meteo.ist.utl.pt*).

A interface do sistema de modelação operacional do estuário do Tejo foi desenvolvido em HTML– *HyperText Markup Language*, e ASP, desenvolvido pela Microsoft, com algumas funções de *JavaScript*. ASP (Active Server Pages - Páginas de Servidor Activas) é um ambiente de programação por *scripts* no servidor, que se pode usar para criar páginas dinâmicas e interactivas. Neste tipo de linguagem, os *scripts* correm no servidor e não no cliente. É o próprio servidor que transforma os *scripts* em HTML padrão, fazendo com que qualquer browser seja capaz de aceder ao sítio, mas preservando sempre o código-fonte. Permite o acesso a base de dados, informações do servidor e a programação em VBScript ou JavaScript.

5.1.1 Estações automáticas

A totalidade dos dados medidos pelas estações automáticas pode ser acedida, sendo disponibilizadas medições com um desfazamento máximo da hora de medida de 24 horas. O utilizador pode escolher o intervalo de tempo que pretende visualizar num gráfico e/ou exportar os dados em formato Excel (Figura 5-1).

5 - Resultados

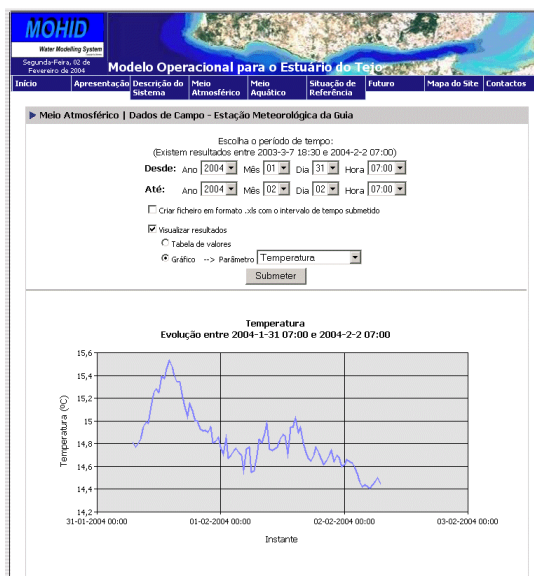


Figura 5-1 – Resultados na Internet: Gráfico com temperatura medida pela estação meteorológica

5.1.2 Campanhas de monitorização

Também informação sobre qualidade da água (nomeadamente o histórico de campanhas de monitorização efectuadas no estuário do Tejo no âmbito do projecto Costa do Estoril / SANEST) pode ser acedida através deste sítio, sendo esta informação visualizada através de uma ferramenta de informação geográfica (*WebGIS*), utilizando a tecnologia *MapServer*. Assim, através do acoplamento do *MapServer* às potencialidades associadas ao ASP, este sistema permite não só visualizar através da *WEB* as localizações geográficas dos dados que estão referenciados na base de dados como também fazer pesquisas e aplicar filtros sobre os registos existentes.

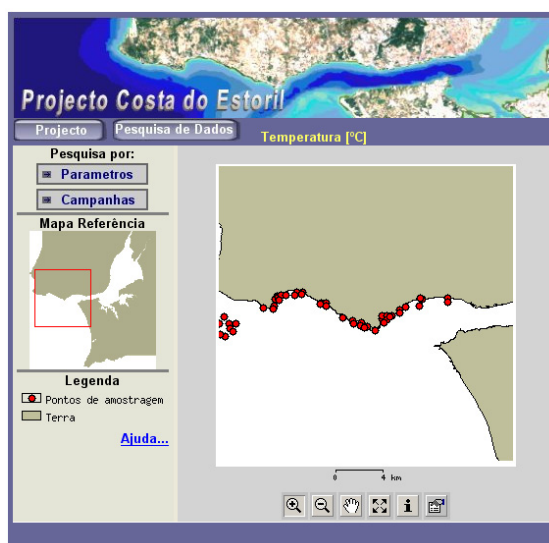


Tabela 5-1 - Sistema de informação geográfica desenvolvido para gestão e pesquisa dos dados armazenados

5.1.3 Modelação

As previsões para o estuário do Tejo são incluídas no sistema através do acesso aos resultados do modelo numérico MOHID, que podem ser visualizados na forma de séries temporais ou de mapas. Estes últimos têm uma variabilidade horária e o utilizador apenas tem que especificar a data, a hora e o parâmetro que pretende visualizar. Sob a forma de mapas, são disponibilizados vários tipos de informação, consoante o mapa pretendido (Tabela 5-2 e Figura 5-2).

Mapa	Propriedade	Profundidade (m)	Discretização Vertical
Estuário do Tejo	Salinidade + Correntes	0	3D
	Oxigénio Dissolvido	Coluna de água	2D
	Clorofila a	Coluna de água	2D
	Nitratos	Coluna de água	2D
	Sedimentos Coesivos	Coluna de água	2D
Zona da Guia	Coliformes Fecais + Correntes	0 e 5	3D
Zona do Canal	Salinidade + Correntes	0	3D

Tabela 5-2 - Propriedades simuladas pelo modelo operacional que são divulgadas sob a forma de mapas

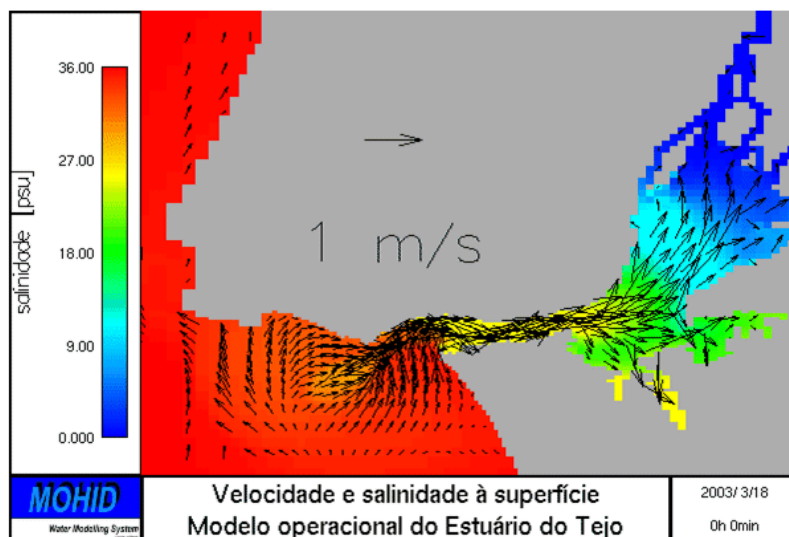


Figura 5-2 - Resultado do modelo para o dia 18 de Março de 2003. A figura representa a salinidade e velocidades à superfície

Sob a forma de séries temporais, são disponibilizados apenas resultados diários do nível em diversos pontos do estuário, e especificamente de alguns parâmetros para o local onde se encontra a estação automática de qualidade da água, de modo a comparar os dados com o modelo.

A filosofia passa por permitir ao utilizador efectuar uma validação dinâmica do modelo com os dados de campo. O utilizador, depois de escolher a série, apenas tem que escolher o período que pretende visualizar. No que respeita aos níveis de maré, a informação gerada pelo modelo

é comparada com os níveis estimados empiricamente a partir de componentes harmónicas, fornecidas pelo Instituto Hidrográfico. Os níveis do modelo são comparados em 14 pontos (ver Figura 5-3).

O modelo operacional está preparado para, de uma forma escalável, publicar séries temporais para mais pontos e mais propriedades na página de Internet, uma vez que foi desenvolvida uma base de dados preparada para armazenar resultados do modelo para pontos específicos, servindo de base à interface de publicação desses mesmos resultados.

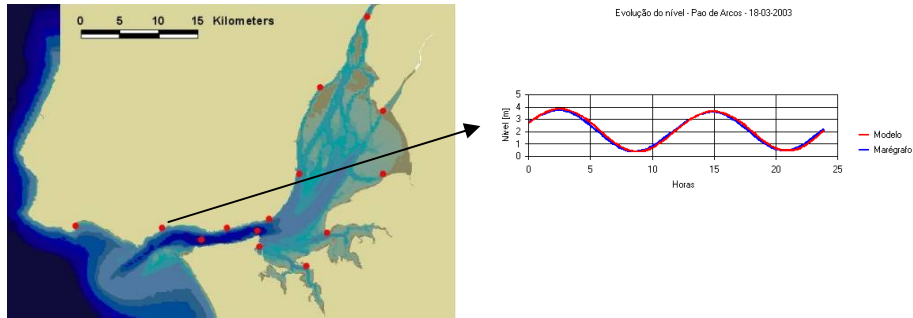


Figura 5-3 – Pontos de validação da evolução do nível da água simulado pelo modelo

5.2 Análise e Discussão de Resultados

O modelo operacional gera diariamente novos resultados, que devem ser avaliados e comparados com as medidas de campo, quer por estações automáticas, quer por campanhas dedicadas.

Neste capítulo é feita uma descrição e análise de alguns resultados relevantes, produzidos pelo modelo operacional.

O sistema operacional desenvolvido para o estuário do Tejo está em operação desde o segundo trimestre de 2003, estando desde o mesmo período, em sucessiva correcção, melhoramento e expansão das suas potencialidades e da sua operacionalidade ao longo do tempo.

5.2.1 Hidrodinâmica

5.2.1.1 Níveis

Os resultados são bastante positivos nas zonas onde a topografia do terreno é melhor conhecida, e onde a malha de cálculo é mais fina, como é o caso da Costa do Estoril. Contudo, na zona interior do estuário, devido aos factos referidos, os resultados apresentam um maior desfasamento (ver Figura 5-4)

5 - Resultados

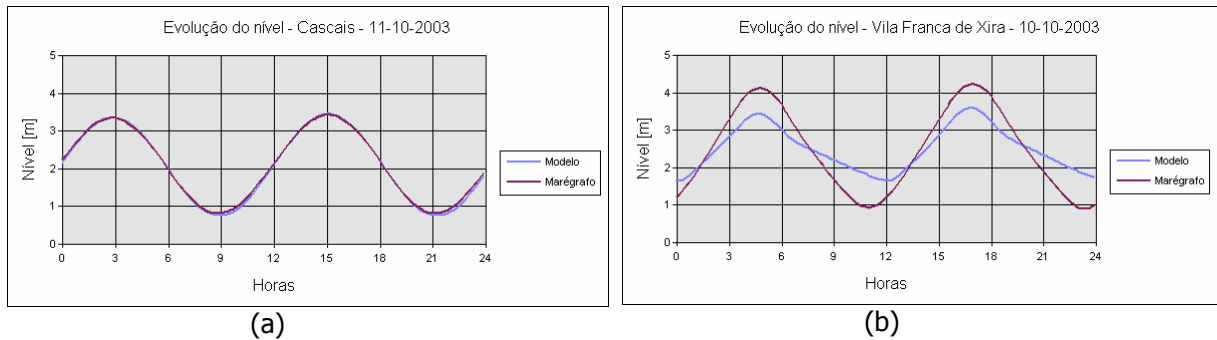


Figura 5-4 – comparação das componentes harmónicas obtidas do IH com os resultados do modelo operacional em (a) Cascais e (b) Vila Franca de Xira

Foi efectuada uma análise estatística no sentido de quantificar e perceber melhor o desempenho do modelo em diferentes pontos da malha do estuário do Tejo (16 pontos diferentes) no que respeita ao nível de maré. Para tal, comparou-se os resultados do modelo operacional com os resultados de níveis de maré determinados por um programa (*TidePrev*) que se baseia nas componentes harmónicas de maré, estas obtidas a partir de resultados históricos de marégrafos. A comparação foi efectuada apenas para 45 dias de resultados, no entanto é utilizado o programa informático T_Tide (Pawlowicz *et al.* 2002), que é desenvolvido em ambiente MatLab. Este programa permite uma análise harmónica da maré, pelo que deste modo, foi possível filtrar as componentes de baixa frequência (não incluídas numa simulação de 45 dias) de modo a obter melhores resultados.

O período analisado foi entre 15-10-2004 e 28-11-2004 (45 dias). Os pontos analisados foram: Alcochete, Alfeite, Cabo Ruivo, Cacilhas, Cascais, Lisboa, Montijo, Paço de Arcos, Pedrouços, Peniche, Ponta da Erva, Póvoa de Santa Iria, Seixal, Sesimbra, Trafaria e Vila Franca de Xira.

Os parâmetros estatísticos analisados são o enviesamento (Bias), a raiz do erro quadrático médio (QEQM ou RMSE), o coeficiente de correlação e o desvio padrão.

O enviesamento permite perceber se o modelo está a sobrestimar ou subestimar alguns valores.

5 - Resultados

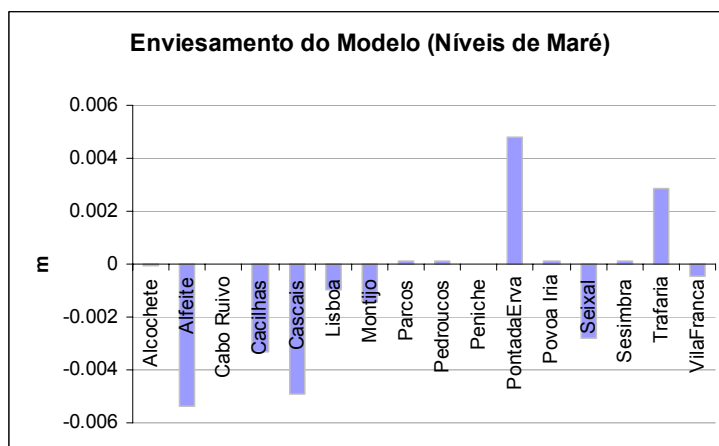


Figura 5-5: Enviesamento do Modelo para os níveis de maré

É visível que nos pontos com maior afastamento dos valores empíricos, em termos médios, o modelo tende a subestimar os níveis, à excepção da Ponta da Erva e da Trafaria.

Quanto ao coeficiente de correlação, esta propriedade descreve a “força” da associação entre os valores do modelo e os valores empíricos, isto é, obtidos a partir das componentes harmónicas, sendo que é no fundo uma medida estatística da resposta do modelo à variabilidade dos dados das componentes harmónicas.

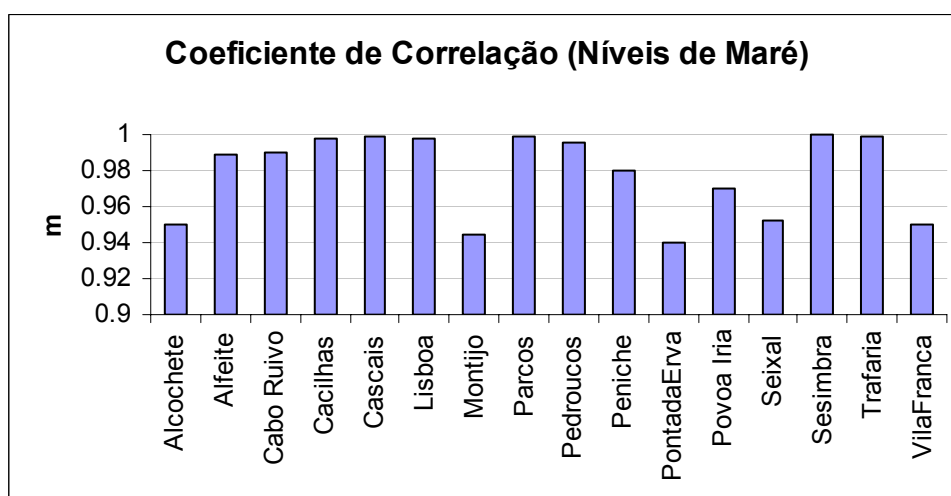


Figura 5-6: Coeficiente de Correlação para os níveis de maré

Estes resultados mostram que o modelo tem mais dificuldade em reproduzir a variabilidade associada aos locais Alcochete, Montijo, Ponta da Erva, Seixal e Vila Franca. O padrão é claro: o modelo tem mais dificuldade nas zonas de menor profundidade, e / ou em zonas inseridas em canais.

Outra razão poderia ser o facto de a resolução espacial ser menor nas zonas mais interiores do estuário. Contudo, à partida essa hipótese parece não fazer sentido, na medida em que a resolução do modelo nas zonas de Alcochete e Ponta da Erva, por exemplo, é semelhante à

resolução espacial em Cabo Ruivo, local este em que a correlação é bastante superior às anteriores.

Ainda outra propriedade é a raiz do erro quadrático médio. Esta é uma das propriedades estatísticas mais utilizadas na determinação de desempenhos de modelos de previsão, fornecendo esta propriedade uma informação estatística da distância média entre as duas variáveis. De seguida é apresentado um gráfico com a raiz do erro quadrático médio, assim como o desvio-padrão associado ao nível determinado pelo *TidePrev*. A apresentação conjunta destas duas propriedades está relacionada com o facto de que por definição, as zonas com maior variabilidade inerente têm uma tendência de apresentar valores superiores para a raiz do erro quadrático médio.

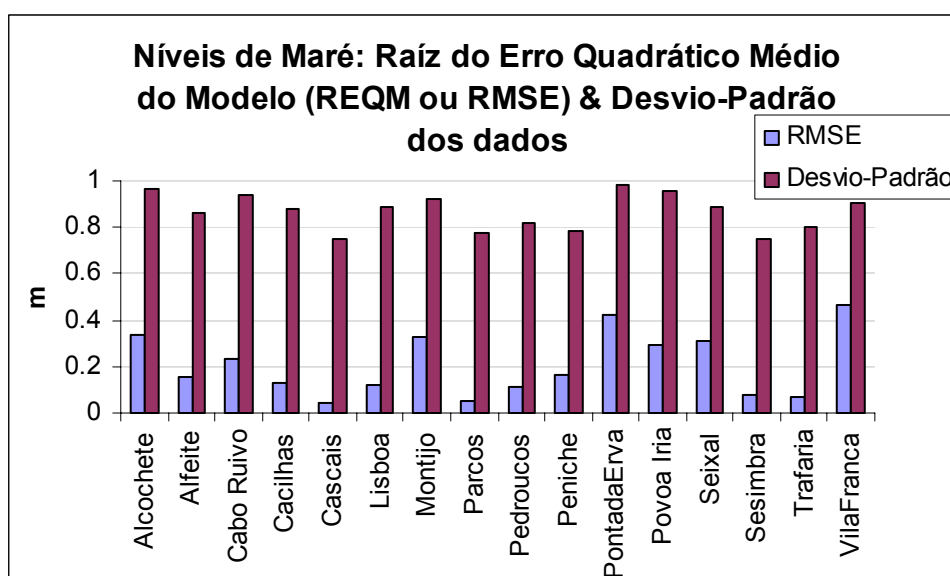


Figura 5-7: Raiz do erro quadrático médio (RMSE) do modelo e desvio padrão dos valores empíricos para os níveis de maré

De facto, pela figura anterior é possível constatar que os locais com maior variabilidade (maiores desvios-padrão) no nível de maré (em geral, são as zonas menos profundas) são aquelas que apresentam um RMSE mais elevado. Veja-se o caso de Cabo Ruivo, que apresenta um elevado coeficiente de correlação, mas possui elevada variabilidade e um RMSE significativo. Contudo, é possível verificar que zonas como o Seixal, Montijo e Vila Franca apresentam desvios-padrão mais baixos que Póvoa de Santa Iria, ou Alcochete, mas conseguem apresentar maiores valores para a raiz do erro quadrático médio. Depreende-se assim que as zonas mais críticas na previsão do modelo sejam efectivamente o Seixal, Montijo e Vila Franca por se encontrarem em canais, enquanto que as previsões de maré em locais como Póvoa de Santa Iria, Alcochete e mesmo Ponta da Erva apresentem menores desempenhos estatísticos, devido à maior variabilidade local inerente a zonas muito pouco profundas.

Embora à partida se tenha afirmado que a pior resolução do modelo na zona interior no estuário não estaria a ser o factor decisivo no pior desempenho do modelo nesses locais, a verdade é que a existência de uma malha muito fina que resolvesse espacialmente os problemas associados à simulação de circulação em canais, poderia melhorar significativamente o desempenho do modelo. Este processo poderia ser atingindo recorrendo a uma malha curvilínea, de resolução espacial superior nas zonas dos canais.

5.2.1.2 Correntes

5.2.1.2.1 Comparação com bóia de Paço de Arcos

Existem dados adquiridos por este sistema de aquisição entre 28 de Julho e 25 de Setembro de 2003. As ausências de dados ocorreram devido a diversos factores, e em algumas ocasiões o equipamento deixou de responder sendo necessário trazer o equipamento para terra. Também por diversas vezes o equipamento foi retirado para manutenção e calibração. As lacunas pontuais nos dados podem ficar a dever-se a uma dificuldade do datalogger de executar todas as rotinas nos intervalos de tempo definidos o que resulta em falhas esporádicas (Lino e Anjos, 2003).

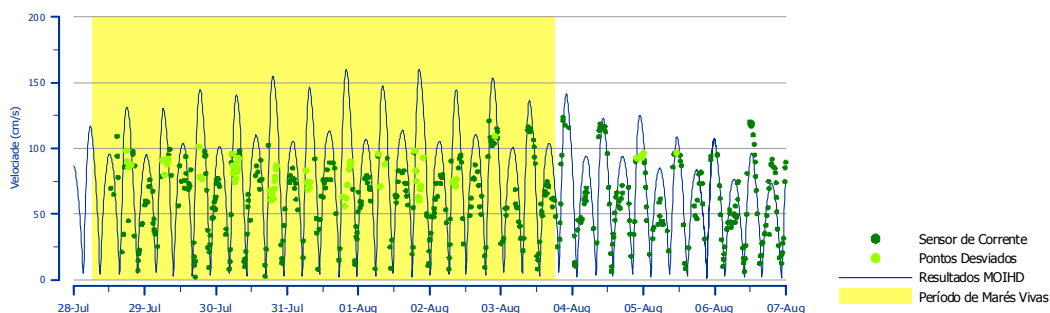


Figura 5-8 – Dados do sensor de corrente e resultados do modelo (intensidade da corrente)

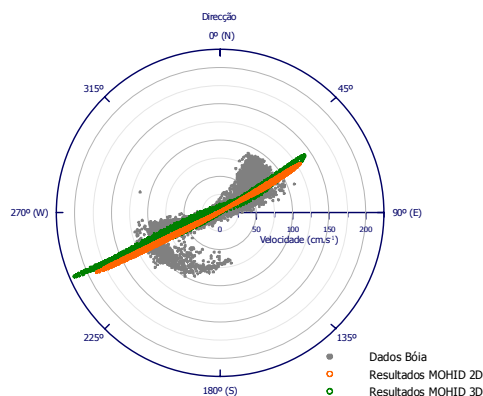


Figura 5-9 - Dados do sensor de corrente e resultados do modelo (intensidade e direcção da corrente)

O sensor de corrente teve uma má resposta às condições de funcionamento do sistema, já que a inclinação do sensor implicou grandes desvios nas leituras em situações de elevada

velocidade, que coincidiam sobretudo com algumas velocidades de vazante mais fortes. Assim, não é possível verificar se as velocidades máximas calculadas pelo modelo correspondem à realidade (Lino e Anjos, 2003).

Porém, apesar das irregularidades e lacunas nos dados do sensor de corrente é possível observar que qualitativamente o modelo apresenta uma aproximação bastante aceitável. As direcções principais de enchente e vazante são bastante coincidentes com as observadas no local (Figura 5-9). As intensidades também se aproximam bastante aceitáveis considerando apenas os pontos em que não há desvios das leituras do sensor de corrente. Na Figura 5-8 observa-se uma grande harmonia entre os resultados do MOHID e as observações abaixo dos 100 cm/s. As enchentes e vazantes acontecem sempre em simultâneo nos dois casos.

5.2.1.2.2 Comparação com ADCP

Uma vez que esteve fundeado durante o ano de 2003 um ADCP (propriedade da SANEST) perto do emissário da Guia, é possível efectuar comparações entre o modelo e os valores medidos pelo perfilador acústico. O ADCP utilizado é um *Workhorse Sentinel* de frequência de 600 KHz, da *RD Instruments*. Este ADCP foi retirado do fundo mensalmente, para operações de manutenção.

Os resultados medidos são apresentados com discretizações verticais de um metro para toda a coluna de água, sendo que o aparelho é fundeado a 0.5 metros do fundo. A célula medida mais à superfície é retirada da análise de resultados, uma vez que a superfície do mar é considerada uma "superfície de reflexão difícil", de acordo com Emery e Thmopson (2001), apresentando geralmente valores pouco aceitáveis.

As profundidades são determinadas com base nas características do fundeamento do ADCP, e da batimetria do próprio local, de acordo com a batimetria utilizada no modelo operacional.

Uma vez que o modelo operacional integra a coluna de água com uma discretização diferente do ADCP, é necessário também integrar a informação do ADCP para as camadas utilizadas no modelo operacional. Por exemplo, a 4ª camada do modelo integra a informação entre os 10 e os 20 metros em relação ao zero hidrográfico (profundidade média é de 15 metros), logo a comparação com o ADCP para esta camada é efectuada calculando a média dos resultados do ADCP entre os 10 e os 20 metros de profundidade.

Na próxima tabela (Tabela 5-3) são mostrados os períodos de fundeamento analisados, e respectiva localização. São efectuadas comparações dos resultados do modelo operacional com os dados do ADCP para o fundeamento a 24 de Outubro, altura em que os resultados do modelo eram já mais estáveis, devido à melhoria na imposição de condições de fronteira, como fluxos de calor ou caudais do Tejo.

5 - Resultados

Data de Fundeamento	Data de Recuperação	Latitude (WGS-84)	Longitude (WGS-84)
24-10-2003	25-11-2003	38°41.00' N	009° 28.03' W

Tabela 5-3: Posições e períodos de fundeamento do ADCP da SANEST na zona do emissário da Guia

De um modo geral, o modelo reproduz as velocidades instantâneas medidas (ver Figura 5-10), a qualquer profundidade. Para além disso, o modelo tende para a média do escoamento.

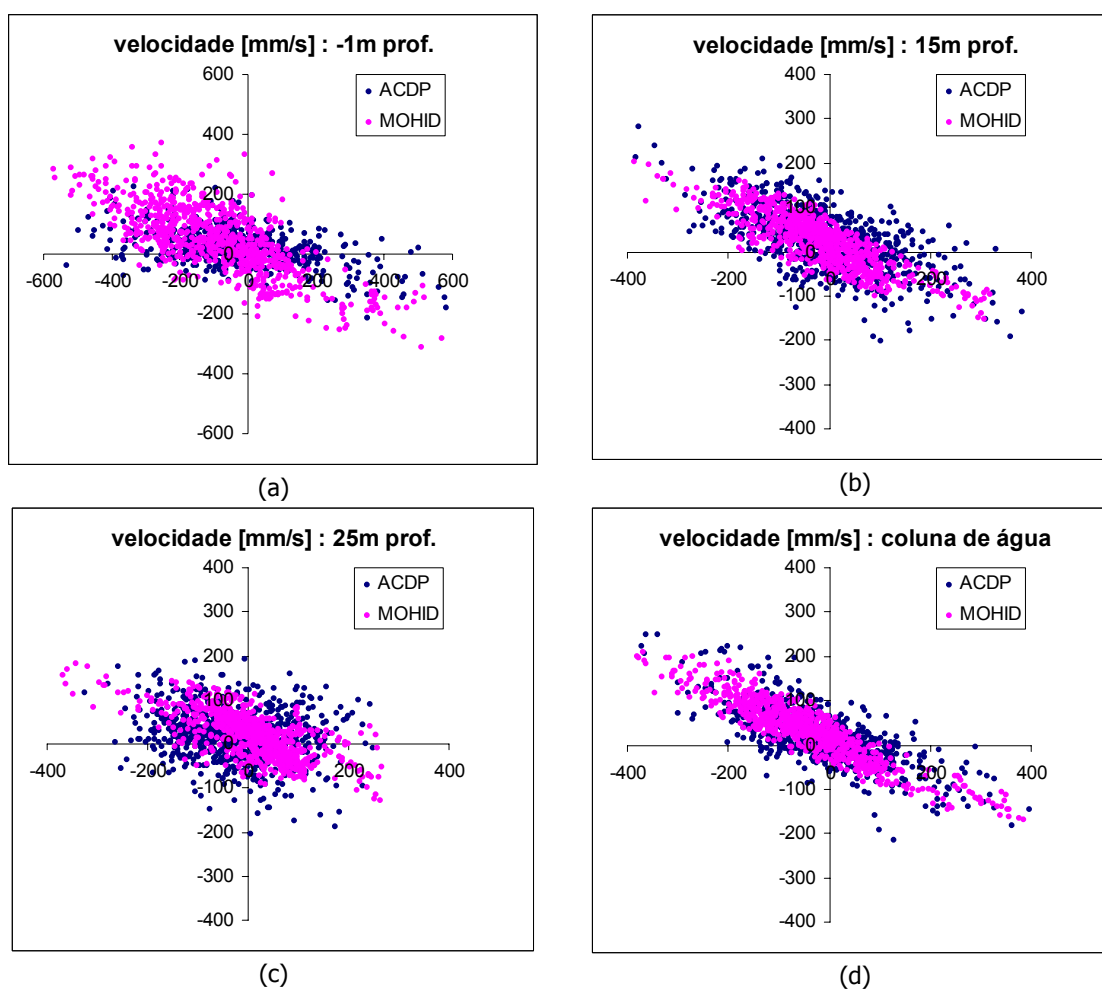


Figura 5-10 - Diagramas de dispersão a diferentes profundidades das medidas de velocidades das correntes com o ADCP ao longo do período de 24 de Outubro e 25 de Novembro de 2003.

(a) 0m; (b) 15m; (c) 25m; (d) média na coluna de água

Quanto às velocidades residuais, as medidas são, de um modo geral, bem reproduzidas pelo modelo (ver Figura 5-11). As diferenças entre o modelo e o ADCP no perfil de velocidades residuais pode ter diferentes causas:

- Efeitos de larga escala que não são tidos em conta com a presente configuração espacial do modelo operacional;

5 - Resultados

- Variabilidade espacial e temporal induzida pela topografia junto à costa cujo modelo atmosférico não é capaz de reproduzir dado o passo espacial de 9 km;
- Difusão numérica associada à pobre discretização vertical: a utilização de uma discretização vertical de apenas 5 camadas à profundidade do ponto analisado (30 metros de profundidade) reduz as hipóteses de obter uma variabilidade vertical mais detalhada para a zona de estudo, tal como é ilustrado pelas medições do ADCP.

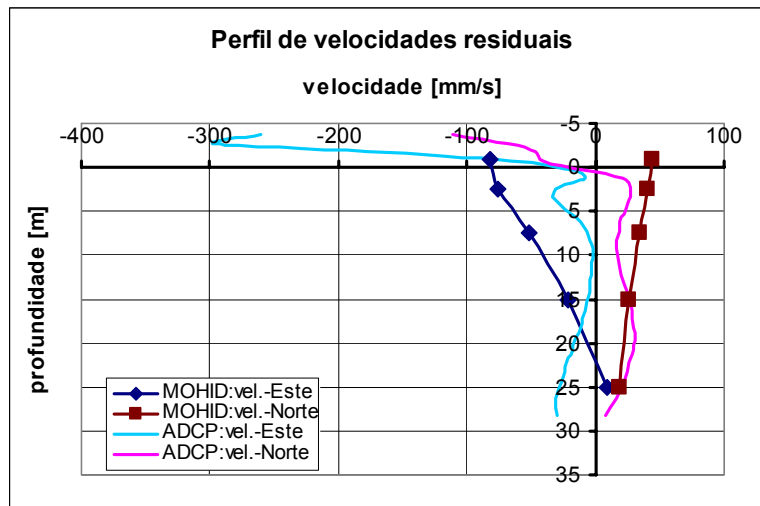


Figura 5-11 - Perfil de velocidades residuais das correntes medidas pelo ADCP e simuladas pelo modelo operacional MOHID, entre 24 de Outubro e 25 de Novembro de 2003

A observação dos gráficos para comparação de um período de 48 horas (Figura 5-12) permite ainda avaliar a capacidade de resposta do modelo à variabilidade temporal a diferentes profundidades. Consta-se que o comportamento do modelo reproduz tendencialmente o comportamento instantâneo do escoamento, tanto à superfície, como no fundo. É ainda possível observar a importância e influência do efeito do vento na variação do escoamento à superfície.

5 - Resultados

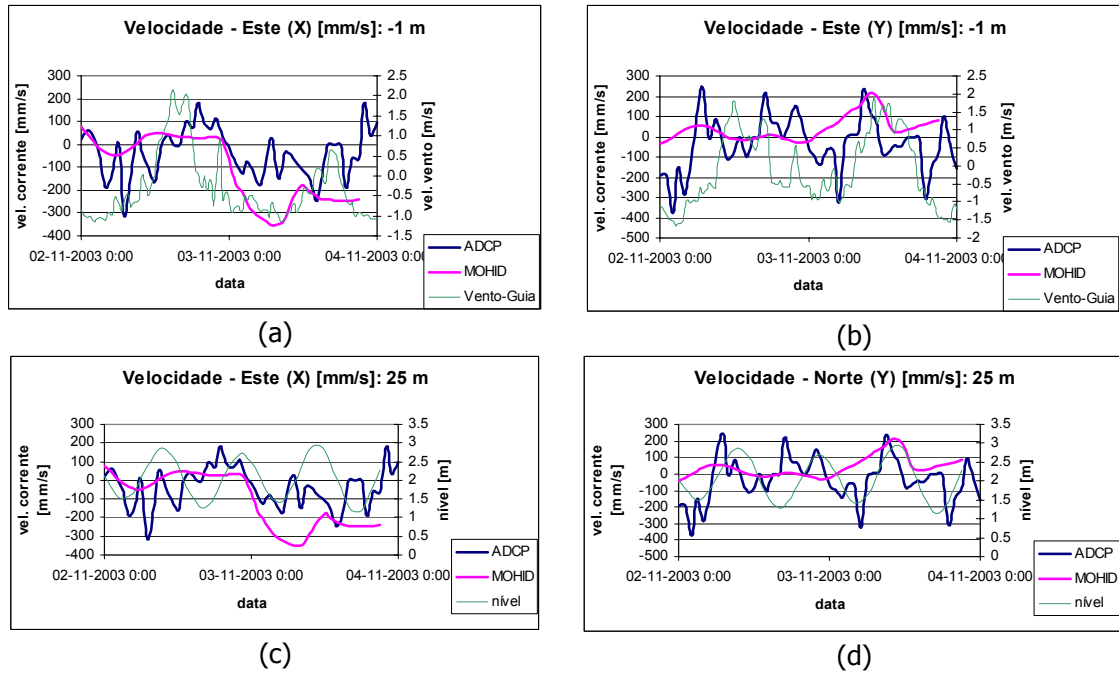


Figura 5-12 - Velocidades à superfície das correntes medidas pelo ADCP e simuladas pelo MOHID, e velocidade do vento, entre 2 e 4 de Novembro de 2003. (a) velocidade-Este perto da superfície; (b) velocidade – Norte perto da superfície; (c) velocidade-Este perto do fundo; (d) velocidade – Norte perto do fundo

Para além da análise da reprodução dos principais padrões, demonstrada pelo perfil de velocidades residuais e os diagramas de dispersão, procedeu-se ainda a uma análise estatística, no sentido de quantificar o desempenho do modelo relativamente às velocidades medidas na zona da embocadura do estuário. O período analisado é o mesmo (24 de Outubro e 25 de Novembro). Também aqui a informação medida pelo ADCP (com uma discretização vertical de 1 metro) foi integrada para cada uma das 5 camadas correspondentes do modelo na área de estudo. O teste é feito separadamente para as componentes meridional (Norte-Sul) e zonal (Este-Oeste), para cada camada vertical do modelo, e também para a média na coluna de água.

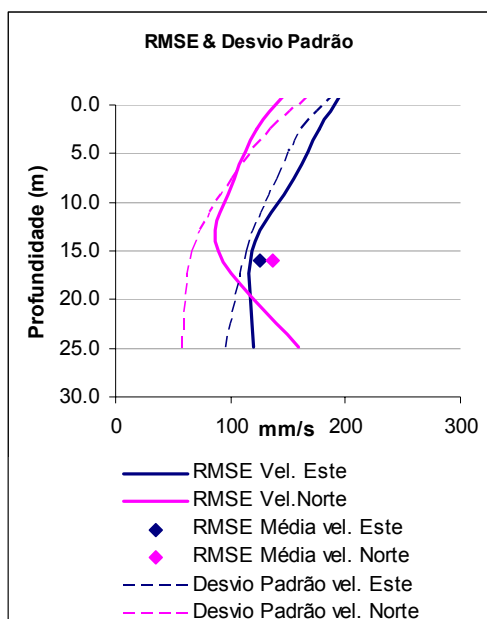


Figura 5-13: Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) do modelo operacional e Desvio Padrão do ADCP na zona da Guia, obtida a partir do período entre 24 de Outubro e 25 de Novembro de 2003

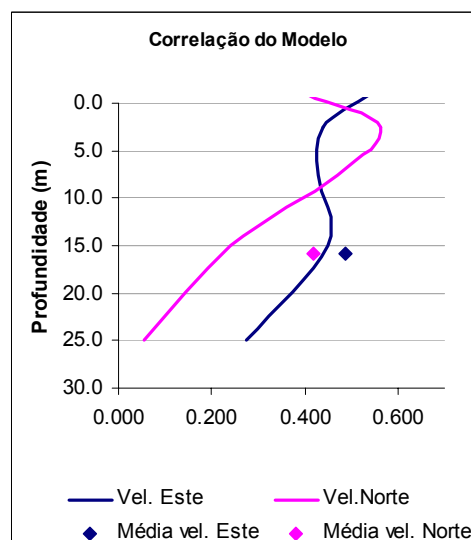


Figura 5-14: Coeficiente de correlação entre o modelo operacional face ao ADCP na zona da Guia, obtida a partir do período entre 24 de Outubro e 25 de Novembro de 2003

Verifica-se que a correlação tende a aumentar à medida que nos afastamos do fundo. Verifica-se também uma melhor correlação média para a componente zonal (coeficiente de correlação de aproximadamente 0.49 na componente zonal, e de 0.42 na componente meridional), o que pode ser explicado por a componente zonal ser de facto a componente dominante do modelo, e o modelo representar melhor as baixas frequências do que as altas frequências. A partir dos 5 metros de profundidade em direcção à superfície, a correlação tende a diminuir na componente meridional, provavelmente devido ao efeito do vento, já que é também esta a componente em que o vento estimado pelo modelo atmosférico apresenta maiores desfasamentos face aos dados.

Para quantificar a distância média entre os valores medidos e modelados, determinou-se também a raiz do erro quadrático médio (RMSE), tendo em atenção o desvio padrão existente nas medidas. Observa-se que o RMSE tende a aumentar à medida que o desvio-padrão aumenta (devido à maior variabilidade do sistema nessa zona), à excepção das zonas próximas do fundo, em que o RMSE tende a ser muito significativo, face ao menor desvio-padrão. Estes resultados vão de encontro aos resultados estatísticos da correlação, em que nas camadas mais profundas também se verifica uma menor correlação entre modelo e medidas, especialmente na meridional. Em média, verifica-se também um maior RMSE para esta componente (137 mm/s para a componente meridional e 126 mm/s para a componente zonal).

Os piores resultados junto ao fundo podem ter várias explicações. Desde uma incorrecta calibração do atrito junto ao fundo, até à presença de processos de larga escala com origem no oceano.

5.2.2 Temperatura e Salinidade

A título de exemplo, na figura seguinte ilustra-se a variabilidade espacial da temperatura à superfície na costa de Estremadura, calculada pelo modelo operacional, já com o forçamento com trocas de calor impostas pelas condições atmosféricas simuladas pelo modelo atmosférico do Instituto Superior Técnico.

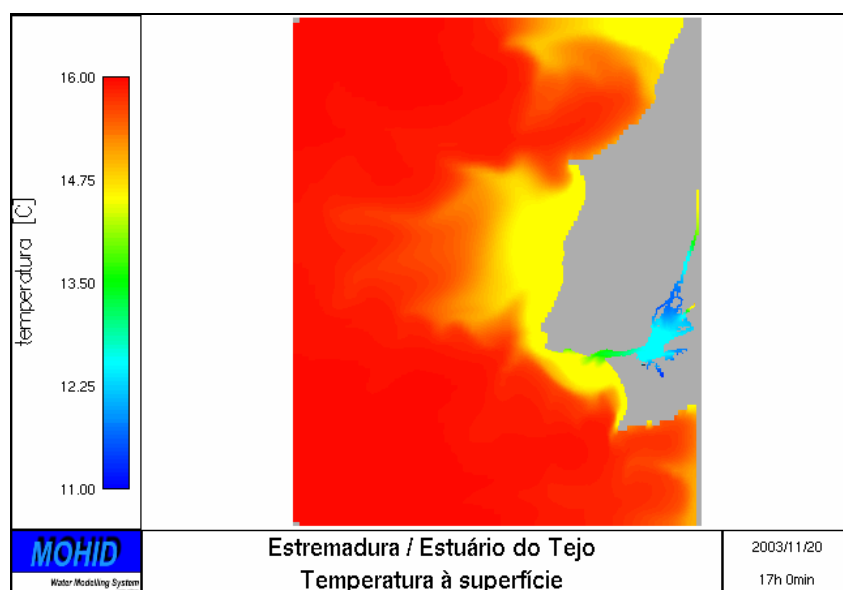


Figura 5-15 - Simulação da temperatura à superfície para 20/11/2003 na costa de Estremadura

Nesta figura é visível o upwelling junto à costa, bem como a menor temperatura no interior do estuário, devido às menores profundidades nessa zona, fazendo-se sentir mais as transferências de energia com a atmosfera.

De seguida é feita uma avaliação dos resultados do modelo com base nos dados de campo provenientes das campanhas mensais de monitorização de emissário da Guia. Para o período em que o modelo operacional tem estado em fase produtiva, apenas existem dados para o primeiro semestre de 2004. É feita uma análise comparativa de resultados do modelo baroclínico para a Guia no ponto mais próximo da zona do emissário, o P8. As medidas, efectuadas à superfície, meio e fundo, são assim comparadas com as camadas do modelo que incluem a profundidade amostrada.

5 - Resultados

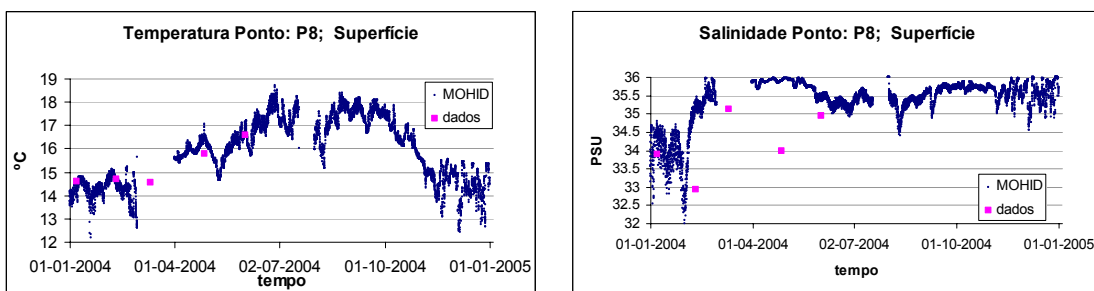


Figura 5-16: Evolução da temperatura e salinidade à superfície, na zona do emissário da Guia

Os resultados à superfície mostram para a temperatura, uma boa relação entre valores medidos e previstos. A salinidade parece apresentar uma maior discrepância apenas no período de final de Abril.

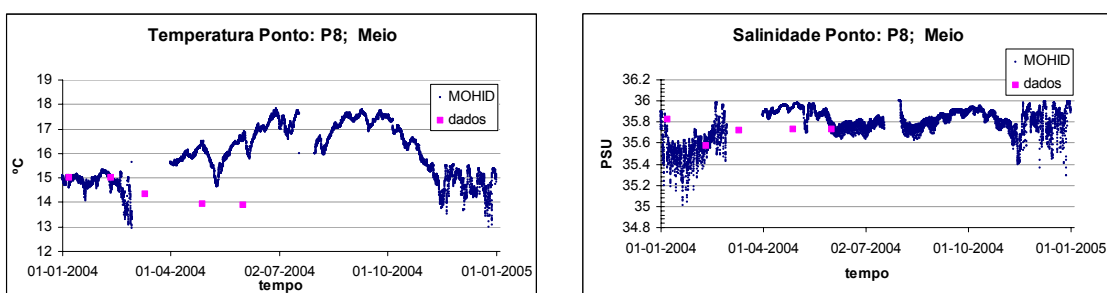


Figura 5-17: Evolução da temperatura e salinidade a meia-água, na zona do emissário da Guia

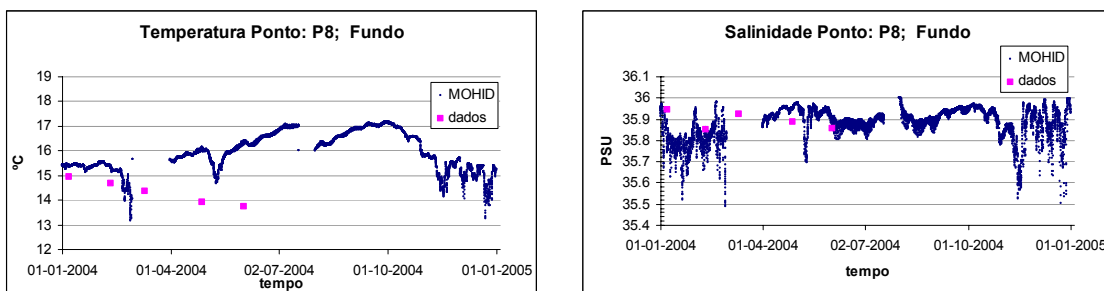


Figura 5-18: Evolução da temperatura e salinidade junto ao fundo, na zona do emissário da Guia

Os resultados obtidos junto ao fundo e a meio da coluna de água permitem observar os mesmos tipos de comportamento. A salinidade prevista pelo modelo reproduz bem as medidas efectuadas, e verifica-se a diminuição nos valores do modelo para situações de Inverno, em que o caudal do Tejo é maior. Nesta altura também a mistura na coluna de água é maior, verificando-se também uma maior variabilidade nos valores simulados.

Quanto à temperatura, é observável a diminuição dos valores no Inverno (bem como uma maior variabilidade dos mesmos, tal como a salinidade), porém as medidas registam uma diminuição progressiva tanto junto ao fundo como a meio da coluna de água, diminuição esta que não é reproduzida pelo modelo. Portanto, pode-se concluir que o modelo 3D apresenta dificuldades na reprodução desta termoclina.

5 - Resultados

Nas próximas figuras, é ainda apresentada uma comparação dos resultados do modelo operacional com imagens de satélite captadas pelo sensor MODIS (NASA), para a temperatura à superfície (SST). As comparações são efectuadas para os mesmos locais, na mesma escala de cores.

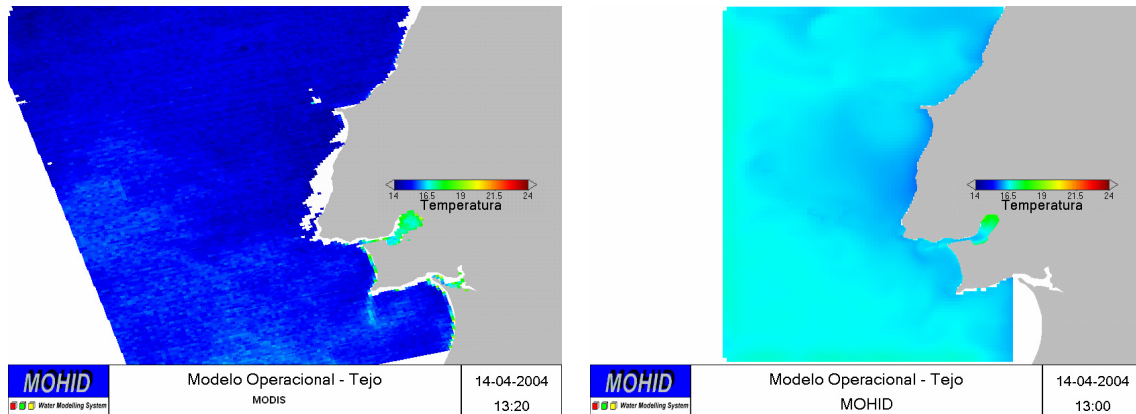


Figura 5-19: Comparação de SST entre imagem de satélite MODIS (NASA) e modelo operacional MOHID no dia 14-4-2004

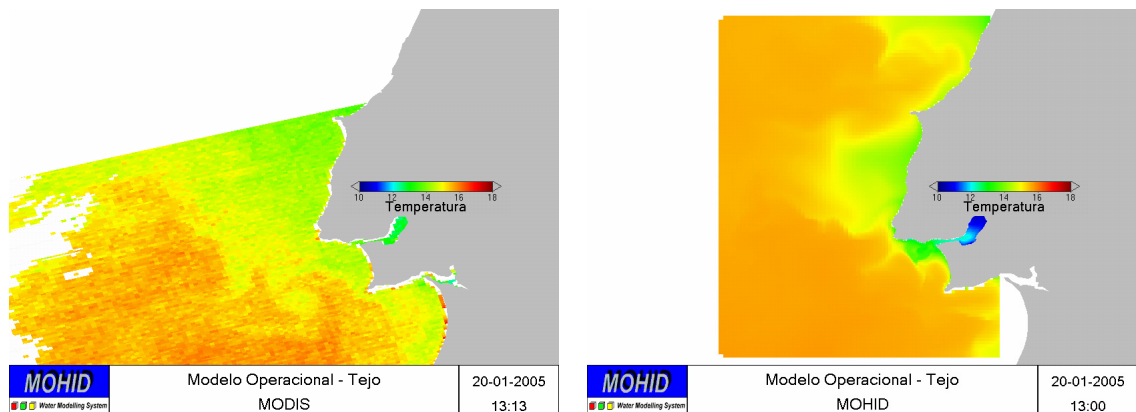


Figura 5-20: Comparação de SST entre imagem de satélite MODIS (NASA) e modelo operacional MOHID no dia 20-1-2005

5 - Resultados

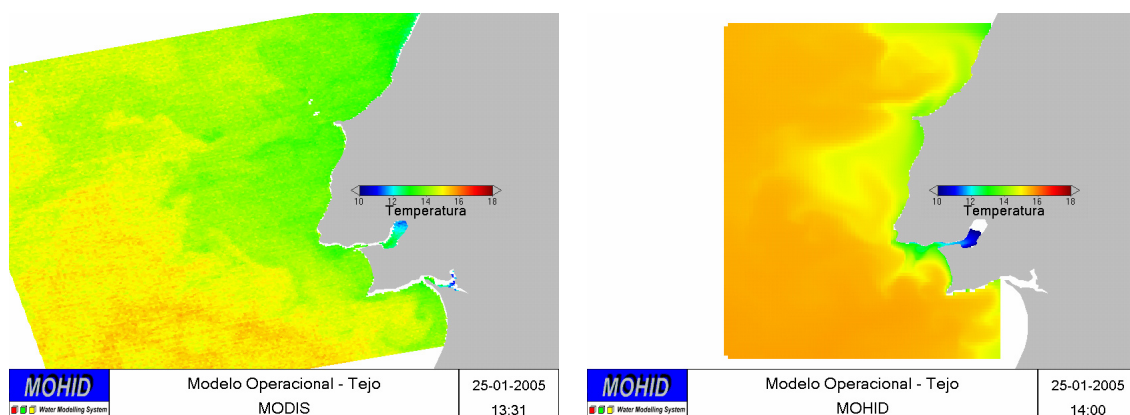


Figura 5-21: Comparação de entre imagem de satélite MODIS (NASA) e modelo operacional MOHID no dia 25-1-2005

As figuras anteriores, pelo facto de permitirem uma visão sinóptica, permitem um tipo de avaliação diferente: é possível encontrar em todas elas pormenores interessantes, como o facto de o modelo apresentar gradientes de temperatura superiores aos medidos – o modelo “aquece mais” no oceano e “arrefece” mais dentro do estuário. Estes resultados podem estar relacionados com as condições de fronteira do modelo operacional à superfície (que são fornecidas por resultados do modelo atmosférico para um ponto na zona da Guia). Uma vez que estas são constantes no espaço, o modelo consegue simular melhor a temperatura superficial na zona da Guia, mas afasta-se mais das imagens de satélite nas restantes zonas. De qualquer forma, é normal que as imagens de satélite apresentem um erro maior nas zonas do estuário, devido à maior dificuldade do satélite resolver os problemas associados ao facto de “ver” o fundo.

De qualquer forma, este tipo de análise requer um estudo mais aprofundado, pois o potencial associado à detecção remota como forma de validação de modelos é enorme. Trata-se no fundo de mais uma fonte de dados sobre o sistema, e cujas ferramentas de processamento, análise e validação associadas a este tipo de dados estão agora em implementação, de modo a tornar a detecção remota como parte integrante da rede de monitorização do sistema operacional.

Em suma, o modelo reproduz bem a temperatura e salinidade à superfície, contudo, em profundidade e nos meses de Primavera e Verão, o modelo não consegue simular a estratificação térmica observada nos valores medidos. Também na análise comparativa com os resultados do ADCP se verificou um pior desempenho do modelo junto ao fundo. Reforça-se assim a ideia de que os efeitos de larga escala podem não estar a ser devidamente contabilizados, na medida em que os valores baixos registados para a temperatura no meio e fundo só podem ter origem em zonas mais profundas, e portanto mais afastadas da costa.

5.2.3 Parâmetros Microbiológicos (Coliformes Fecais)

A simulação da concentração de coliformes fecais é efectuada recorrendo a uma abordagem lagrangeana, devido aos elevados gradientes associados a esta propriedade. Assim, é imposta no modelo baroclínico para a zona da Guia, uma descarga na zona correspondente ao local do emissário, com caudais e concentrações médias mensais de coliformes fecais dos anos anteriores. O modelo MOHID calcula a diluição inicial da pluma do emissário e a subsequente dispersão dos traçadores lagrangeanos. A informação dos traçadores é integrada numa malha euleriana, sendo assim possível visualizar concentrações de coliformes fecais em determinados pontos.

Uma forma de analisar estes resultados é efectuar uma comparação escolhendo pontos significativos na área de estudo, e analisando séries temporais de resultados do modelo nesses mesmos pontos, e confrontar essa informação com as análises laboratoriais.

Assim sendo, optou-se por comparar os seguintes pontos:

- P8 (ponto mais próximo do emissário);
- P6 (a Norte do emissário)
- P1 (a Sueste do emissário);
- P12 (a Noroeste do emissário)

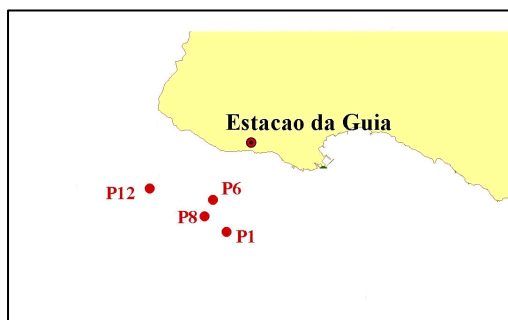


Figura 5-22 - localização dos pontos utilizados para análise comparativa de coliformes fecais

Na figura anterior é ilustrada a localização dos pontos considerados.

As comparações são feitas a 3 profundidades diferentes (superfície, meio e fundo), tirando partido do facto de o modelo de dispersão para a zona da Guia ser 3D. Nas figuras seguintes são ilustradas as comparações efectuadas:

5 - Resultados

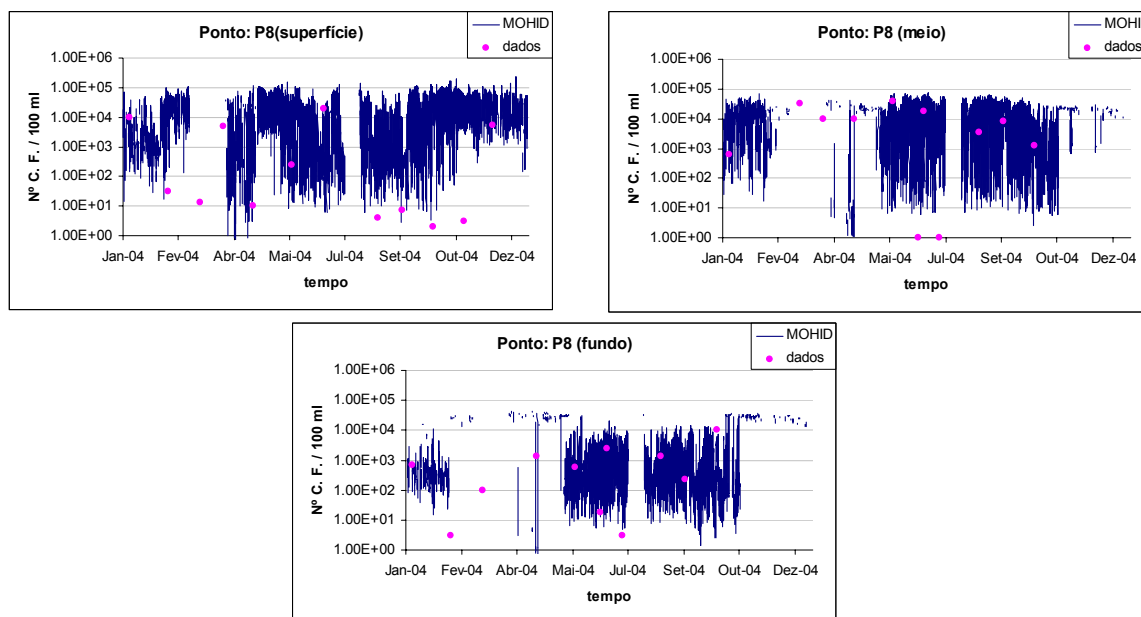


Figura 5-23 - Comparação de resultados de coliformes fecais do modelo 3D de diluição inicial e dispersão com os valores medidos para o mesmo parâmetro e local (P8), às respectivas profundidades, no ano de 2004

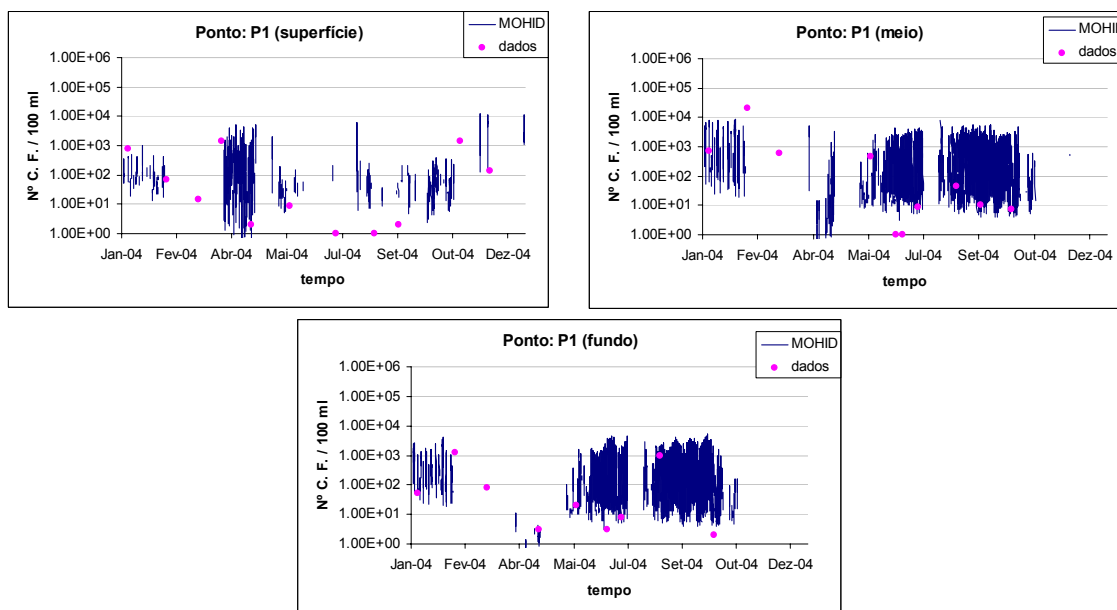


Figura 5-24 - Comparação de resultados de coliformes fecais do modelo 3D de diluição inicial e dispersão com os valores medidos para o mesmo parâmetro e local (P1), às respectivas profundidades, no ano de 2004

5 - Resultados

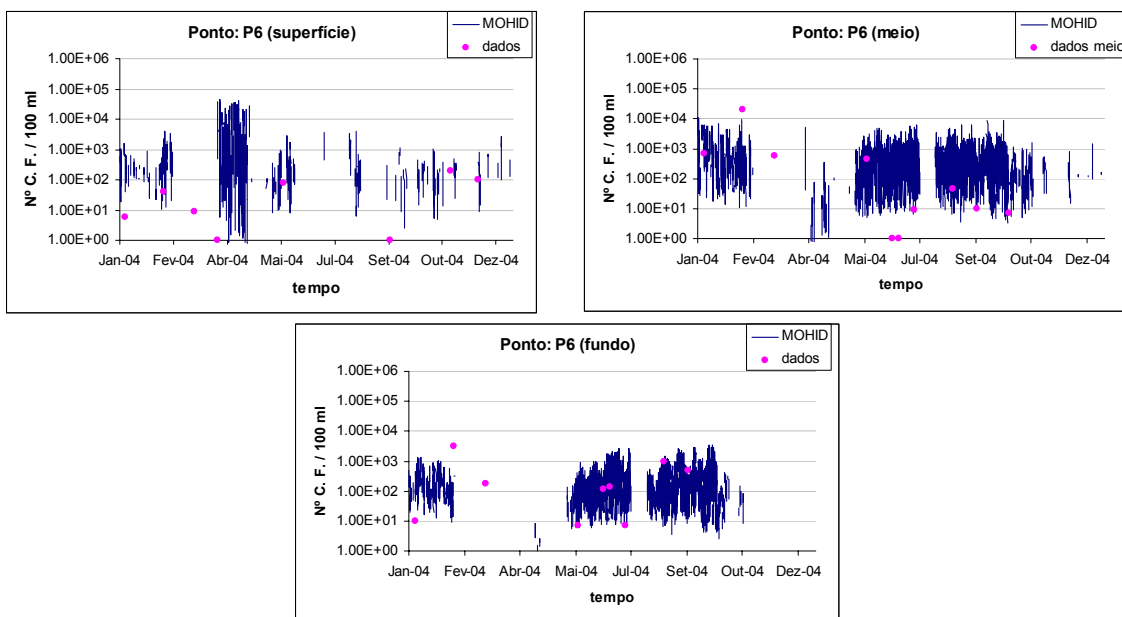


Figura 5-25 - Comparação de resultados de coliformes fecais do modelo 3D de diluição inicial e dispersão com os valores medidos para o mesmo parâmetro e local (P6), às respectivas profundidades, no ano de 2004

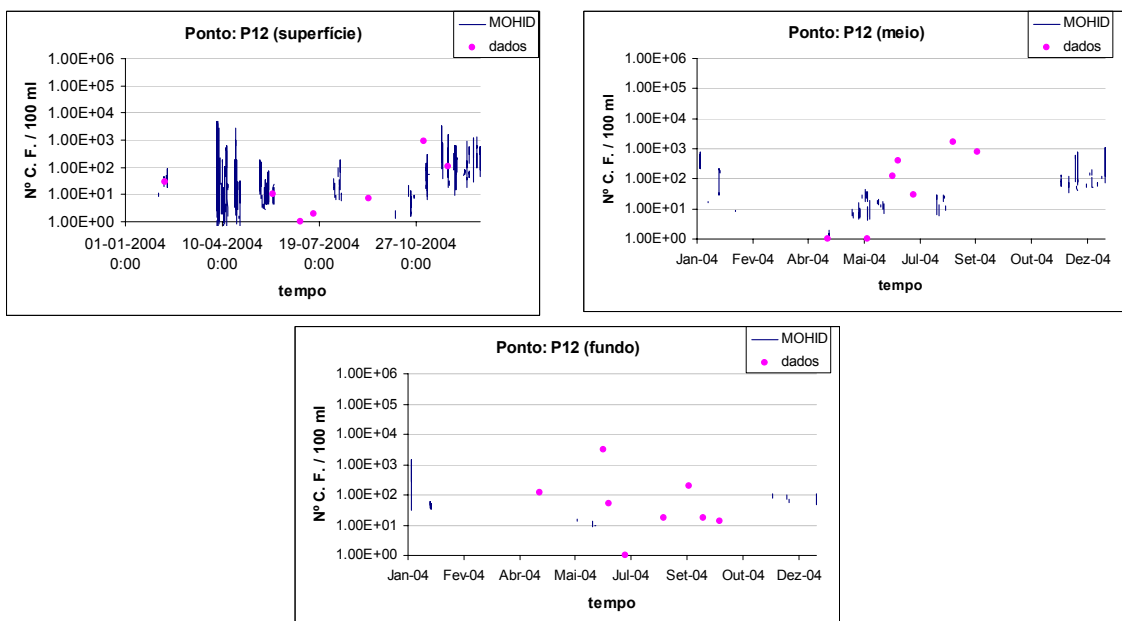


Figura 5-26 - Comparação de resultados de coliformes fecais do modelo 3D de diluição inicial e dispersão com os valores medidos para o mesmo parâmetro e local (P12), às respectivas profundidades, no ano de 2004

A primeira observação a fazer é a (óbvia) variabilidade nas concentrações de coliformes fecais, quer no modelo quer nos dados. Este facto torna desde logo evidente que à partida é extremamente difícil a obtenção de uma boa concordância entre valores medidos e simulados.

Outra observação é o facto de o P12 ser o que apresenta maiores diferenças entre medidas e previsões (no meio e no fundo), o que é também de esperar, tendo em conta que dos pontos analisados, este é o mais distante da saída do emissário.

De resto, é visível que apesar de serem poucos os dados para fazer uma correcta validação do modelo de diluição inicial e dispersão da pluma, os resultados são bastante prometedores, já que a tendência do modelo reflecte grande parte dos valores medidos. Um dos factores que podem influenciar alguma da diferença existente entre resultados do modelo e dados de campo (especialmente nos pontos mais afastados), é o facto de no ano de 2004 se ter simulado a dispersão da pluma dum emissário com uma taxa de mortalidade (T90) constante. Em 2005 as simulações serão feitas já com T90 variável, em função da temperatura, salinidade e radiação, com base na equação de Canteras (Canteras *et al.*, 1995). Na próxima figura mostra-se o exemplo de uma comparação entre a simulação para o emissário da Guia com taxas de mortalidades constante e variável.

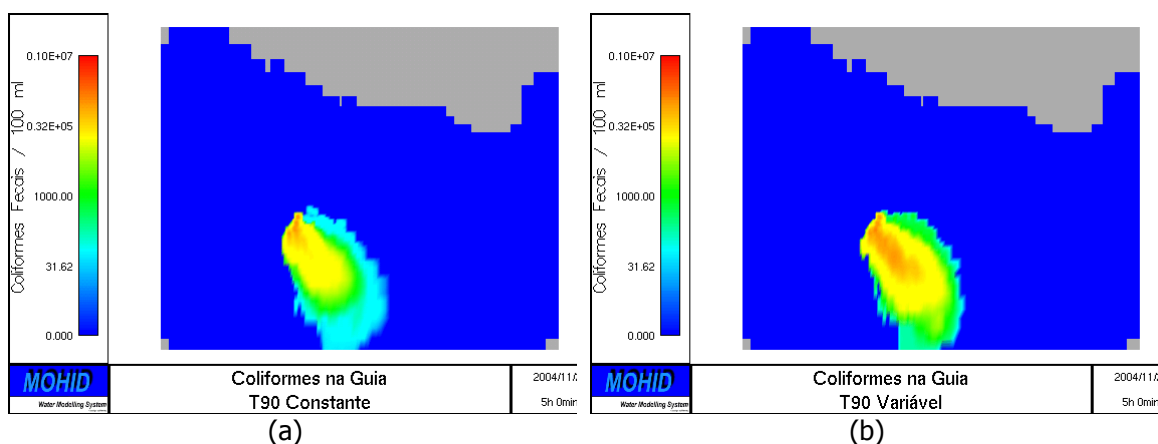


Figura 5-27 – Comparação de concentração de Coliformes fecais na zona do emissário da Guia a 26/11/2004, para uma simulação com taxa de mortalidade (T90) constante – (a) e variável (b)

5.2.4 Parâmetros Biogeoquímicos

Desde Julho de 2003 que são efectuadas simulações de propriedades biogeoquímicas para toda a zona do Tejo. Tendo em conta as várias campanhas de monitorização que foram feitas na zona do emissário da Guia, é possível efectuar uma comparação entre os resultados do modelo e os dados obtidos para o referido local, para o ano inteiro de 2004 (à excepção da clorofila, para a qual não há dados a partir de Agosto de 2004).

Assim, é realizada uma comparação dos resultados do modelo ecológico (são comparadas as propriedades clorofila a, nitratos, azoto amoniacal e oxigénio dissolvido) no ponto P8 (ponto mais próximo do emissário) com a média dos resultados dos pontos na área do emissário (P1, P6, P8, P10, P12, P14, P17) (ver Figura 5-28) considerando não apenas os pontos à superfície

mas também todos os pontos da coluna de água (refira-se que nos meses de Novembro e Dezembro apenas estão disponíveis valores medidos à superfície). A opção de integrar toda esta informação numa média foi baseada no facto de: (1) o modelo de qualidade da água ter um passo espacial igual ou superior à distância entre os pontos escolhidos; e (2) o modelo de qualidade da água correr em modo barotrópico (2D), logo integra toda a coluna de água. Dado existir uma termoclina que em termos médios ronda os 10 metros, a produção primária e os processos a ela associados que controlam as concentrações das propriedades aqui apresentadas, vão ser bastante distintas na faixa superficial limitada pela termoclina e na restante coluna de água.

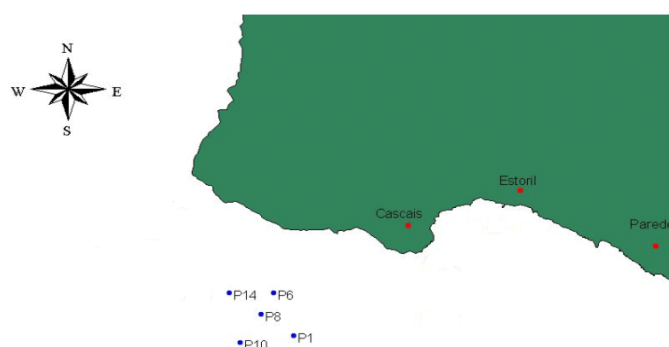


Figura 5-28 - Dados de campo incluídos na comparação com resultados de qualidade da água do modelo operacional MOHID

Todavia, não existem valores de medições *in-situ* para sedimentos em suspensão. Dada a importância deste parâmetro na qualidade da água (por exemplo, a elevada concentração de sedimentos em suspensão vai diminuir a luz disponível na coluna de água, e assim condicionar a produção primária, e todos os processos a ela associados), é fundamental a percepção da capacidade do modelo operacional em efectuar boas estimativas para este parâmetro na zona de validação do modelo de qualidade da água. Assim sendo, antes de qualquer propriedade, será efectuada uma validação do transporte de sedimentos com base em informação medida por detecção remota. A informação utilizada é referente ao sensor MERIS, da ESA, que disponibiliza imagens com uma resolução espacial de 250 metros. Na próxima figura é ilustrada a localização de um perfil horizontal traçado entre o Estuário do Tejo e a Costa do Estoril sobre o qual foi realizada a comparação dos valores do MOHID e do MERIS em 3 períodos diferentes de 2004: Maio (17 de Maio), Agosto (4 de Agosto) e Outubro (1 de Outubro).

5 - Resultados

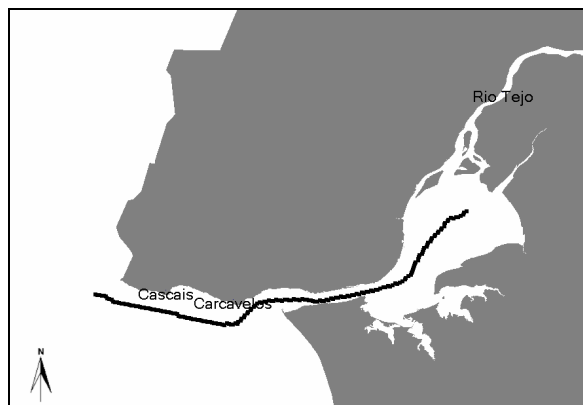


Figura 5-29: localização do perfil horizontal utilizado para comparar resultados de matéria em suspensão

5.2.4.1 Sedimentos Coesivos

Os resultados da próxima figura são apresentados segundo o eixo do XX (Longitude), ou seja os valores mais à direita (Este) representam os valores no estuário e os valores mais à esquerda (Oeste) representam os valores no oceano.

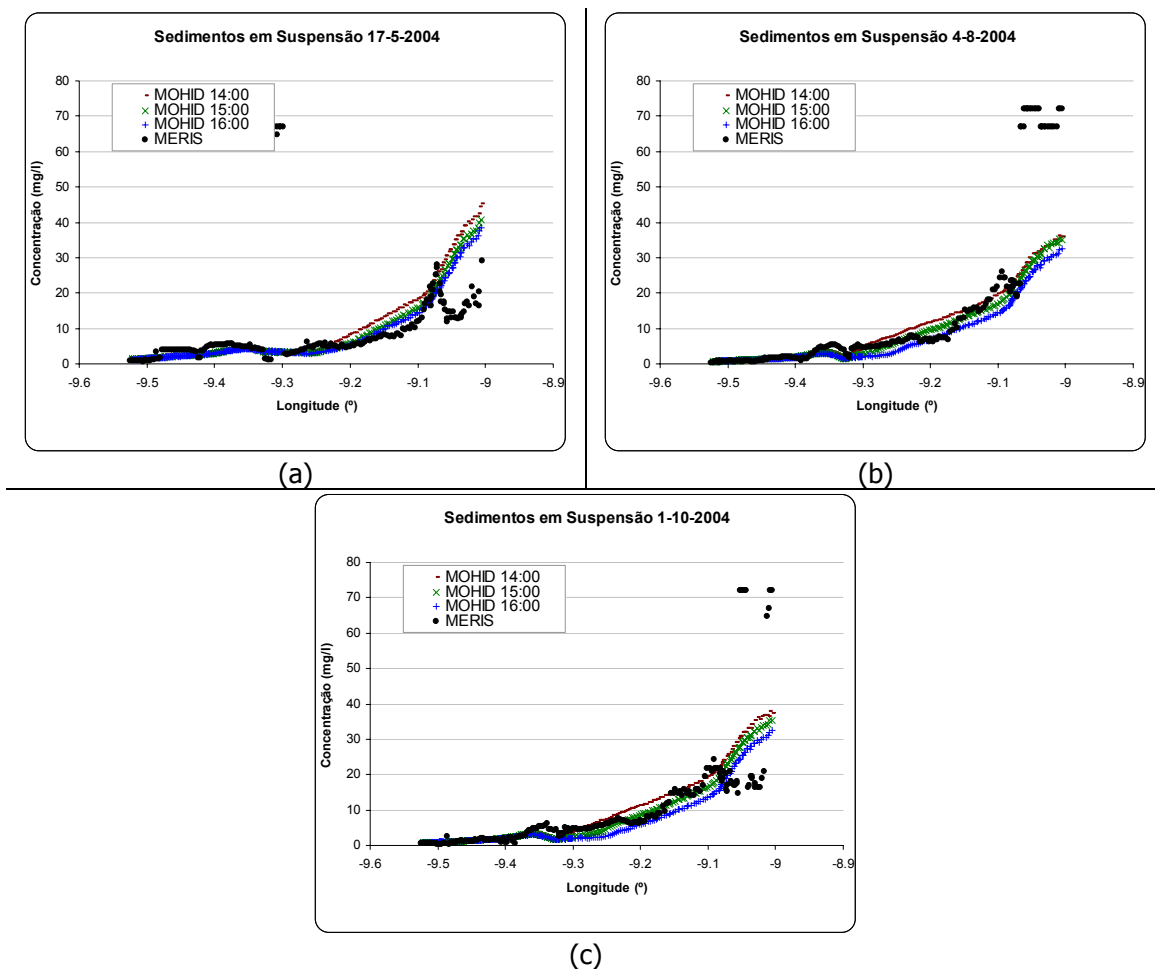


Figura 5-30: Perfis horizontais da concentração de sedimentos em suspensão obtida através de imagens de satélite (MERIS) e do modelo Mohid em Maio (a) Agosto (b) e Outubro (c)

Os resultados do modelo e os dados de satélite expressam o mesmo tipo de comportamento com bastante semelhança entre si apresentando uma diminuição esperada à medida que aumenta a distância relativamente ao rio. Os valores obtidos são muito semelhantes, com maiores diferenças na zona mais a Este, e podem ser causadas por vários factores. Esta diferença pode não ter origem no modelo, mas sim nas próprias imagens de satélite - provavelmente a baixa profundidade e a incapacidade do satélite resolver os problemas associados ao facto de "ver" o fundo, podem explicar uma oscilação tão acentuada.

Porém, esta informação requer também um estudo mais aprofundado e um melhor conhecimento dos algoritmos envolvidos na determinação destes parâmetros a partir das imagens de satélite. Os resultados obtidos a partir do sensor MERIS são mais uma excelente forma de validação do modelo dentro do estuário, dada a sua elevada resolução.

De qualquer forma, com esta análise comparativa, fica demonstrada uma boa concordância entre os resultados do modelo e os dados de satélite para a zona do emissário da Guia, onde de seguida serão analisados parâmetros bioquímicos.

5.2.4.2 Clorofila

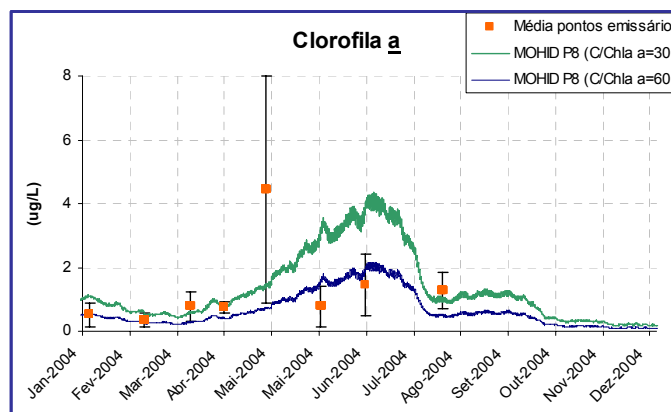


Figura 5-31: Comparação de resultados do modelo de qualidade da água no P8 com a média dos valores medidos nos pontos mais próximos da zona do emissário, para a clorofila_a (C/Chla a = 60 e C/Chla a = 30), no ano de 2004

Os resultados do modelo estão sempre dentro da gama de valores medidos. Os valores mais elevados de clorofila estão relacionados com a maior disponibilidade de luz, que é um parâmetro importante na produção primária. De resto, a diferença da clorofila em função da profundidade (que é reflectida no gráfico pelos maiores desvios-padrão) é justificada pela termoclina mais acentuada no Verão.

No dia 27 de Abril verificou-se que os valores medidos à superfície eram anormalmente elevados, chegando aos 8 µg/l.

Refira-se que o Mohid calcula a concentração de fitoplâncton em unidades de carbono por metro cúbico. A conversão de carbono em clorofila na Figura 5-31 é feita através da razão $C/Chla$ $a = 60$ e $C/Chla$ $a = 30$.

Observa-se que a razão $C/Chla$ $a = 60$ é mais aceitável, sobretudo nos meses de Verão / Primavera. Nesse mesmo período, uma conversão com a razão $C/Chla$ $a = 30$, não se adapta bem aos dados medidos. É um facto que a razão $C/Chla$ a não é constante ao longo do ano, sendo um dos factores a ter em conta na sua variação a disponibilidade de luz. Será por isso normal que quando a disponibilidade de luz é maior, já não seja necessária tanta clorofila para o fitoplâncton absorver a abundante luz disponível. Assim sendo, nos períodos de maior radiação (Verão e Primavera), a razão $C/Chla$ é naturalmente maior.

5.2.4.3 Nitratos

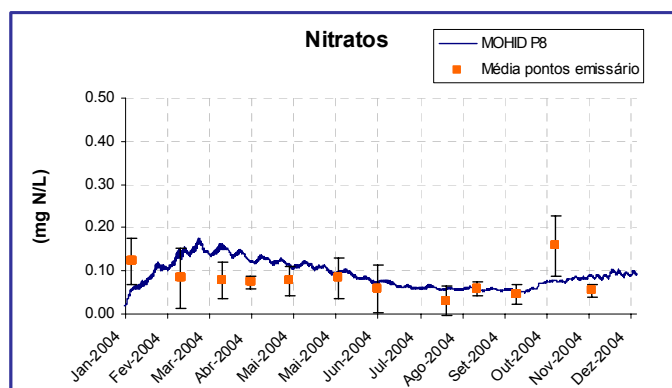


Figura 5-32 - Comparação de resultados do modelo de qualidade da água no P8 com a média dos valores medidos nos pontos mais próximos da zona do emissário, para os Nitratos, no ano de 2004

Para os nitratos, o modelo parece conseguir reproduzir bem os resultados. A variabilidade dos nitratos é explicada por três factores principais, que têm vindo a ser alvo de aperfeiçoamento. São eles: a condição de fronteira marítima, onde é imposto um valor constante no tempo, a descarga do estuário do Tejo que depende dos processos internos do estuário e os processos (dominados pelo consumo) na zona adjacente ao emissário.

O afastamento dos resultados do modelo no início da Primavera pode estar relacionado com uma eventual sobrevalorização da carga de nitratos provenientes a montante do estuário nesta altura do ano - os parâmetros biogeoquímicos utilizados como condição de fronteira nas descargas dos rios são valores médios, e mesmo para o caudal (que em 2004 foi bastante inferior aos valores médios) a utilização no modelo operacional de valores da estação de Ómnias só se iniciou em Setembro.

5.2.4.4 Azoto Amoniacal

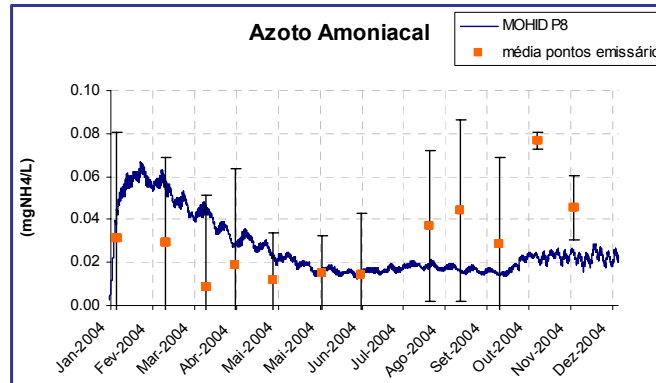


Figura 5-33 - Comparação de resultados do modelo de qualidade da água no P8 com a média dos valores medidos nos pontos mais próximos da zona do emissário, para o azoto amoniacal, no ano de 2004

A amónia apresenta uma grande variabilidade, como se pode ver pelos elevados desvios-padrão em cada ponto. Isto deve-se ao facto de a amónia ter como fonte principal o emissário sendo rapidamente consumido ou nitrificado. Assim, alguns valores mais elevados estão relacionados com a presença da pluma do emissário naquele local. Esta variabilidade relacionada com a pluma do emissário não é reflectida no modelo de qualidade da água, uma vez que este não simula a diluição inicial e dispersão subsequente da pluma (a simulação da diluição e dispersão da pluma é apenas efectuada para os coliformes fecais).

No final do ano de 2004 os valores do modelo estão fora do intervalo de valores registados para esse período, afastamento esse que está relacionado com a não-existência de valores para o fundo e meio da coluna de água nos meses de Novembro e Dezembro.

5.2.4.5 Oxigénio Dissolvido

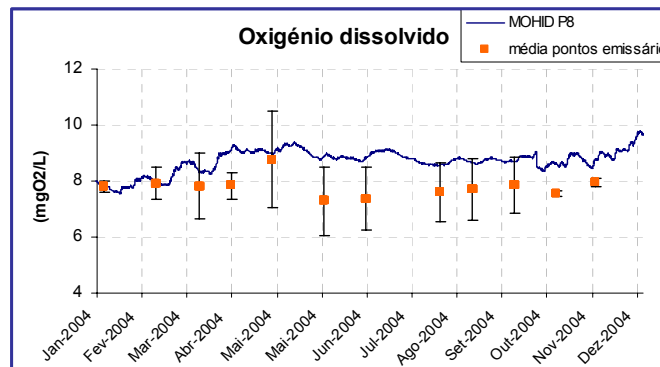


Figura 5-34 - Comparação de resultados do modelo de qualidade da água no P8 com a média dos valores medidos nos pontos mais próximos da zona do emissário, para o oxigénio dissolvido, no ano de 2004

Em relação ao oxigénio dissolvido, o modelo geralmente apresenta valores superiores às medidas. Um dos factores que pode provocar esta diferença é o cálculo do oxigénio de saturação. Esta propriedade depende fortemente da temperatura, salinidade, e pressão atmosférica. No que diz respeito à temperatura, o seu aumento diminui a capacidade de manter oxigénio na coluna de água (ou seja, menores valores de concentração para o oxigénio de saturação). Como é sabido o modelo de qualidade da água aqui analisado calcula a temperatura integrada para a toda a coluna de água, que será claramente inferior à temperatura superficial. A camada superficial é, na realidade, a camada onde existe maior dinâmica com o oxigénio (como por exemplo o arejamento, ou a produção pelo fitoplâncton), especialmente se existir uma estratificação vertical.

Resumindo, o modelo operacional de qualidade da água, ao estimar temperaturas inferiores às reais na superfície (por ser integrado para toda a coluna de água) vai sobrestimar o oxigénio de saturação e assim resultar em valores superiores de concentração do oxigénio que permanece na coluna de água. Isto explica a maior diferença de valores, sobretudo a partir da Primavera, época em que habitualmente se inicia a estratificação. A utilização de um modelo com discretização vertical permitirá assim resolver este problema.

Outro factor adicional pode ser a existência de processos de mineralização de matéria orgânica no fundo (não simulados no modelo operacional) e daí o consumo de oxigénio.

Finalmente, a parametrização do cálculo do fluxo de arejamento pode ter alguma influência nos resultados. A abordagem utilizada é a proposta por Gelda e Auer (Gelda e Auer, 1996). Muitas outras formulações existem para o cálculo deste fluxo, e após um teste a diferentes equações propostas no modelo CEQUAL-W2, verificou-se que esta equação é uma das que estima valores mais elevados. Contudo, será preciso um estudo de sensibilidade mais profundo para averiguar esta questão.

6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

As principais conclusões deste trabalho foram:

- O desenvolvimento de sistemas integrados capazes de conjugar dados de campo em tempo real e medidas pontuais, com ferramentas de modelação numéricas operacionais de carácter de previsão, perfila-se como a melhor forma de compreender, analisar, acompanhar e gerir sistemas de elevado dinamismo, como é o caso de estuários. A utilidade do sistema desenvolvido na preparação e análise de campanhas de monitorização no âmbito do projecto Costa do Estoril tem sido crescente.
- A ferramenta necessária à modelação numérica operacional de um sistema aquático terá de seguir obrigatoriamente uma política de modelação integrada, não só de processos, mas também de diferentes escalas e sistemas. Só deste modo se obtém uma ferramenta escalável a todos os níveis. O sistema de modelação MOHID permitiu a utilização da filosofia pretendida.
- O desenvolvimento do sistema operacional de monitorização e previsão implicou o desenvolvimento integrado de uma série de ferramentas de tratamento e transferência de informação, de forma a tornar todo o processo desde a chegada de dados até à disponibilização de informação ao utilizador final, um processo relativamente automatizado, em que a intervenção humana se focaliza essencialmente na análise e validação dos dados de campo e resultados da modelação numérica.
- O modelo operacional esteve durante todo o ano de 2003 em fase de desenvolvimento, tendo estabilizado os resultados em Agosto/Setembro desse ano. Desde então deu-se início a uma fase de validação e melhoria dos resultados obtidos.
- A instalação e utilização dos dados medidos pela estação meteorológica na Guia tem-se revelado de extrema importância, permitindo a comparação com resultados do modelo atmosférico, e facultando um melhor entendimento de alguns processos atmosféricos que se verificam naquela zona. A correlação com as correntes medidas pelo ADCP à superfície permite ainda a percepção real do forte efeito que o vento exerce nas velocidades do escoamento. Ficou também patente a necessidade de estudar melhor a variabilidade do vento na zona de estudo, tendo em conta que o modelo atmosférico utilizado apresenta nessa zona uma discretização espacial muito limitada (9 km).
- Na comparação dos resultados do modelo com a sonda de correntes em Paço de Arcos, verificou-se que qualitativamente o modelo corresponde às medidas. Contudo, alguns problemas técnicos e logísticos da bóia dificultaram e diminuíram a hipótese de mais e

melhores comparações, incluindo a análise de outros parâmetros. Só a colocação de sistemas de aquisição de dados em zonas menos agitadas e de mais fácil acesso poderá resolver alguns desses problemas.

- O modelo reproduz fielmente os níveis de maré na zona da Costa do Estoril, embora na zona interior do estuário possa apresentar alguns desfazamentos. Apenas a utilização de uma malha computacional mais fina (curvilínea) ou a assimilação de dados nesse local poderão melhorar a solução obtida.
- O modelo hidrodinâmico reproduz tendencialmente a variação do escoamento ao longo do tempo, bem como as direcções medidas, sobretudo perto da superfície, embora os resultados na coluna de água devam ser melhorados. A inclusão a curto prazo de um domínio mais largo no modelo global, em conjunto com a melhoria das suas condições de fronteira poderá reproduzir melhor os efeitos de larga escala com origem no oceano, melhorando assim as previsões do escoamento, especialmente em profundidade. Será também necessário forçar todos os domínios do modelo com condições atmosféricas variáveis no espaço. A utilização de camadas verticais mais finas à superfície na geometria de cálculo do modelo local vai também aumentar a variabilidade espacial da solução obtida.
- Apesar das limitações da componente física do modelo, associadas ao facto dos resultados serem integrados para a coluna de água, as comparações entre medidas e resultados do modelo biogeoquímico são claramente positivas. O modelo consegue simular alguns dos processos biológicos principais como a produção primária e consumo de nutrientes, e as parametrizações usadas aparentemente estão correctas. A tarefa seguinte neste trabalho é aplicar o modelo ecológico acoplado ao modelo 3D, simulando de forma explícita os processos físicos associados ao transporte vertical cuja importância é clara tendo conta os resultados obtidos nas campanhas de amostragem. Paralelamente coloca-se a necessidade de utilizar uma abordagem menos simplificada para a modelação da qualidade da água, que simule por exemplo a razão carbono / clorofila, ou diferentes espécies de fitoplâncton. Este tipo de abordagem, baseada no modelo ERSEM (EPA, 1985), está já implementado no modelo MOHID, faltando apenas a sua aplicação em modo operacional.
- Embora os resultados de validação de dispersão da pluma microbiológica sejam prometedores, é claramente necessário um processo validação mais avançado. A utilização de AUV's (*Autonomous Underwater Vehicles*) tem-se revelado como a forma mais eficaz de obter dados que permitam descrever a variabilidade espacial das plumas dos emissários.
- O alargamento da rede de aquisição automática de dados no mar é de facto importante, não só para continuar a desenvolver o trabalho de validação do modelo operacional, mas também para poder fornecer informação de base para a possível implementação de

assimilação de dados. Este procedimento, que visa corrigir a solução numérica do modelo com base nas medidas, permitirá a introdução de variabilidade associada às pequenas escalas que o modelo sem assimilação de dados poderá ter dificuldade em reproduzir, a não ser com grandes investimentos de capacidade de cálculo e/ou melhorias no levantamento batimétrico. Um exemplo de possível aplicação de assimilação de dados é o cálculo dos níveis, que tem os problemas já descritos anteriormente.

- Para além do alargamento da rede aquisição automática, a expansão da área amostrada dentro do estuário por outros métodos que apresentem uma maior continuidade espacial, mesmo que discretos no tempo, é de facto essencial para uma melhor compreensão da capacidade de resposta do modelo operacional. Este propósito é concretizado não só pela recolha tradicional de amostras de água em diversos pontos do estuário, mas essencialmente pela utilização de sondas multiparamétricas e perfiladores acústicos que possam medir em movimento, e ainda a utilização de detecção remota. Esta linha de acção que teve já início, revela-se como sendo uma forma muitíssimo avançada na compreensão da dinâmica do estuário e como metodologia de validação deste modelo operacional. A automatização e operacionalização de processos de validação com base nestes tipos de medidas é, de resto, um dos principais desafios no futuro mais próximo do modelo operacional do estuário do Tejo.

7. REFERÊNCIAS

- Adcroft A.J., Hill C.N., Marshall J. "Representation of Topography by Shaved Cells in a Height Coordinate Ocean Model", *Mon. Weather Rev.* 125 (1997) 2293-2315.
- Allen, J., Blackford, J., Holt, J., Proctor, R., Ashworth, M., Siddorn, J. "A highly spatially resolved ecosystem model for the northwest European continental shelf". *Sarsia* (in press). 2002. Citado em James (2002)
- Bleck, R. (2002) "An Oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates". *Ocean Modelling* 4, 55-88, 2002.
- Braunschweig, F. "Generalização de um modelo de circulação costeira para albufeiras". Tese de Mestrado em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2001
- Braunschweig, F.; Martins, F.; Leitão, P. C.; Neves, R. J. J. – "A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case". *Ocean Dynamics*, 53, 3, 2003, pp. 137-145.
- Burchard, H. (2001). "Simulating the wave-enhanced layer under breaking surface waves with two-equation turbulence models". *J. Phys. Oceanogr.*, 31:3133-3145, 2001.
- Burchard, H. and K. Bolding (2001). "Comparative analysis of four second-moment turbulence closure models for the oceanic mixed layer". *J. Phys. Oceanogr.*, 31:1943-1968, 2001.
- Cancino L. Neves, R.J.J 1998: "Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems. part I: description of the numerical models". *Journal of Marine Systems*, **22**, 105-116
- Canuto, V. M., A. Howard, Y. Cheng, and M. S. Dubovikov. "Ocean turbulence I: one-point closure model. Momentum and heat vertical diffusivities". *J. Phys. Oceanogr.*, 31:1413-1426, 2001.
- Castellucci, L., 2002, "Economic assessments of the value of marine industries and services and user requirements", in Flemming, N., S. Vallerga, N. Pinardi, H. Behrens, G. Manzella, D. Prandle, J. Stel (editors), "Operational Oceanography – Implementation at the European and Regional Scales", *Proceedings of the Second International Conference on EuroGOOS*, Elsevier, Amsterdam, pp. 45-56.
- Choi H. B., D. G. Kim e D. H. Kim (1997). "A Numerical Tidal Model for the Southeast Asian Seas". *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*. Vol. 9, No. 2, pp. 63-73, june 1997.
- Coelho, H. S (2002). "Modelação de Processos Físicos Relacionados com a circulação Oceânica na Margem Continental Ibérica". Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. Tese de doutoramento em engenharia do ambiente.
- Coelho, H.S.; Neves, R. J. J.; White, M.; Leitão, P.C.; Santos, A. J. – "A model for ocean circulation on the Iberian coast". *Journal of Marine Systems*. 32, 2002, pp. 153– 179.
- Costa, M. V. (1991) – "A Three-Dimensional Eulerian-Lagrangian Method for Predicting Plume Dispersion in Natural Waters" - Diplôme d'Etudes Approfondies Européen en Modélisation de l'Environnement Marin - ERASMUS.
- Decyk, V. K.; Norton, C. D. ; Szymanski, B. K. – "Expressing Object-Oriented Concepts in Fortran90", in *ACM Fortran Forum*, 16, 1997

- Dudhia, J., Gill, D., Manning, K., Wang, W. and Bruyere, C., 2004. "PSU/NCAR Mesoscale Modeling System, Tutorial Class Notes and Users Guide (MM5 Modeling System Version 3)". Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA. <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/documents/tutorial-v3-notes.html>.
- Duffy, D. – "From Chaos to Classes", McGraw-Hill: London, 1995.
- Dybkowska-Stefek, D., 2000, "PIONEER Project", Proceedings MTM – III, [http://www.iwacriza.org/IWAC/IWACsite.nsf/8A1C010C3ABF98D2C1256B1200450699/\\$File/Dybkowska-Stefek%202001.pdf](http://www.iwacriza.org/IWAC/IWACsite.nsf/8A1C010C3ABF98D2C1256B1200450699/$File/Dybkowska-Stefek%202001.pdf) (28/03/03).
- EPA, 1985. "Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modelling" (2nd edition). United States Environmental Protection Agency, Report EPA/600/3-85/040, 454 pp.
- Emery, W. and R. Thomson, 2001, "Data Analysis Methods in Physical Oceanography", Second and revised edition, Elsevier, Amsterdam.
- Erichsen, A. and I. Hansen, 2001, "A 3D Operational Model for Water Quality", DHI Water Environment, 4th DHI Software Conf., Elsinore, http://www.dhisoftware.com/uc2001/Abstracts_Proceedings/abstracts01/051.doc (28/03/03).
- Flather, A., 2000, Existing operational oceanography, *Coastal Engineering*, **41**, pp. 13-40.
- Gelda, R. K. and M.T. Auer (1996). "Development and testing of a dissolved oxygen model for a hyper-eutrophic lake. *Lake and reservoir Management*. 12: 165-179
- Ginis, I. , R.A. Richardson, and L.M. Rothstein, 1998: "Design of a multiply - nested primitive equation ocean model". *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1054-1079.
- Kantha, L. H., and C. A. Clayson, 2004, "On the effect of surface gravity waves on mixing in an oceanic mixed layer". *Ocean Modelling*, 6, 101-124.
- Kliem, N., and J. D. Pietrzak (1999). "On the pressure gradient errors in sigma coordinate ocean models: A comparison with laboratory experiments". *J. Geophys. Res.*, 104, 29,781 –29,799, 1999.
- James, I. – "Modelling pollution dispersion, the ecosystem and water quality in coastal waters: a review". *Environmental Modelling and Software*, **17**, pp. 363-385, 2002
- Le Provost, C. and N. C. Flemming (eds) (1998) "The EuroGOOS Atlantic Workshop Report", EuroGOOS Publication No. 9, Southampton Oceanography Centre, Southampton. ISBN 0-904175-33-2.
- Le Provost, C., F. Lyard, J.M. Molines, M.L. Genco and F. Rabilloud, 1998. "A Hydrodynamic Ocean Tide Model Improved by assimilating a satellite altimeter derived dataset". *J. Geophys. Res.* Vol. 103 N. C3, 1998.
- Leendertsee J., Liu S., "A three-dimensional turbulent energy model for non-homogeneous estuaries and coastal sea systems", in: Nihoul J. (Eds.), *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*, Elsevier, Amsterdam, 1978 pp. 387-405.
- Leitão, J. C.; Leitão, P. C.; Braunschweig, F.; Fernandes, R.; Neves, R. J. J., Montero, P. - "Emergency activities support by an operational forecast system – The Prestige accident." in *4th Seminar of the Marine Environment*, Rio de Janeiro, 2003
- Leitão, P. – "Simulação integrada da dispersão de poluentes no campo próximo e afastado de um emissário", in *7º Congresso da Água*, 8-12 Mar. 2004

7 - Referências

- Leitão, P. 2002, "Validação da Modelação tridimensional da embocadura do estuário do Tejo", Relatório para o projecto Costa do Estoril - SANEST, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico
- Leitão, P. C. (1997) – "Modelo de Dispersão Lagrangeano Tridimensional". Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico
- Leitão, P. C., "Integração de Escalas e Processos na Modelação do Ambiente Marinho", Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal 2003
- Lino, S. e Anjos, D. "– REALTIME – Modelação Operacional no Estuário do Tejo: Acoplamento de um Modelo e de um Sistema Automático de Aquisição de Dados." – Trabalho Final de Curso. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. 2003.
- Marshall, J., C. Hill, L. Perelman, C. Heisey and A. Adcroft – "Hydrostatic, quasi-hydrostatic and nonhydrostatic ocean modeling." *J. Geophys. Res.* 102 (C3), 5733-5752, 1997
- Martins, F.; Neves, R. ; Leitão, P. ;Silva, A. – "3D modeling in the Sado estuary using a new generic coordinate approach". *Oceanologica Acta*, 24:S51-S62, 2001
- Mellor, G., 1996, "Introduction to Physical Oceanography", American Institute of Physics, New York.
- Mellor, G. L., S.Häkkinen T. Ezer e R. Patchen (2002). "A generalization of a sigma coordinate ocean model and a intercomparison of model vertical grids". In: Pinardi,N. Woods J. (Ed.), *Ocean Forecasting: Theory and Practice*. Springer, Berlin. ISBN - 3-540-67964-2.
- Perkins, A.L., L.F. Smedstad, D.W. Blake, G.W. Heburn e A.J, Wallcraft (1997). "A new nested boundary condition for a primitive equation ocean model". *Journal of Geophysical Research* Vol. 102, No. C2, pages 3483-3500, 1997.
- Miranda, R. – "Nitrogen Biogeochemical Cycle Modeling in the North Atlantic Ocean".- Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 1999
- Miranda, R., Braunschweig, F., Leitão, P. Neves, R., Martins, F. and Santos, A. (2000) – "Mohid 2000, A Costal integrated object oriented model". *Hydraulic Engineering Software VIII*, WIT Press
- Miranda, R., R. Neves, H. Coelho, H. Martins, P. C. Leitão and A. Santos, 1999: "Transport and Mixing Simulation Along the Continental Shelf Edge Using a Lagrangian Approach", *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.*, 15,39-60
- Monteiro, A. J. (1995) – "Dispersão de Efluentes Através de Exutores Submarinos. Uma contribuição para a modelação matemática". Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- Munchow, A. (2000). "Wind Stress Curl Forcing of the Coastal Ocean near Point Conception, California". *Journal of Physical Oceanography*. Volume 30, pág. 1265-1280.
- Neves, R. J. J. (1985) – "Étude Experimentale et Modélisation des Circulations Transitoire et Résiduelle dans l'Estuaire du Sado". Ph. D. Thesis, Univ. Liège
- Neves, R.; Coelho, H.; Leitão, P.; Martins, H.; Santos, A. – "A numerical investigation of the slope current along the western European margin" in *Computational Methods in Water Resources XIII*, 2, 1998, pp. 369-376.
- NOAA, 2002, "PORTS® Technology Working to Avoid Marine Traffic Accidents", NOAA Magazine, May 3, in <http://www.noanews.noaa.gov/magazine/stories/mag31.htm> (28/03/03).

- Oey, L. e P. Chen, 1992. "A Nested-Grid Ocean Model: With Application to the Simulation of Meanders and Eddies in the Norwegian Coastal Current". *J. Geophys. Res.*, 97, 20,063-20,086.
- Palma, E. D. and R. P. Matano, 2000: "On the implementation of passive open boundary conditions for a general circulation model: The three-dimensional case". *Journal of Geophysical Research*, 105,. 8605-8627 (2000).
- R. Pawlowicz, B. Beardsley, and S. Lentz, "Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE", *Computers and Geosciences* 28 (2002), 929-937
- Pfeiffer, K., H.-D. Knauth, F. Schröder, H. Nies and K. Grisard, not dated, "The Mermaid – OPMOD System, A Flexible System and Application Approach for Management and Sustainable Development of Exclusive Economic Zones", Sustainable Development International, Edition 3, <http://www.sustdev.org/journals/others/iczm/03.183.pdf>, (28/03/03).
- Pietrzak, J. (1997). "The use of TVD limiters for forward-in-time upstream-biased advection schemes in ocean modelling". *Monthly Weather Review*. Volume 126, 812-830, 1997 .
- Pietrzak, J., J. B. Jakbson, H. Buchard, H.J. Vested e O. Petersen (2002). "A three-dimensional hydrostatic model for coastal and ocean modelling using a generalised topography following co-ordinate system". *Ocean Modelling* 4, 173-205 (2002).
- Pina, P. - "Integrated Approach to Study the Tagus Estuary Water Quality." – Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2001
- Pinardi, N. and N. C. Flemming, (eds) (1998) "The Mediterranean Forecasting System Science Plan", EuroGOOS Publication No.11, Southampton Oceanography Centre, Southampton. ISBN 0-904175-35-9
- Pinardi, N., E. Demirov, M. Tonani, L. Giacomelli and C. Fratianni, 2002, "Mediterranean ocean forecasting system: First phase of implementation", in Flemming, N., S. Vallerga, N. Pinardi, H. Behrens, G. Manzella, D. Prandle, J. Stel (editors), *Operational Oceanography – Implementation at the European and Regional Scales, Proceedings of the Second International Conference on EuroGOOS*, Elsevier, Amsterdam, pp. 189-197.
- Prandle, D., a) – "Introduction. operational oceanography in coastal waters". *Coastal Engineering*, **41**,pp. 3-12, 2000
- Prandle, D., b) – "Operational oceanography – a view ahead". *Coastal Engineering*, **41**, pp. 353-359, 2000
- Portela, L.I., Neves, R.J.J., (1994) !Numerical modelling of suspended sediment transport in tidal estuaries: a comparison between the Tagus (Portugal) and the Scheldt (Belgium-The Netherlands)!. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* **28**: 329-335
- Portela, L. (1996) – "Modelação matemática de processos hidrodinâmicos e de qualidade da água no Estuário do Tejo". Dissertação para obtenção do grau de Doutor em engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Santos, A., H. Martins, H. Coelho, P. Leitão and R. Neves, 2002:A circulation model for the European ocean margin. *Applied Mathematical Modelling*, **26** (5), 563-582.)
- Saraiva, Ana; "Produção Primária de Biomassa no Estuário do Tejo" - Trabalho Final de Curso da Licenciatura de Engenharia do Ambiente (Instituto Superior Técnico)
- Shchepetkin, A.F. and J.C. McWilliams, 1998, "Quasi-monotone Advection Schemes Based on Explicit Locally Adaptive Dissipation"; *Monthly Weather Review*, **126** , pp. 1541-1580

7 - Referências

- Shchepetkin, A.F. and J.C. McWilliams, (2003). "A Method for Computing Horizontal Pressure-Gradient Force in an Oceanic Model with a Non-Aligned Vertical Coordinate", *Journal of Geophysical Research*, 108, NO. C3, 3090-3123
- Sousa, T. – "Previsão Meteorológica em Portugal Continental utilizando o modelo operacional e de investigação MM5". - Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2003
- Taboada, JJ, R. Prego, M. Ruiz-Villarreal, P. Montero, M. Gómez-Gesteira, A. Santos and V. Pérez-Villar, 1998: "Evaluation of the Seasonal Variations in the Residual Patterns in the Ría de Vigo (NW Spain) by means of a 3D Baroclinic Model", *Est. Coast. and Shelf Sc.*, **47**, 661-670;
- Tinis, S. and R. Thomson, not dated, "Operational Modelling of Southwest British Columbia Waters using the Princeton Ocean Model", *Institute of Ocean Sciences*, <http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/sci/juandefuca/brochure.pdf>, (28/03/03).
- Villarreal, M.R., P. Montero, J.J. Taboada, R. Prego, P. Leitão and V. Pérez-Villar, 2002; "Hydrodynamic model study of the Ria de Pontevedra under estuarine conditions", *Est. Coast. and Shelf Sc.*, **54**, 101-113; Braunschweig *et al.*, 2003) and water reservoirs
- Webb, D.J., de Cuevas, B.A., Richmond, C.S., 1998. "Improved advection schemes for Ocean models". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 15, 1171±1187.
- Zavatarelli, M. and Pinardi, N. – "The Adriatic Sea modelling system: a nested approach". *Annales Geophysicae*, **21**: 345-364, 2003
- Zodiatis, G., Lardner, R., Georgiou, G., Demirov, E., Manzella, G. and N. Pinardi – "An Operational European Global Ocean Observing System for the Eastern Mediterranean"