

SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO OPERACIONAL PARA O ESTUÁRIO DO TEJO

Rodrigo FERNANDES

Master, Researcher / Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1096 Lisboa Codex, rodrigo.maretec@ist.utl.pt

João SILVA

Master, Researcher / Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1096 Lisboa Codex, jsilva.maretec@ist.utl.pt

Paulo LEITÃO

PhD, Hidromod, Taguspark, Núcleo Central, 363, 2780-920 Oeiras, pchambel.hidromod@taguspark.pt

Frank BRAUNSCHWEIG

Master, Researcher / Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1096 Lisboa Codex, frank.maretec@ist.utl.pt

Ramiro NEVES

PhD, Prof. / Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1096 Lisboa Codex, ramiro.neves@ist.utl.pt

José J. Delgado DOMINGOS

PhD, Prof. / Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1096 Lisboa Codex, jjdd@ist.utl.pt

1. RESUMO

Nesta comunicação é apresentado um sistema integrado de monitorização 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 (www.mohid.com/tejo-op).

A componente de monitorização é assegurada pela aquisição de dados efectuada por duas estações automáticas e pelas campanhas de medição realizadas. Uma das estações automáticas mede informação meteorológica, enquanto que outra mede dados da corrente marítima, entre muitas outras propriedades da água (p.ex.: turbidez, salinidade, clorofila) no estuário do Tejo.

A capacidade de previsão do sistema é baseada no modelo MOHID (www.mohid.com). Este está acoplado a um modelo atmosférico que estabelece condições de fronteira do MOHID e disponibiliza também previsões diárias na internet (<http://meteo.ist.utl.pt>). Para fazer as previsões de parâmetros do meio aquático, é utilizada uma metodologia de modelos encaixados, permitindo a inclusão na fronteira aberta de processos de larga escala e ao mesmo tempo previsões com elevada resolução espacial, usadas na monitorização da zona do emissário da Guia (Cascais) e da qualidade da água das praias da Costa do Estoril. No caso do emissário, é estudado o comportamento da pluma do efluente, prevendo-se a evolução no campo próximo (diluição da pluma inicial e sua localização) com um modelo integral de jactos com impulsão, e no campo mais afastado com um modelo de transporte 3D lagrangeano, forçado pelas condições do modelo de jactos.

Os resultados são validados através de informação recolhida dentro do próprio sistema (estações automáticas e campanhas de monitorização), mas também através de marégrafos e correntómetros ADCP.

Palavras chave: modelação operacional, monitorização, modelação, Tejo, MOHID



2. INTRODUÇÃO

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 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 tradicional 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 preditivo que permite o estudo de cenários e o teste da eficácia das políticas delineadas.

É assim que surge o conceito de sistema 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 delimitação 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.

3. ÁREA DE ESTUDO

O estuário do Tejo é o maior estuário de Portugal e um dos maiores e mais importantes da Europa. A principal fonte de água doce é o rio Tejo, com contribuições mais pequenas de outros rios como o Trancão ou o Sorraia. Os padrões de descarga do rio dependem da estação do ano, de variações inter-anuais e da regularização com Espanha.



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.

O meio receptor do efluente do emissário da ETAR da Guia caracteriza-se por uma forte mistura forçada por um intenso hidrodinamismo. Nesta área os principais agentes forçadores são o vento e a maré. 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.

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.

Leitão (2002) apresenta a validação dos processos hidrodinâmicos na embocadura do estuário simulados pelo sistema MOHID. Esta validação foi feita para dois cenários, um típico de Verão (Julho de 1998) e outro típico de Inverno (Janeiro de 1997). O grau de fiabilidade dos resultados obtidos permitem avançar duma forma segura para a implementação de um modelo numérico que faça previsões todos os dias.

4. IMPLEMENTAÇÃO

4.1. Metodologia / Arquitectura do sistema

A ideia de sistema de monitorização 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, 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 1).

A integração de todas estas componentes é que permite desenvolver no seu conjunto um sistema de monitorização 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 MySQL.



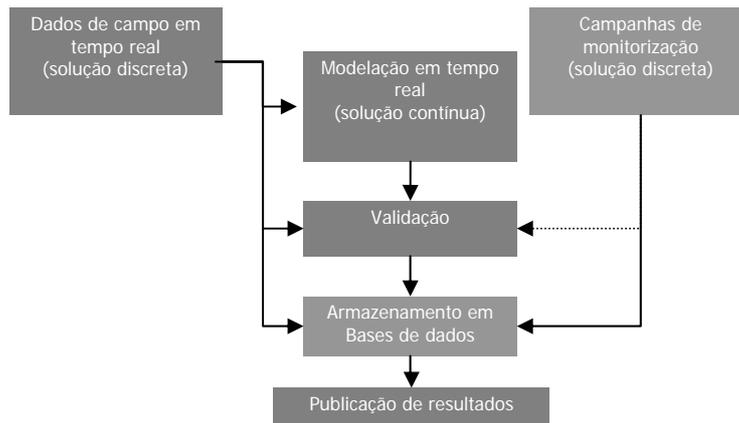


Figura 1 – Esquema ilustrativo das componentes de um modelo operacional.

4.2. Gestão dos Dados de Campo

O ponto de partida de um sistema de monitorização 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.

De seguida, serão descritos os sistemas de monitorização em tempo real e através de campanhas dedicadas.

4.2.1. Sistemas de Aquisição em tempo real

O avanço da tecnologia tem permitido o desenvolvimento de uma série de sensores e sistemas de medição *in-situ* com custos de aquisição cada vez menos onerosos, maior precisão e fiabilidade, associados igualmente a uma manutenção e calibração cada vez menos frequente e dispendiosa. Como consequência deste avanço tecnológico, sistemas de medição *in-situ* têm registado uma grande expansão de implementação nas mais diversas áreas, incluindo-se naturalmente entre estas, o controle e monitorização da qualidade de água. O uso deste tipo de instrumentos e metodologia de medição quando acoplada a sistemas de aquisição e tratamento de dados em tempo real permite uma monitorização permanente do meio hídrico, tal como a detecção imediata de eventuais fontes de poluição pontuais ou difusas, ou fenómenos atípicos e esporádicos quer sejam de origem antropogénica quer sejam de origem natural. Entre os parâmetros mais frequentemente analisados em sistemas de medição *in-situ* em meios aquáticos incluem-se; caudal, velocidade de 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.

Uma das principais virtudes da grande maioria dos sensores utilizados em medições *in-situ* é que são especialmente desenvolvidos para uma 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 *datalogger* 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 *datalogger* para calibração do sensor analógico. Para a aquisição dos dados em tempo real para um eventual tratamento, utilização e disponibilização dos dados pode-se recorrer igualmente a diversos métodos, entre os quais constam; GSM, telemetria, satélite, cabo físico ou Ethernet/Internet.

No âmbito do sistema de monitorização e previsão do estuário do Tejo estão instaladas uma estação meteorológica e um sistema de monitorização da qualidade de água, os sistemas caracterizam-se por a integração de vários sensores num *datalogger*, aquisição de dados por intermédio de GSM, filtragem e tratamento dos dados, eventual disponibilização diária dos mesmos na Internet, e integração em modelos operacionais.

4.2.1.1. Estação Meteorológica

A estação meteorológica está instalada no topo do edifício da ETAR da Guia, 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. 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.

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.

4.2.1.2. Sistema Automático de Monitorização da Qualidade de Água

O sistema de monitorização da qualidade de água está 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.

Neste sistema está instalado uma sonda multiparamétrica H20 da Hydrolab com sensores de temperatura, oxigénio dissolvido, condutividade/salinidade, turbidez e profundidade. A clorofila-a é 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. Todos os instrumentos estão ligados a um *datalogger* CS CR10X por intermédio de um



módulo CS SDM-SIO4 via RS-232, de forma semelhante está 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, envia uma SMS de alerta aos responsáveis do sistema. Este alerta que visa a localização e recuperação do equipamento no caso da bóia se encontrar à deriva está condicionado contudo a 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 justifica no presente caso. O *datalogger* envia 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 está garantida com uma bateria alimentada por dois painéis solares.

Ambos os 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.

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. Dados de Campanhas de Monitorização

Para além da monitorização de parâmetros de uma forma contínua e em tempo real, são também desenvolvidas com regularidade análises da água e sedimentos na área de estudo, decorrentes de campanhas dedicadas de monitorização, no âmbito do projecto de monitorização da Costa do Estoril. Os resultados destas análises são mais uma fonte de informação histórica do estuário do Tejo, indispensável para a compreensão dos processos e mecanismos envolvidos na dinâmica do mesmo estuário.

Os resultados destas análises, discretas no tempo, são armazenados numa base de dados (em Access), desenvolvida de forma a contemplar a variabilidade da informação recolhida. Esta base de dados tem a informação referenciada geograficamente, de forma a poder ser visualizada num sistema de informação geográfica. O processo de inserção dos resultados das análises na base de dados, é efectuado através de uma aplicação (em VisualBasic.NET) que poderá ser instalada nos laboratórios de análises, enviando depois a informação compilada para um servidor central, instalado no Maretec. Esta aplicação permite também a exportação dos resultados das análises para formato MS Word.

4.3. Modelação e Previsão

Uma das partes mais importantes do sistema de monitorização 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. 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. 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 podem ser diferentes. Recorreu-se assim ao sistema de modelação MOHID, originalmente desenvolvido no Instituto Superior Técnico desde 1985.

4.3.1. Descrição Geral do Sistema MOHID

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 filosofia de programação (a qual foi implementada em ANSI FORTRAN 95), 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, agrupados 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 lagrangiana 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), derrames de petróleo (Leitão *et al.*, 2003), eutrofização e tempos de residência em estuários (Braunschweig *et al.*, 2003) e albufeiras. 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. Actualmente o sistema de modelação operacional contempla apenas a ferramenta numérica MOHID Water.

A interacção com o modelo MOHID é efectuada através de uma interface gráfica com dois programas complementares: (i) MOHID GUI - permite a manipulação de ficheiros e directorias necessárias à realização das simulações do MOHID; (ii) MOHID GIS - gere dados georreferenciados e permite a visualização dos resultados do MOHID. A interface gráfica foi devidamente concebida para poder executar o modelo e tratar os respectivos resultados de forma operacional.

4.3.2. Circulação / Hidrodinâmica

A circulação é simulada recorrendo ao módulo hidrodinâmico do sistema MOHID.

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 está assim preparado para, de acordo com o local de estudo, computar os principais mecanismos físicos de forçamento tais como gradientes de densidade (fluxos baroclínicos), maré, vento, entradas de água doce, entre outros.

4.3.3. Ecologia / Biogeoquímica

A modelação ecológica no MOHID Water assenta sobretudo na descrição do crescimento do fitoplâncton em resposta à luz e nutrientes, bem como na evolução do sistema benthico (coluna sedimentar) e sua interacção com o sistema pelágico (coluna de água) (Miranda, 1999; Pina, 2001).

No que respeita ao crescimento de fitoplâncton, é possível efectuar uma decomposição do fitoplâncton em diferentes variáveis de estado, com diferentes parametrizações à limitação de nutrientes, de forma a cobrir o ciclo anual e sucessões de diferentes grupos, permitindo perceber e analisar “blooms” de algas. A simulação da regeneração de nutrientes é efectuada diferenciando compartimentos de matéria particulada e orgânica dissolvida para a regeneração dos ciclos anuais de C,N,P e Si. São simuladas razões de nutrientes N:P e o “microbial loop” para o ciclo da matéria orgânica é calculado explicitamente. As exigências de oxigénio estão também incluídas. As variáveis de estado estão ligadas como uma rede, de forma a possibilitar estudos nas relações tróficas.

Para o estudo da interacção entre os sistemas benthico 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 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.

4.3.4. Dispersão de poluentes nos campos próximo e afastado

Para efectuar a simulação do impacte das descargas do emissário da Guia no meio receptor, é utilizada, através do sistema MOHID, uma metodologia de simulação tridimensional integrada de dispersão de poluentes nos campos próximo e afastado do emissor. Assim, no sistema MOHID, a diluição inicial (no campo próximo) é simulada com recurso a um módulo (MOHIDJET) que resolve de uma forma integral jactos com impulsão, cujos respectivos resultados são 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. 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).

4.3.5. Condições de Fronteira

O modelo permite a consideração de condições de fronteira abertas ou fechadas, sendo que as condições de fronteira abertas podem ser do tipo nível imposto, radiativas ou um misto das duas



incorporando diferentes fontes de informação (terra, mar aberto, superfície) na definição das mesmas condições de fronteira.

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 forçar modelos locais com processos de grande escala. Esta metodologia permite ainda a integração numa única ferramenta, diversos modelos locais forçados pelo mesmo modelo regional, ou pela assimilação de informação (detecção local ou remota).

O modelo operacional para o estuário do Tejo está implementado segundo esta filosofia de modelos encaixados, utilizando três níveis diferentes. O maior nível cobre praticamente toda a costa oeste portuguesa. Este é forçado pela solução global de maré 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 modelos 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 forçamento na interface água-atmosfera, é imposto o 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 dos rios Tejo e Sorraia são médios diários, bem como a ETAR da Guia, enquanto que os restantes são valores médios anuais. Encontra-se em fase de desenvolvimento a introdução no sistema do caudal do rio Tejo em tempo real. 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 acoplados a qualquer instante, à medida das necessidades. O forçamento atmosférico é em tudo igual aos modelos do nível superior (à escala do Tejo) (ver Figura 2).

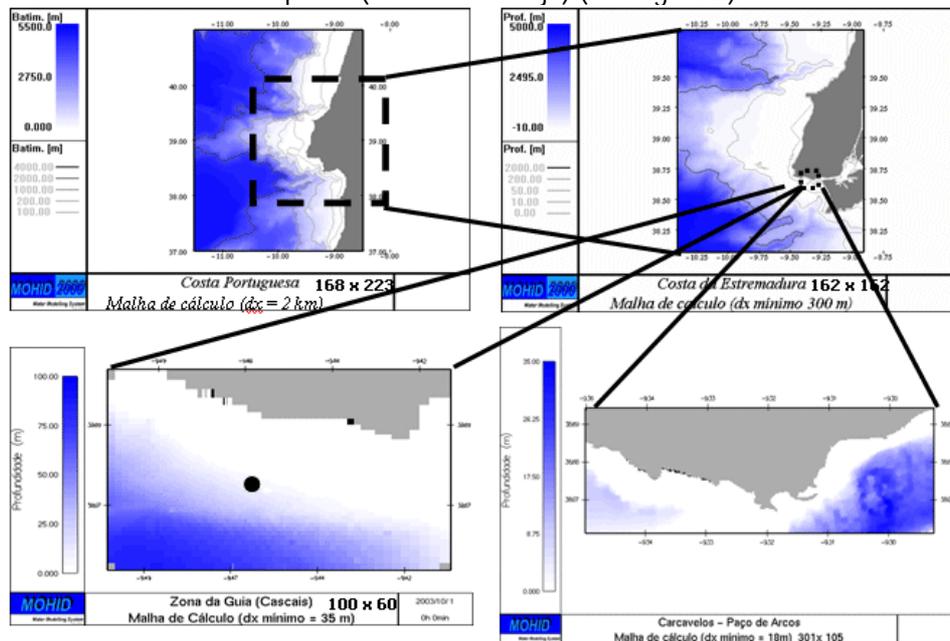


Figura 2 - Modelos encaixados em três níveis. À esquerda em cima – nível 1 (modelo de larga escala para a parte da costa oeste portuguesa); à direita em cima – nível 2 (modelo de escala regional

para o estuário do Tejo) ; em baixo, nível 3 (modelos de escala local): à esquerda, zona do emissário da Guia, e à direita, zona de entre Carcavelos e Paço de Arcos.

4.3.5.1. Integração com 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. Este 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 (Sousa, 2002). A validade deste modelo é comprovada após comparação dos seus resultados com os valores reais registados na estação meteorológica na Guia.

Dada a largura da malha de cálculo deste modelo ($dx = 8$ 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.

5. RESULTADOS

5.1. Publicação / Acesso aos produtos do sistema operacional

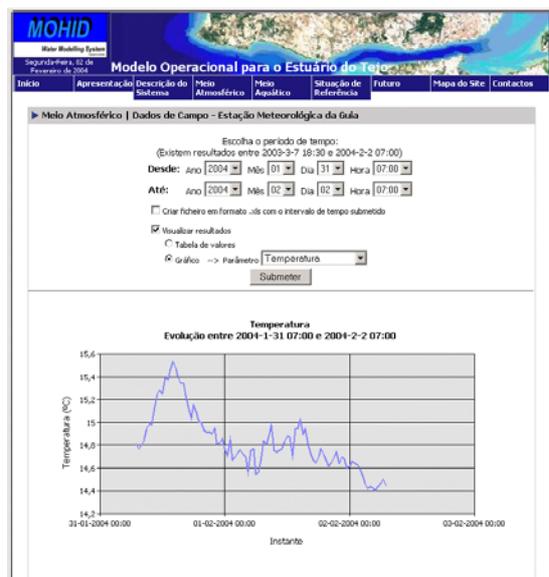
A informação gerida pelo sistema operacional pode ser explorada pelo utilizador final através da internet, no sítio com o endereço www.mohid.com/tejo-op.

Através desta interface, é possível explorar os diversos produtos do sistema, onde são disponibilizados resultados da modelação numérica (previsões), assim como as medidas de diversas fontes (ver Figura 3). Existe ainda uma ligação para as previsões atmosféricas do modelo atmosférico do IST já referido (<http://meteo.ist.utl.pt>).

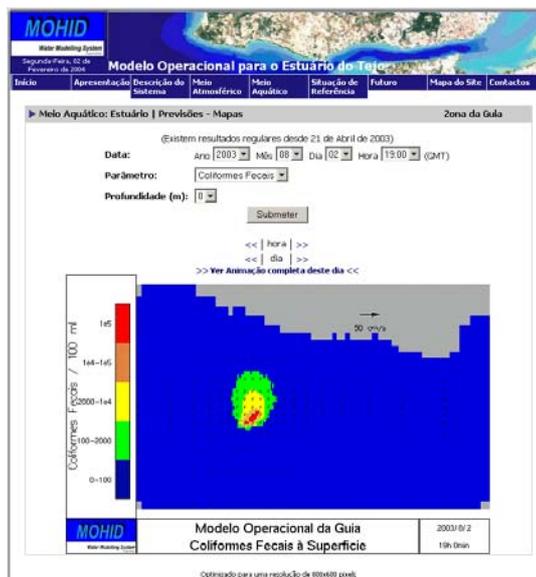
A totalidade dos dados medidos pelas estações automáticas pode ser acedida, sendo disponibilizadas medições com um desfazamento máximo da hora de medida de 24 horas. O utilizador pode escolher o intervalo de tempo que pretende visualizar num gráfico e/ou exportar os dados em forma Excel.

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.





(a)



(b)

Figura 3 – Resultados do sistema operacional na internet. (a) - gráfico com temperatura medida pela estação meteorológica; (b) – mapa com resultados do modelo – velocidades e dispersão de coliformes à superfície na zona do emissário da Guia

As previsões para o estuário do Tejo são incluídas no modelo 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 periodicidade 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 (Quadro 1 **Error! Reference source not found.**).

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

Quadro 1 - Propriedades simuladas pelo modelo operacional que são divulgadas sob a forma de mapas.

5.2. Análise e Discussão de Resultados

Um 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.

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.

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

5.2.1. Hidrodinâmica

5.2.1.1. Níveis

Actualmente a única informação disponível que permite a validação em tempo real do modelo operacional é a evolução dos níveis de água em diversos pontos do estuário. Estes níveis encontram-se sintetizados na forma de componentes harmónicas. Os níveis do modelo são comparados em 14 pontos (Figura 4).

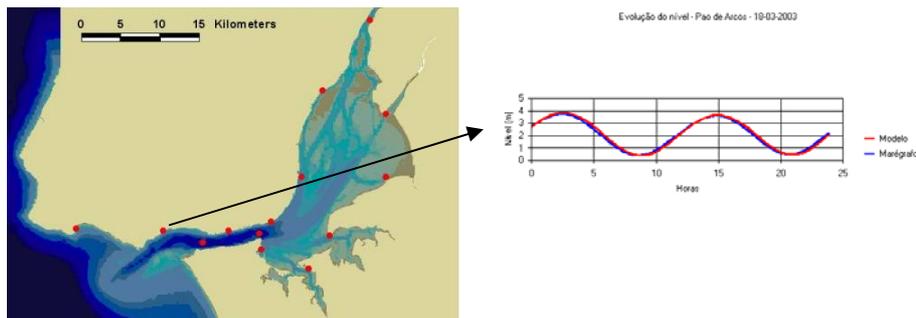


Figura 4 - Pontos de validação da evolução do nível da água simulado pelo modelo.

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 zona da Costa do Estoril.

5.2.1.2. Campos de Velocidades

São efectuadas comparações dos resultados do modelo operacional com os dados do ADCP para o fundeamento ocorrido de 24 de Outubro a 25 de Novembro, no local do emissário da Guia.

Fica demonstrado que de um modo geral, o modelo reproduz as velocidades instantâneas medidas (ver Figura 5), embora com alguma atenuação. Para além disso, o modelo tende para a média do escoamento. No entanto, a utilização de uma discretização vertical de apenas 5 camadas verticais no modelo à profundidade do local em questão (30 metros) (o modelo é discretizado com 11 camadas de espessura variável até à profundidade de 5000 metros) também limita a obtenção de uma variabilidade vertical mais acentuada naquela zona, tal como é obtida pelo ADCP (Figura 6). De qualquer forma, a menor dispersão das velocidades instantâneas relativamente ao ADCP, sobretudo a maiores profundidades, e algumas diferenças no perfil de velocidade residuais podem ser explicadas pela eventual acção de efeitos de larga escala com origem no oceano e que não são contabilizados no modelo. O forçamento de todos os domínios do modelo (incluindo o modelo global) com resultados do modelo atmosférico para apenas um único ponto (portanto, não existe variabilidade espacial nos dados atmosféricos) pode também ter alguma influência nos resultados.

Em suma, será necessário alargar o domínio do modelo global, bem como melhorar as condições de fronteira do mesmo, com vista a reproduzir melhor os efeitos de larga escala com origem no oceano. Será também necessário forçar todos os domínios do modelo com condições atmosféricas variáveis espacialmente. Provavelmente a utilização de camadas verticais mais finas à superfície na geometria de cálculo do modelo vai também melhorar a solução obtida.

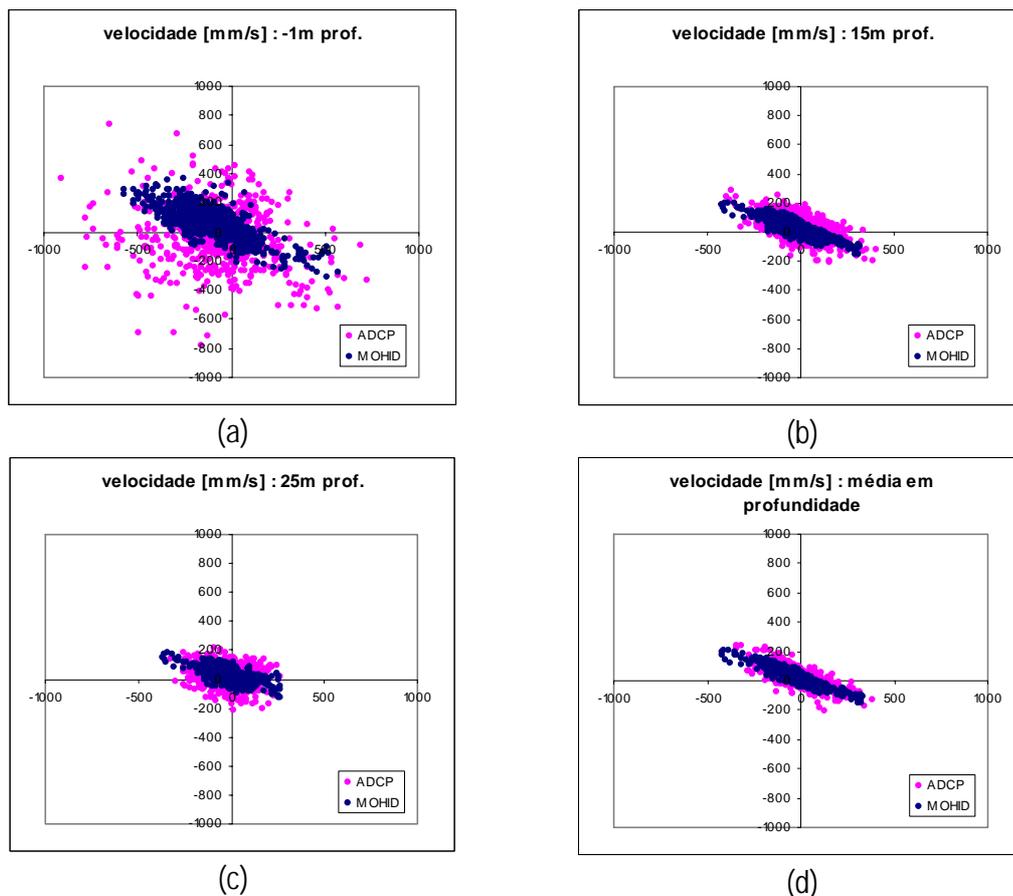


Figura 5 - Diagramas de dispersão a diferentes profundidades das medidas de velocidades das correntes com o ADCP ao longo do período de 24 de Outubro e 25 de Novembro de 2003. (a) 0m; (b) 15m; (c) 25m; (d) média na coluna de água

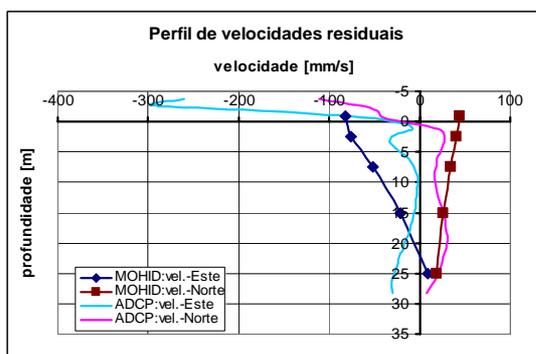


Figura 6 – perfil de velocidades residuais das correntes medidas pelo ADCP e simuladas pelo modelo operacional MOHID, entre 24 de Outubro e 25 de Novembro de 2003

A observação dos gráficos para comparação de um período de 48 horas (Figura 7) permite ainda avaliar a capacidade de resposta do modelo à variabilidade temporal. Consta-se que o comportamento do modelo reproduz tendencialmente o comportamento instantâneo do escoamento, tanto à superfície, como no meio e fundo. É ainda possível observar a importância e influência do efeito do vento na variação do escoamento à superfície.

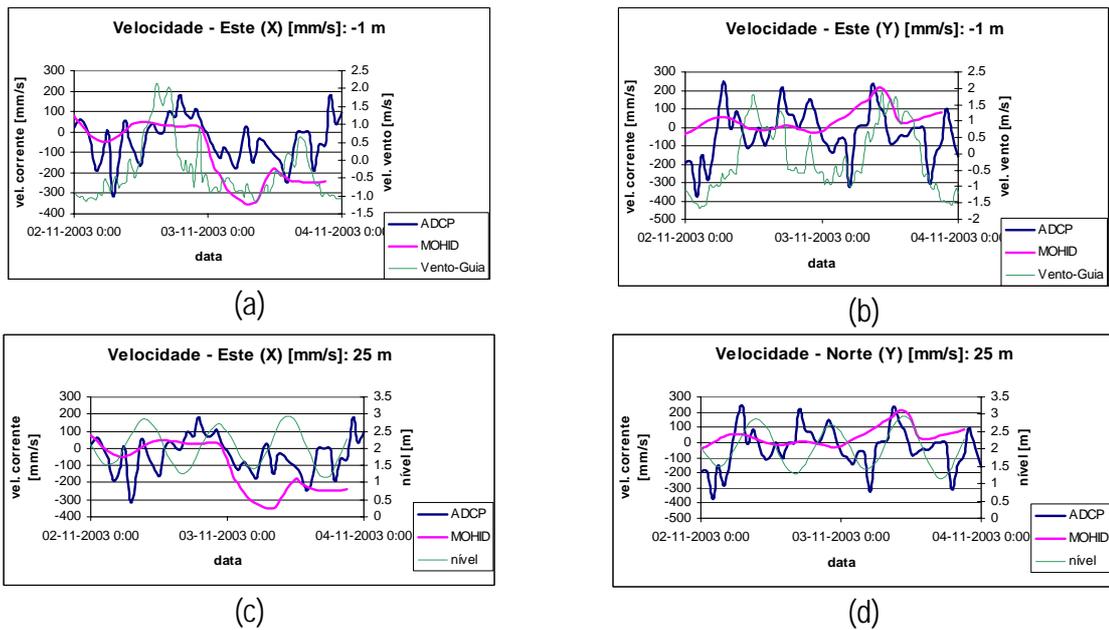


Figura 7 - Velocidades à superfície das correntes medidas pelo ADCP e simuladas pelo MOHID, e velocidade do vento, entre 2 e 4 de Novembro de 2003. (a) velocidade-Este perto da superfície; (b) velocidade – Norte perto da superfície; (c) velocidade-Este perto do fundo; (d) velocidade – Norte perto do fundo.

5.2.1.3. Parâmetros Biogeoquímicos

Desde Julho que são efectuadas simulações de propriedades biogeoquímicas para toda a zona do Tejo. Tendo em conta as várias campanhas de monitorização que foram feitas ao longo do ano na zona do emissário da Guia, é possível efectuar uma comparação entre os resultados do modelo e os dados obtidos para o referido local, e para o período de Julho a Dezembro de 2003. Nesta comparação, são utilizados os resultados do modelo para o local da estação P8. Para além das medidas efectuadas nesse ponto, são também incluídas na comparação as medições efectuadas nos pontos mais próximos (ver Figura 8). Uma vez que o modelo de qualidade da água implementado, é integrado na coluna de água (2D), as comparações são feitas para análises efectuadas à superfície, meio e fundo.

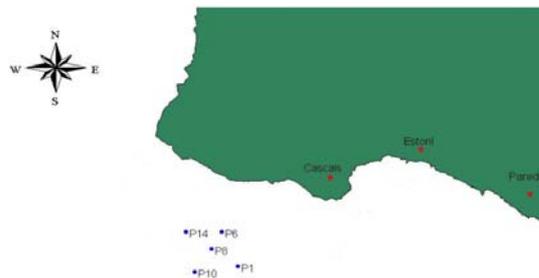


Figura 8 - Dados de campo incluídos na comparação com resultados do modelo operacional MOHID

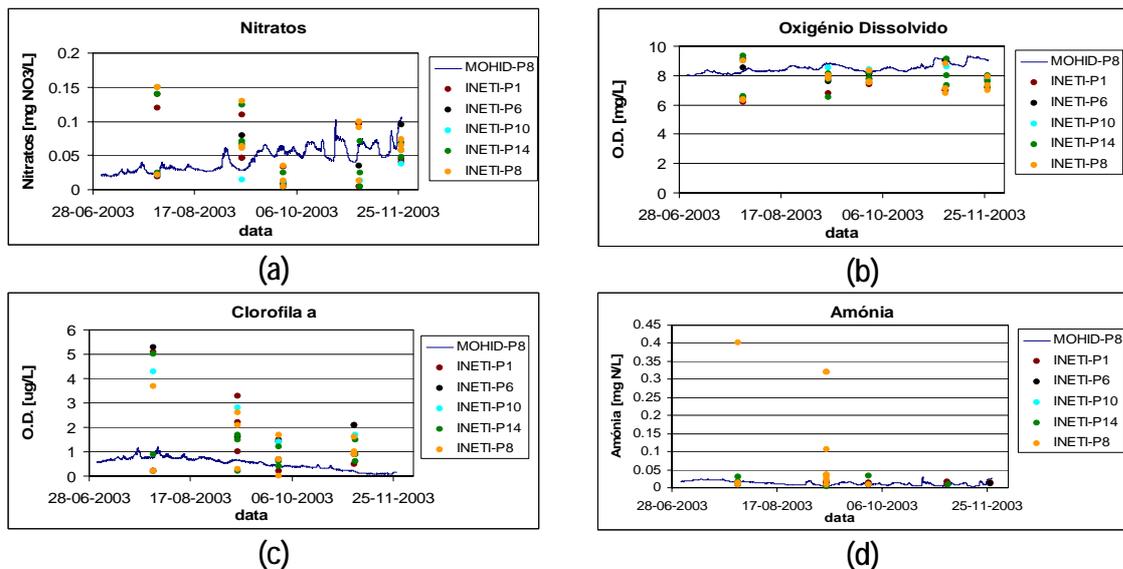


Figura 9 - Comparação da concentração de propriedades obtidas pelo modelo operacional MOHID para a estação P8, com as medidas das campanhas de monitorização para o mesmo local e pontos mais próximos, à superfície, meio e fundo da coluna de água. (a) – nitratos; (b) – Oxigénio dissolvido; (c) – Clorofila a; (d) – azoto amoniacal

Observa-se na Figura 9 o modelo a simular a média dos valores medidos num determinado instante. Destaque-se alguns valores demasiado elevados de azoto amoniacal no ponto P8 que o modelo não simula. Estes valores devem-se muito provavelmente à intersecção da pluma do emissário, uma vez que a descarga é emitida exactamente no ponto P8. Também na clorofila se regista uma grande amplitude dos valores medidos, nos quais os mais elevados dizem respeito a medidas feitas à superfície, zona mais rica em fitoplâncton. Esta amplitude só poderá ser simulada quando o modelo de qualidade da água apresentar resolução tridimensional.

6. CONCLUSÕES

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 preditivo, perfila-se como a melhor forma de compreender, analisar, acompanhar e gerir sistemas de elevado dinamismo, como é o caso de estuários. A utilidade deste sistema 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 permite a utilização da filosofia pretendida.

O desenvolvimento de um sistema operacional de monitorização e previsão implica 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.

Os resultados de previsão dos níveis são bastante positivos, ainda que na zona interior do estuário uma melhoria e refinamento da batimetria poderá melhorar os resultados nessa zona. 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 a 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.

O modelo de qualidade da água reproduz relativamente bem a variabilidade temporal existente nos diversos parâmetros biogeoquímicos, no entanto, será necessário a utilização de discretização vertical para o cálculo destes parâmetros (neste momento o modelo de qualidade da água é apenas 2D), de modo a simular a variabilidade existente na coluna de água.

Os resultados de dispersão da pluma necessitam de futura validação, sendo neste momento esta tarefa ainda um pouco complexa. A utilização de ASV (*Autonomous Submarine Vehicle*) tem-se revelado como a forma mais eficaz de obter dados que permitam descrever a variabilidade espacial das plumas dos emissários.

7. BIBLIOGRAFIA

- Braunschweig, F. *Generalização de um modelo de circulação costeira para albufeiras*. Tese de Mestrado, 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.
- 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.
- Decyk, V. K.; Norton, C. D. ; Szymanski, B. K. – “Expressing Object-Oriented Concepts in Fortran90”, in *ACM Fortran Forum*, 16, 1997
- 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
- Leitão, P., *Integração de Escalas e Processos na Modelação do Ambiente Marinho*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal 2003
- 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
- Miranda, R. – *Nitrogen Biogeochemical Cycle Modeling in the North Atlantic Ocean*.- Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 1999
- 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 XII*, **2**, 1998, pp. 369-376.
- Pina, P. - *Integrated Approach to Study the Tagus Estuary Water Quality*. – Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2001
- Sousa, T. – *Previsão Meteorológica em Portugal Continental utilizando o modelo operacional e de investigação MM5*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2003

