

Gestão de zonas costeiras: aplicação à Ria Formosa (Sul de Portugal)¹

Coastal zones management: application to Ria Formosa (South of Portugal)

Pedro Duarte², Maria J. Guerreiro³, João Reia⁴, Luís Cancela da Fonseca⁵, António Pereira⁶, Bruno Azevedo⁷,
Manuela Falcão⁸, Dalila Serpa⁹

Resumo - As zonas costeiras representam uma pequena parte da área e do volume dos oceanos. No entanto, a sua importância como interface entre a terra e o mar é enorme. Mais de 60% da população humana vive a menos de 60 km do mar e, além disso, as zonas costeiras garantem uma série de serviços essenciais à humanidade. Estes ecossistemas funcionam como um mecanismo de convergência de todas as acções levadas a cabo pelo Homem nas bacias hidrográficas adjacentes, sendo por isso necessário, no espírito da Directiva Quadro da Água - DQA-2000/60/EC (UE, 2000), considerá-las na gestão desses sistemas. Apresenta-se, neste trabalho, um conjunto de ferramentas destinadas à gestão integrada de zonas costeiras, desenvolvidas no âmbito de um projecto europeu e utilizando como exemplo o Parque Natural da Ria Formosa (Sul de Portugal). Estas ferramentas incluem um modelo hidrológico das bacias hidrográficas e um modelo ecológico da zona costeira adjacente, um sistema de informação geográfica (SIG) e um sistema de apoio à decisão (SAD). O modelo das bacias permite prever os caudais afluentes à Ria Formosa e a qualidade da respectiva água, perante diversos cenários respeitantes à sua gestão, fornecendo assim condições de forçamento para um modelo ecológico desta laguna. O SAD encontra-se em desenvolvimento e destina-se a integrar informação ambiental e sócio-económica. O projecto é participado por técnicos do Parque Natural da Ria Formosa com responsabilidades na gestão deste sistema lagunar, de modo a permitir um entendimento eficaz entre investigadores e decisores.

Termos para indexação: Modelos hidrológicos, modelos ecológicos, sistemas de apoio à decisão

Abstract - Coastal zones represent a small part of the area and volume of the oceans. However, their importance as a land-sea interface is enormous. Over 60% of human population lives within 60 km of the sea, and coastal zones guarantee several essential services to humanity. These ecosystems work as a convergence mechanism of all human actions in adjacent watersheds, being necessary to be considered in their management, in accordance to the Water Framework Directive spirit. Several integrated coastal management tools are presented in this paper, developed for an European project using as an example Parque Natural da Ria Formosa (south of Portugal). These tools include an hydrological model, a coastal ecological model, a geographic information system, and a decision support system. The hydrological model predicts water flow and water quality to be input to the ecological model of the lagoon system. The decision support system is being developed to integrate the environmental and social-economic information. The end-users, with management responsibilities, allow an information interchange between researchers and decision makers.

Index terms: hydrological models, ecological models, decision support systems

¹ Recebido para publicação em 09/04/2006; aprovado em 02/10/2006.

Trabalho conduzido com o apoio financeiro de fundos europeus e insere-se no projecto Ditty e em colaboração com o Parque Natural da Ria Formosa, IMAR e IPIMAR

² Biólogo, Ph. D., Universidade Fernando Pessoa, e-mail: pduarte@ufp.pt

³ Eng. Agrícola, Ph. D., Universidade Fernando Pessoa, Praça 9 de Abril, 349, 4249-004 - Porto, Portugal, e-mail: mariajoao@ufp.pt

⁴ Biólogo, Parque Natural da Ria Formosa, e-mail: jpreia@yahoo.co.uk

⁵ Biólogo, Ph. D., IMAR, e-mail: lfonseca@ualg.pt

⁶ Eng. Electrotécnico, M.Sc., e doutorando, e-mail: apereira@ufp.pt

⁷ Eng. do Ambiente, Universidade Fernando Pessoa, e-mail: bazevedo@ufp.pt

⁸ Química, Ph.D., IPIMAR, e-mail: mfalcao@ipimar.ualg.pt

⁹ Bióloga, doutoranda, IPIMAR, e-mail: dserpa@ipimar.ualg.pt

Introdução

As zonas costeiras representam uma pequena parte da área e do volume dos oceanos. No entanto, a sua importância como interface entre a terra e o mar é enorme. Mais de 60% da população humana vive a menos de 60 km do mar, além disso, as zonas costeiras garantem uma série de serviços essenciais ao Homem: São das zonas mais produtivas dos oceanos, fornecendo alimentos através da pesca e da aquacultura; proporcionam locais de lazer; são a interface dos transportes marítimos; e, no entanto, são o receptor final de grande parte da poluição produzida pelo Homem, que atinge o mar através de fontes pontuais e difusas. O usufruto destes serviços reflecte-se numa grande pressão sobre os recursos naturais das zonas costeiras, principalmente no caso dos sistemas lagunares e dos estuários, que são mais procurados pelo Homem pelas suas condições de abrigo natural e de grande produtividade biológica. Estes ecossistemas funcionam como um mecanismo de convergência de todas as acções levadas a cabo nas bacias hidrográficas afluentes, sendo por isso necessário considerá-las na sua gestão, no espírito da Directiva Quadro da Água – DQA (UE, 2000).

Esta directiva da União Europeia identifica e classifica as massas de água, considerando o seu estado ecológico, prevê regras de monitorização e refere ferramentas a utilizar na sua caracterização e gestão, tais como modelos matemáticos e sistemas de informação geográfica (SIG). A classificação das massas de água e a definição do seu estado ecológico passa pelo desenvolvimento de projectos que permitam definir níveis de referência apropriados. A utilização de modelos matemáticos não é explicitada em detalhe no texto da DQA. Estes e outros aspectos serão refinados ao longo do tempo através do contributo de projectos europeus como o DITTY “Development of an Information Technology Tool for the Management of European Southern Lagoons under the influence of river-basin runoff”(DITTY, disponível em <http://www.dittyproject.org>).

Um dos conceitos centrais na gestão de zonas costeiras é a noção de capacidade de carga (CC), que pode definir-se como “o nível de alteração que um processo ou variável pode sofrer num dado ecossistema, sem alterar a estrutura e o funcionamento deste para além de limites aceitáveis (Limits of Acceptable Change ou LAC)” (Duarte, 2003; Duarte et al., 2003). Os LAC são um conceito utilizado na gestão turística com alguma frequência (Wearing & Neill, 1999). A sua definição não é fácil, pois se nalguns casos pode ser quantitativa e objectiva (por exemplo: concentrações limite de variáveis indicadoras

da qualidade da água, baseadas em critérios biológicos, de salubridade, etc.), noutras poderá ser mais vaga e baseada na percepção que as pessoas têm do ambiente (por exemplo: nível de alteração da paisagem).

Em função dos exemplos anteriores, pode concluir-se que nem sempre é fácil quantificar a CC. Por exemplo, no caso do turismo, a CC depende não só das características do meio receptor do mesmo, mas também do comportamento dos turistas (Poh, 2003). Naqueles casos em que uma definição quantitativa não pode ser obtida a priori, deve recorrer-se à gestão adaptada, seguindo os Princípios de Lisboa para a Governança Sustentável dos Oceanos (Constanza, et al., 1998), sendo que a CC vai sendo redefinida ao longo do tempo em função das alterações observadas. Por exemplo, no turismo subaquático em zonas de recife de coral, pode ajustar-se o número de visitas por dia em função das alterações que se vão observando nos recifes, de modo a garantir que a sua integridade é preservada. A integridade pode ser quantificada de diversas formas, com base na biodiversidade do recife, no número de corais quebrados pela passagem dos mergulhadores, na regressão da área de recife, etc.

A noção de CC pode aplicar-se para além das Ciências Naturais, pois existem dimensões sócio-culturais e psicológicas que importa considerar. Por exemplo, o turismo provoca impactos ambientais, mas também provoca alterações sociais, económicas e culturais que devem ser acauteladas com vista ao desenvolvimento sustentável, especialmente no caso do turismo de massas (Wearing & Neil, 1999).

Considerando os usos múltiplos que caracterizam os ecossistemas costeiros, torna-se necessário recorrer ao conceito integrado de CC, que pode ser representado por uma “roda ecológica” (Figura 1) (Yu & Bermas, 2003). A “roda ecológica” permite uma representação dos diversos atributos de um dado ecossistema segundo um conjunto de semi-eixos e dos respectivos LAC. A cada atributo poderá corresponder um índice adimensional que se aproxima de zero quando os LAC são excedidos. Cada dos atributos deve ser mantido acima dos LAC, de modo a garantir a sustentabilidade do ecossistema. Dado que existem sinergias entre diversos atributos, a alteração no índice de um deles poderá provocar alterações noutras índices. Por exemplo, o aumento da produção aquícola pode levar a uma redução da qualidade da água. A definição dos LAC deve ser baseada no melhor conhecimento disponível, através de uma interacção permanente entre os cientistas e os utilizadores e gestores dos ecossistemas. Podem ser usados modelos matemáticos para antecipar o resultado de diversos cenários de gestão. Importa incluir semi-eixos relativos a atributos sociais e económicos.

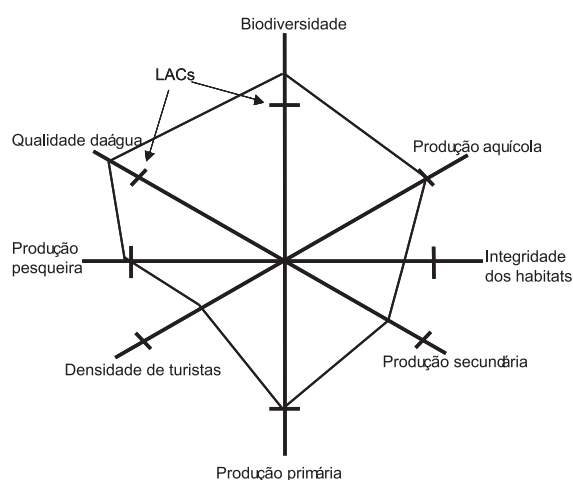


Figura 1 – “Roda ecológica” adaptada de Yu & Bermas (2003). Cada semi-eixo corresponde a um atributo dos ecossistemas costeiros. O centro da figura representa o pior cenário possível relativamente a todos os atributos. A cada semi-eixo correspondem limites de alteração aceitáveis (“Limits of Acceptable Change” ou “LAC”) (ver texto)

A implementação de modelos de gestão que permitam considerar todos os aspectos acima referidos é um problema complexo, pois passa pela utilização integrada de diversas “ferramentas” – bases de dados, sistemas de informação geográfica (SIG), modelos de bacia, modelos ecológicos das zonas costeiras, análises sócio-económicas e sistemas de apoio à decisão (SAD). O projecto DITTY acima referido tem como objectivo o desenvolvimento e implementação destas ferramentas a um conjunto de sistemas lagunares do Sul da Europa.

O principal objectivo deste trabalho é apresentar a metodologia seguida no DITTY e a sua implementação na Ria Formosa (Sul de Portugal), como um paradigma adequado à gestão de qualquer zona costeira. Será dada ênfase às ferramentas informáticas desenvolvidas durante o projecto, discutindo a sua aplicabilidade geral.

Material e Métodos

A abordagem geral seguida no DITTY considera a importância de integrar os fenómenos que ocorrem nas bacias hidrográficas com os das zonas costeiras adjacentes (Figura 2). Para tal recorre à utilização de modelos hidrológicos de bacia, tais como o SWAT (“Soil Water Assessment Tool”), com o objectivo de prever os caudais afluentes às zonas costeiras em função de diversas estratégias de gestão das bacias hidrográficas, bem como a qualidade da água afluente. Os resultados obtidos pelos

modelos de bacia servem assim para forçar modelos das zonas costeiras, que englobam os processos hidrodinâmicos de transporte e os processos biogeoquímicos. Estes modelos permitem analisar as implicações de diversos cenários de gestão das zonas costeiras relativamente à sua produtividade e ao seu estado ecológico. Os resultados da análise dos referidos cenários e as suas implicações sócio-económicas serão considerados na tomada de decisão com o auxílio de SAD’s. Os SIG’s têm um papel central em todo este processo pois servem de repositório e de ferramenta de análise de toda a informação georeferenciada utilizada e produzida pelos modelos.

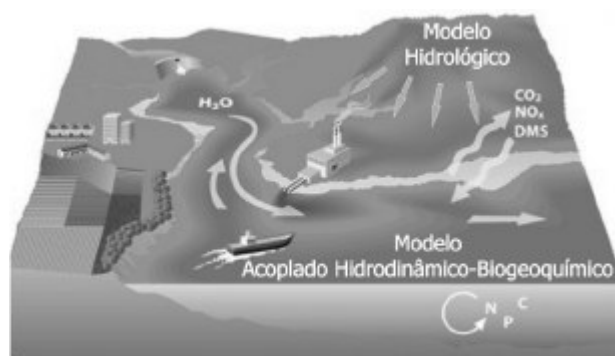


Figura 2 – Integração de modelos hidrológicos com modelos da zona costeira (adaptado de <http://www.dittyproject.org/index.asp>)

Um dos aspectos fulcrais do DITTY é o envolvimento no projecto de equipas de investigação e de “end-users”, com responsabilidades na gestão dos ecossistemas estudados, ou algum tipo de interesse económico nos mesmos. Um dos ecossistemas costeiros incluído no projecto DITTY é a Ria Formosa no Algarve (Sul de Portugal) (Figura 3). Os “end-users” do projecto são os técnicos do Parque Natural da Ria Formosa – organismo dependente do Instituto de Conservação da Natureza, com responsabilidades directas na gestão da Ria.

Nos parágrafos seguintes será apresentada uma breve descrição da Ria Formosa, seguida de uma apresentação sucinta da metodologia adoptada no desenvolvimento/implementação de diversas “ferramentas” utilizadas no DITTY: Modelo hidrológico, modelo da zona costeira e SAD. Para mais detalhes podem consultar-se diversos relatórios e artigos (Duarte et al., 2005a & b; Guerreiro, 2005; Pereira et al., 2005).

Local de estudo

A Ria Formosa é um sistema lagunar de canais e sapais separado do oceano por um conjunto de ilhas-barreira arenosas que se estende ao longo de 50 km do litoral Algarvio, ocupando uma área de cerca de 10.500 ha. É um

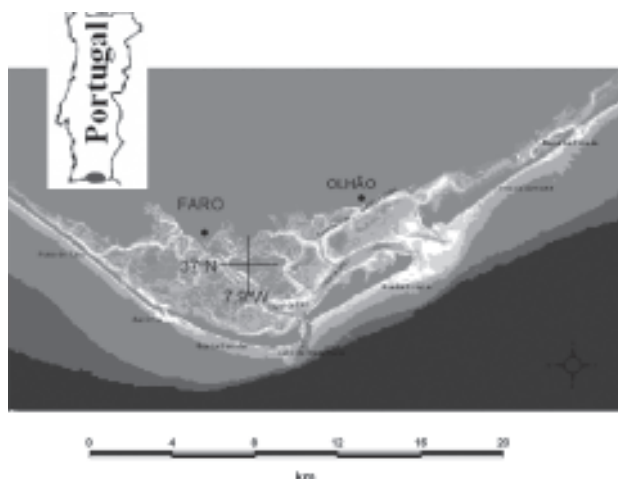


Figura 3 – Localização da Ria Formosa no sul de Portugal

ecossistema de grande importância, pois serve de local de reprodução e desenvolvimento de um grande número de espécies marinhas. As suas zonas pouco profundas de espriado de maré servem de áreas de cultivo de bivalves e piscicultura, apresentando uma actividade turística muito grande. Cerca de 5000 famílias dependem da produção de amêijoas, uma das principais actividades económicas na Ria Formosa. As cidades de Faro, Olhão e Tavira situam-se nas suas margens e, durante o Verão, a população local (aproximadamente 125.000 habitantes) aumenta cerca de três vezes. O desenvolvimento turístico e a conservação da natureza nem sempre têm sido levados em conta de forma compatível. Urge, pois, criar um modelo de desenvolvimento sustentável que harmonize o objectivo de melhorar as condições socio-económicas das populações que dependem da Ria Formosa, com o de garantir a conservação do ecossistema.

Modelo hidrológico

Neste trabalho foi realizada a calibração e validação do escoamento do sistema hidrológico da Ria Formosa usando-se o modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool). Os resultados do modelo hidrológico SWAT são usados como dados de entrada para o modelo ecológico EcoDynamo, implementado para este sistema costeiro (cf. – 3.4).

O modelo SWAT é um modelo desenvolvido pelo USDA Agricultural Research Service que permite avaliar o impacto da gestão do solo, por longos períodos, no escoamento, transporte de sedimentos e produção de agro-químicos em bacias hidrográficas complexas com variados tipos de solo, ocupação e condições de gestão do mesmo. O SWAT é um modelo físico, contínuo, adequado à avaliação diária, mensal e anual, porém não é uma ferramenta adequada para simular eventos de cheias (Neitsch et al.,

2002). Este modelo necessita de informação específica de clima, topografia, tipos, usos e gestão do solo para modelar o escoamento, movimento de sedimentos, crescimento das plantas e ciclos de nutrientes (Neitsch et al., 2002).

Os dados usados para forçar, calibrar e validar o modelo foram obtidos através da Internet no site do Instituto Nacional da Água (INAG) (www.inag.pt) e de instituições locais - Direcção Regional do Ambiente e Ordenamento do Território Algarve (DRAOT). Os dados meteorológicos e de escoamento das estações existentes estão disponíveis para “download” através do site do INAG. Os dados de solos usados no modelo foram obtidos no Atlas do Ambiente (www.inag.pt). As suas características obtidas em Cardoso (1965). Usou-se o modelo digital do terreno à escala 1:100.000.

Os registos diários das estações meteorológicas foram usados para forçar o modelo SWAT. Este modelo permite falhas nos registos e usa um gerador de clima para preencher essas falhas. Para tal, o modelo utiliza os valores médios mensais da precipitação, desvio padrão e coeficiente de assimetria da precipitação diária num determinado mês, probabilidade de um dia húmido seguir um dia seco, de um dia húmido seguir um dia húmido e a precipitação máxima com duração de meia hora no mês (Luzio et al., 2002). Os parâmetros estatísticos necessários para preencher as falhas existentes nos registos dos parâmetros meteorológicos foram avaliados por Guerreiro & Martins (2004). As variáveis climáticas necessárias para o cálculo do balanço hídrico são, além da precipitação diária, a temperatura diária máxima e mínima, a radiação solar, a velocidade do vento e a humidade relativa.

Há três estações hidrométricas com registos de escoamento diários mensais, anuais e caudal máximo anual em linhas de água afluentes à Ria Formosa. Tal como esperado, o número de registos de escoamento é muito inferior ao de precipitação, variando de um a 37 anos. Os dados obtidos nestes locais foram usados para a calibração do modelo SWAT. A calibração e a validação do modelo foram realizadas para escoamento usando-se as estações hidrométricas da Bodega e de Curral Boieiros, respectivamente. Os parâmetros de calibração foram as características e ocupação dos solos. Usou-se a análise de regressão linear Modelo II, sugerida por Laws & Archie (1981), com o método do eixo principal recomendado por Mesplé et al. (1996) e descrito por Sokal e Rohlf (1995), para comparar valores previstos e observados. As bacias que compõem o sistema hidrológico da Ria Formosa apresentam-se na Figura 4. O sistema de drenagem da bacia escoou para o sistema lagunar mesotidal da Ria Formosa.

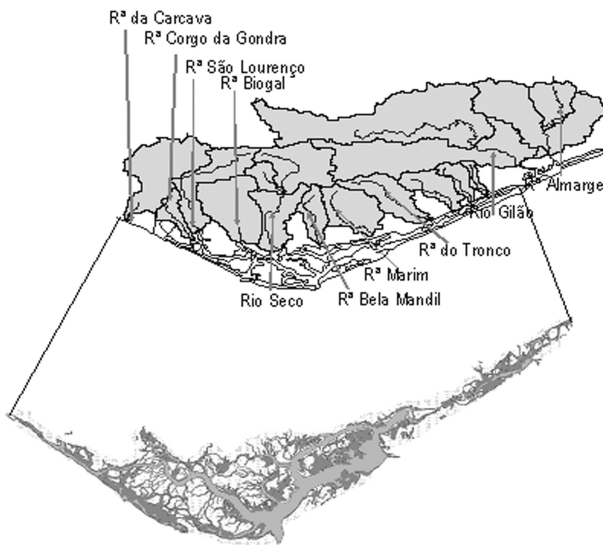


Figura 4 – Domínios dos modelos hidrológico e ecológico da Ria Formosa. Na parte superior da figura mostram-se as diversas linhas de água que drenam para a Ria. Na parte inferior destaca-se a área da Ria representada no modelo ecológico

Modelo ecológico da Ria Formosa

O modelo implementado para a Ria Formosa simula os processos hidrodinâmicos de transporte, os processos termodinâmicos e os processos biogeoquímicos na área da Ria Formosa representada na Figura 4. Os processos hidrodinâmicos são forçados pelas variações do nível da maré na fronteira marinha e pelas descargas de água doce nas fronteiras fluviais. O módulo hidrodinâmico simula o campo de velocidades da corrente com as equações de Navier-Stokes e a equação da continuidade, adaptadas de Neves (1985) com base numa malha de diferenças finitas (Vreugdenhil, 1989), e resolve a equação do transporte (Knauss, 1977) a partir do campo de velocidades e dos processos de produção e consumo de cada variável. Estes processos são calculados pelos módulos termodinâmico e biogeoquímico (Duarte et al., 2005a).

O módulo termodinâmico simula a temperatura da água a partir de equações descritas em Portela e Neves (1994). Os processos termodinâmicos são forçados pelas trocas de água, simuladas no módulo hidrodinâmico, pela radiação solar e pelas trocas energéticas com a atmosfera.

Os processos biogeoquímicos são forçados pela intensidade da luz solar, velocidade da corrente, descargas dos rios, trocas com o mar e temperatura da água, calculada pelo módulo termodinâmico. As principais variáveis simuladas são as concentrações de nutrientes, oxigênio dissolvido, matéria em suspensão e fitoplâncton na coluna de água, concentrações de nutrientes e oxigênio na água intersticial dos sedimentos, teor em azoto e

fósforo dos sedimentos, biomassa das macroalgas *Ulva* sp. e *Enteromorpha* sp., da fanerogâmica *Zostera noltii* e das amêijoas *Ruditapes decussatus*. A simulação das variáveis referidas implica o cálculo de um número elevado de processos físicos, tais como as trocas difusivas entre os sedimentos e a coluna de água e os processos de adsorção/desorção dos fosfatos; biogeoquímicos, tais como a mineralização, nitrificação e desnitrificação; fisiológicos, tais como a fotossíntese dos produtores primários referidos e a respiração de todas os organismos simulados; e demográficos, tais como a mortalidade das amêijoas (Duarte et al., 2005b).

O software utilizado para implementar o modelo foi o EcoDynamo (Pereira & Duarte, 2005), implementado em C++ com base numa metodologia de programação orientada a objectos. A abordagem utilizada é semelhante ao EcoWin (Ferreira, 1995). No entanto, o EcoDynamo foi especialmente desenvolvido para permitir a implementação de modelos hidrodinâmicos-biogeoquímicos acoplados, incluindo um sistema de comunicação entre os objectos, que permite visualizar as interações entre os mesmos, e uma linguagem de comunicação com um sistema de apoio à decisão (cf. – 3.5). Cada objecto simula um conjunto de processos e de variáveis de forma modular. Na Tabela 1 apresentam-se os objectos e variáveis simulados pelo modelo. O software tem uma interface amigável em Windows que permite definir quais os objectos a incluir numa simulação, quais as variáveis a visualizar e o tipo de “output” a utilizar (gráficos, ficheiros ou tabelas). Ligando ou desligando diversos objectos pode avaliar-se a importância relativa de cada um e dos processos por ele representados nas previsões do modelo. Os objectos foram programados de modo a incluir uma interface com outros programas em Fortran, permitindo que sejam utilizados por outras plataformas de modelação.

A calibração e validação do módulo hidrodinâmico foram efectuadas com base em dados de velocidade da corrente e elevação do nível da água recolhidos pelo Instituto Hidrográfico em diversos pontos da Ria Formosa ao longo de cerca de um mês, no ano de 2001 (IH, 2001). A calibração do módulo biogeoquímico está a ser levada a cabo com base em dados de qualidade da água e biogeoquímica dos sedimentos recolhidos no âmbito de diversas campanhas realizadas pelo Instituto das Pescas e do Mar.

Sistema de Apoio à Decisão

O processo de tomada de decisão relativo a diferentes opções de gestão de um ecossistema costeiro é relativamente complexo, dadas as inúmeras variáveis envolvidas e a complexidade das suas interações. Esta

Tabela 1 – Objectos do EcoDynamo implementados no modelo ecológico da Ria Formosa e principais variáveis associadas

Tipos de objectos	Nomes dos objectos	“Outputs” dos objectos
Objectos responsáveis pelo forçamento	“Vento”	Velocidade do vento (a partir de séries temporais)
	“Temperatura do ar”	Temperatura do ar vento (a partir de séries temporais)
	“Temperatura da água”	Fluxos radiativos entre a água e a atmosfera e temperatura a água
	“Intensidade luminosa”	Radiação solar à superfície e a qualquer profundidade
	“Marés”	Altura das marés a partir das harmónicas do local
Objectos que simulam variáveis de estado	“Hidrodinâmico”	Nível da água, velocidade e direcção da corrente
	“Biogeoquímica dos sedimentos”	Concentrações de amônia, nitrato, nitrito, fosfato e oxigênio na água intersticial, fosfato adsorbido, carbono, azoto e fósforo orgânicos
	“Substâncias dissolvidas”	Concentrações de amônia, nitrato, nitrito, fosfato e oxigênio na coluna de água
	“Matéria em suspensão”	Concentrações de matéria particulada total e orgânica, carbono, azoto e fósforo particulados e turbidez da água
	“Fitoplâncton”	Biomassa, produtividade e quotas celulares dos diversos nutrientes
	“ <i>Enteromorpha sp.</i> ”	Biomassa, produtividade e quotas celulares dos diversos nutrientes
	“ <i>Ulva sp.</i> ”	Biomassa, produtividade e quotas celulares dos diversos nutrientes
	“ <i>Zostera noltii</i> ”	Biomassa, produtividade e quotas celulares dos diversos nutrientes
	“ <i>Ruditapes decussates</i> ”	Comprimentos das amêijoas, biomassa, densidade, taxas de filtração, ingestão, assimilação e crescimento

complexidade torna impraticável o recurso a algoritmos de optimização baseados em relações fixas entre as variáveis. Na verdade, podem existir diferentes opções “óptimas”, privilegiando um ou outro dos atributos de um ecossistema (ver Figura 1). Os modelos ecológicos permitem analisar diversos cenários de gestão, alterando “virtualmente” diversos parâmetros, por exemplo, áreas de cultivo de diversas espécies, densidades de cultivo, alterações nas áreas de sapal, alterações batimétricas, uso das bacias hidrográficas, etc.

Os resultados obtidos quanto a diversas variáveis indicadoras da qualidade da água e da produtividade do ecossistema podem ser utilizados como critério de classificação da qualidade dos diferentes cenários. A situação ideal será os resultados de cada cenário serem associados a uma análise de custo-benefício. O número de cenários a analisar é potencialmente grande, a sua análise um processo iterativo que deve ser sujeito a uma triagem quanto a critérios de qualidade ambiental, condicionalismos legais, etc. Deste modo, importa criar ferramentas que permitam automatizar a geração e análise de cenários.

Em função do exposto, optou-se por desenvolver um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) baseado em “agentes inteligentes” (AI) (Norvig & Russel, 1995; Wooldridge, 2002; Reis, 2003). A arquitectura dos AI a serem desenvolvidos, bem como a linguagem de comunicação entre os mesmos e o modelo – ECOLANG - encontram-se descritas em Pereira et al. (2005). A ideia geral será os AI iniciarem as simulações, terem acesso aos resultados, pro-

cederem à sua análise e, em função da mesma, definirem os parâmetros de uma nova simulação, reiniciarem o modelo, e assim por diante, até um conjunto de objectivos serem atingidos. Estes objectivos podem ser, por exemplo, a maximização da produção aquícola, a melhoria da qualidade da água, etc. Os “agentes” simularão assim o procedimento típico de um utilizador do modelo, que de modo iterativo procura soluções adequadas entre os muitos cenários de gestão possíveis, de modo a manter um conjunto de atributos acima dos LAC indicados na Figura 1.

Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados alguns resultados relativos à calibração do modelo hidrológico e do modelo ecológico, bem como algumas das aplicações dos mesmos para analisar diversos cenários. Será ainda discutida a utilidade das ferramentas utilizadas numa perspectiva de gestão integrada da zona costeira.

Modelo hidrológico

A região de estudo tem um clima típico do Algarve (Sul de Portugal), com aproximadamente 80% da precipitação no semestre húmido (Outubro a Março) e 20% no semestre seco (Abril a Setembro). Em média, Dezembro é o mês mais húmido com cerca de 20% da precipitação anual. Contrariamente, os meses mais secos, Julho e Agosto apresentam menos de 1% da precipitação anual (DRAOT, 2000).

A maior parte das linhas de água afluentes à Ria Formosa são efémeras. Há no entanto rios perenes, como é o caso do Gilão. No entanto, o caudal escoado na época de estiagem é diminuto. Os escoamentos anuais e mensais foram adequadamente simulados pelo SWAT como pode ser observado nas Figuras 5 e 6, respectivamente. Os resultados da Análise de regressão Modelo II, indicam que a variância explicada pelo modelo foi significativa na maior parte dos meses à excepção dos meses de verão (Julho, Agosto e Setembro). Isto deve-se provavelmente à ausência de chuva nesses meses, sendo o SWAT incapaz de prever o escoamento adequadamente. O modelo foi usado para gerar dados de escoamento anual, mensal e diário a serem introduzidos como função forçadora no EcoDynamo.

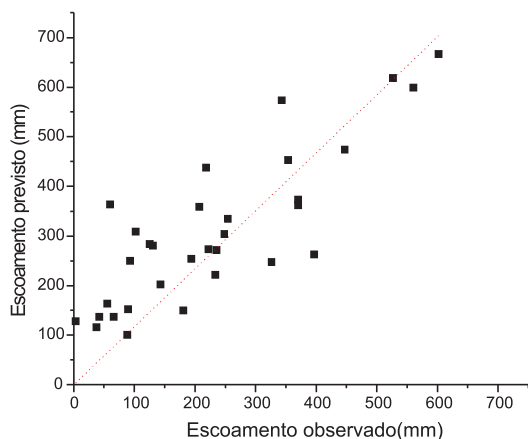


Figura 5 – Relação entre escoamentos anuais previstos e observados.

Modelo ecológico da Ria Formosa

Na Figura 7 apresenta-se um exemplo do tipo de comparações efectuadas entre valores de velocidade da corrente medidos na Ria Formosa e previstos pelo modelo. Conforme se pode observar, os valores previstos são próximos dos medidos. Este tipo de comparação foi efectuada para um total de cinco estações. Foram também efectuadas comparações entre as elevações do nível da água medidas e previstas, sendo que a sobreposição das medições e das observações é bastante significativa ($r^2 > 0.9$).

Na Figura 8a e b apresentam-se duas imagens que representam o padrão geral de circulação previsto pelo modelo através de uma representação do campo de velocidade

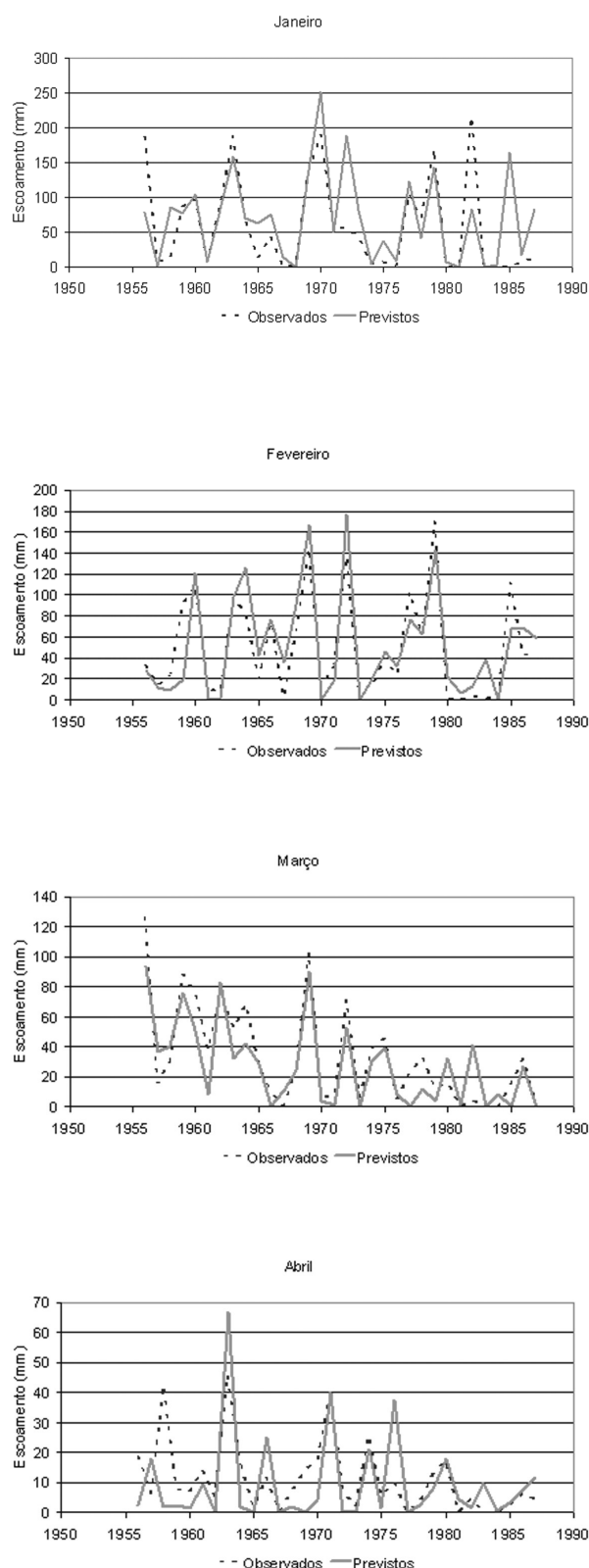


Figura 6 – Escoamentos previstos e observados (linha descontinua)

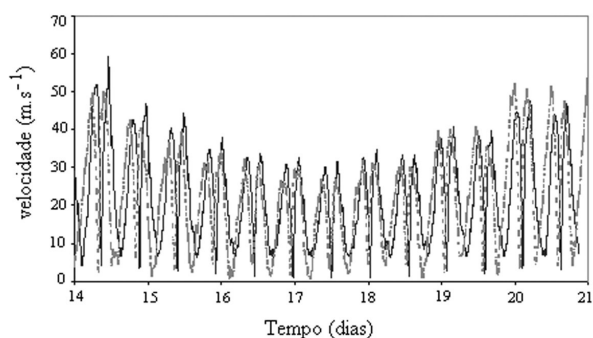


Figura 7 – Exemplo de comparação entre valores medidos (linha descontinua) (IH, 2001) e valores previstos (linha contínua) de velocidade da corrente, utilizada no processo de calibração e validação do módulo hidrodinâmico.

des médias e a concentração de clorofila prevista pelo modelo durante uma das simulações de calibração do módulo biogeoquímico. Este tipo de representação pode ser obtida directamente durante as simulações, a partir do EcoDynamo, ou a posteriori, a partir de resultados gravados e com recurso a software gráfico. A gravação de resultados sucessivos ao longo da simulação permite combinar estas figuras numa animação, ou seja, uma representação dinâmica das variáveis representadas. Além disso, o padrão de cores atribuídas diferentes variáveis poder ser utilizado para demonstrar a sua dispersão a partir, por exemplo, de uma fonte localizada no domínio do modelo.

O modelo está a ser utilizado para analisar um conjunto de cenários que se sintetizam na Tabela 2. Estes cenários foram definidos após diversos “workshops” que envolveram os “end-users” do projecto (técnicos do Parque Natural da Ria Formosa) e os investigadores responsáveis pela implementação do modelo e realização das análises de cenários. Conforme se pode verificar, os aspectos considerados mais relevantes (“drivers” das opções de gestão a considerar) foram o cultivo de bivalves, as áreas de sapal, a população e a circulação da água. Relativamente a cada destes “drivers” consideraram-se diversos cenários que estão a ser analisados com o modelo e comparados com a situação actual.

Para cada cenário foram definidos indicadores ambientais, ou seja, variáveis e processos calculados pelo modelo que servirão para avaliar os resultados dos diferentes cenários. Em função desses resultados serão recomendadas opções de gestão. O SAD está a ser desenvolvido em simultâneo com a realização das simulações destinadas à análise de cenários, esperando-se ter um protótipo concluído antes do final do projecto (Abril de 2006). No âmbito do DITTY está a ser realizada uma análise sócio-económica aos diferentes cenários que se espera venha a contribuir para as opções de gestão.

Os modelos utilizados em cada um destes ecossistemas variam em função das especificidades dos mesmos, do software disponível e preferido pelas diferentes equipas de investigação. Uma das especificidades do

Tabela 2 – Cenários de gestão em análise para a Ria Formosa, no âmbito do projecto DITTY

“Driver”	Cenário	Indicador ambiental	Opções de gestão
Cultivo de bivalves	Alterações na biomassa de bivalves produzidos - aumento/diminuição/sem alteração	Índice de condição, mortalidade, consumo de oxigénio	Permissões relativas ao cultivo
	Alterações no nível das zonas intermareais por adição de areia - Aumento/sem alteração	Penetração de oxigénio nos sedimentos (processos biogeoquímicos)	Aumentar/diminuir a densidade de bivalves
	Alterações na área de cultivo - aumento/diminuição/sem alteração	Perdas e ganhos nas áreas de sapal	Aumentar/diminuir a áreas de cultivo
Áreas de sapal	Alterações nas áreas de sapal motivadas por actividades económicas (turismo e navegação) e recuperação das áreas de sapal – aumento/diminuição/sem alteração	Produtividade do ecossistema	Permissões relativas ao turismo e à navegação
		Alterações nos processos biogeoquímicos	Recuperação das áreas de sapal
População residente e população flutuante (turistas)	Alteração na localização das ETARs e no seu número - aumento/sem alteração	Cargas de azoto, fósforo, coliformes fecais e sólidos suspensos	Alterações na localização e número de ETARs
Circulação da água	Profundidade e largura dos canais de ligação com o mar aumento /diminuição/sem alteração	Correntes de maré	Realizar dragagens
		Batimetria Tempo de residência da água	Abrir ou fechar canais

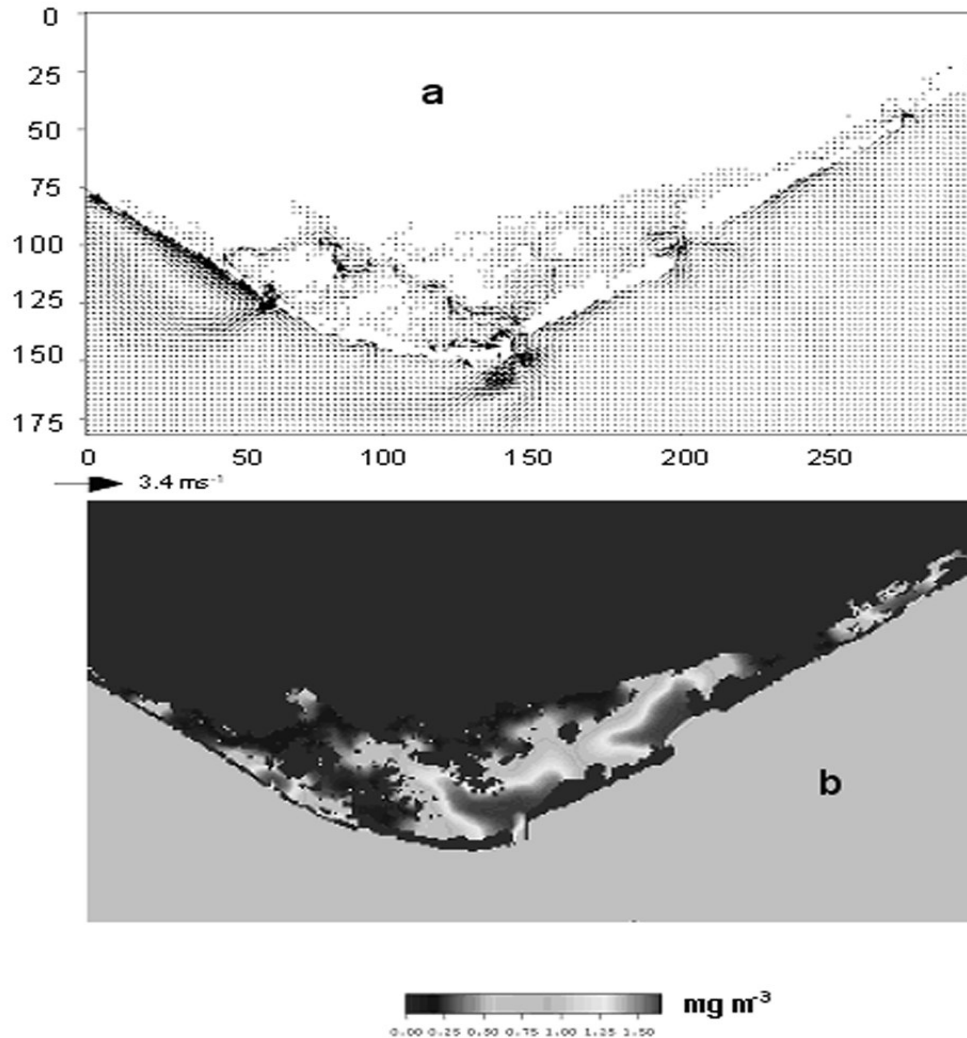


Figura 8 – Painel superior: Circulação residual na Ria (campo de velocidades) prevista pelo modelo (ver texto). Painel inferior: Concentração de clorofila prevista pelo modelo durante uma das simulações de calibração do módulo biogeoquímico

modelo implementado para a Ria Formosa é a de permitir simular as zonas intermareais, que são cobertas de água durante a preia-mar e descobertas durante a baixa-mar. Dado que a maior parte da Ria Formosa é constituída por zonas deste tipo, é muito importante que o modelo tenha a característica referida. Apesar da diversidade de modelos utilizados no DITTY, tem sido feito um esforço para se produzir

uma biblioteca de “objectos” (cf. – 3.4) que possam ser utilizados por qualquer equipa de investigação que deseje construir um modelo a partir de diferentes módulos, utilizando uma plataforma diferente do EcoDynamo. Deste modo, um dos contributos do DITTY deverá ser uma pequena biblioteca de sub-modelos hidrodinâmicos e biogeoquímicos, com uma interface que permite o seu aces-

so a partir de diversas plataformas de modelação (Duarte et. al, in prep). Uma das maiores dificuldades encontradas é tornar os modelos de utilização amigável para os “end-users”. Sempre que se pretende definir um novo cenário, é necessário alterar um ou vários ficheiros e reinicializar o modelo. Este processo requer um conhecimento algo detalhado do software. Por exemplo, para alterar a batimetria utilizada no modelo biogeoquímico da Ria Formosa, de modo a simular o efeito de uma dragagem, é necessário alterar o ficheiro de morfologia. Este ficheiro pode ser aberto com uma folha de cálculo ou um editor de texto. Depois, é preciso “navegar” pelo ficheiro até encontrar as coordenadas das células da malha do modelo cuja profundidade se pretende alterar. O ideal será que as alterações possam ser definidas de modo interactivo através de um interface gráfico.

Deste modo, o utilizador pode “navegar” num mapa da Ria Formosa, visualizar as coordenadas geográficas, tal como num SIG, e graficamente alterar a batimetria nos lugares onde se prevê vir a realizar uma determinada dragagem. O interface regista as alterações no ficheiro de morfologia, sem que o utilizador tenha de conhecer detalhes do mesmo. Um interface deste tipo está neste momento a ser ultimado, encontrando-se descrito em Agnetis et al. (2006). Este interface é parte integrante do SAD referido acima (cf. – Sistema de Apoio à Decisão).

Conclusões

A Directiva Quadro da Água, directiva da União Europeia, identifica e classifica as massas de água, considerando o seu estado ecológico, prevê regras de monitorização e refere ferramentas a utilizar na sua caracterização e gestão, tais como modelos matemáticos e sistemas de informação geográfica (SIG).

Desenvolveu-se, calibrou-se e validou-se um modelo ecológico – EcoDynamo - para classificação do estado ecológico das águas do Parque Natural da Ria Formosa, no espírito da Directiva Quadro da Água. O modelo hidrológico SWAT foi calibrado e validado para gerar dados de escoamento a serem introduzidos como função forçadora neste modelo ecológico.

O modelo EcoDynamo permite a visualização da modificação temporal das variáveis nos diversos cenários, facilitando a sua análise pelos gestores e, consequentemente, auxiliando-os nas tomadas de decisão quanto à gestão do Parque Natural da Ria Formosa, cujos aspectos mais relevantes são o cultivo de bivalves, áreas de sapal, população e circulação da água.

A metodologia geral do projecto DITTY está a ser aplicada na Ria Formosa, no Mar Menor (Espanha), na Lagoa de Thau (França), na baía de Sacca di Goro (Itália) e no Golfo de Gera (Grécia). Pelos resultados obtidos até ao presente, quer a nível técnico, quer a nível da interacção entre investigadores e “end-users”, considerando em particular a experiência da Ria Formosa, parece ser uma metodologia de bastante utilidade e de aplicação generalizável.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo projecto DITTY “Development of an Information Technology Tool for the Management of European Southern Lagoons under the influence of river-basin runoff” (contrato nº EVK3-CT-2002-00084-DITTY).

Referências Bibliográficas

- CARDOSO, J. V. **Os solos de Portugal, sua classificação, caracterização e génese**. Secretaria de Estado da Agricultura, Direcção Geral dos Serviços Agrícolas, Lisboa, 1965.
- CONSTANZA, R.; ANDRADE, F.; ANTUNES, P.; BELT, M. V. D.; BOESCH, D. F.; BOERSMA, P. D.; CATARINO, F.; HANNA, S. S.; LIMBURG, K.; LOW, B.; MOLITOR, M.; PEREIRA, J. G.; RAYNER, S.; SANTOS, R.; WILSON, J.; YOUNG, M. Ecological economics and sustainable governance of the Oceans. **In: Ecological economics and sustainable governance of the Oceans**, ed. R. Costanza e F. Andrade. Portugal: Fundação Luso-Americana, 1998, p.11-68.
- DITTY. [Em linha]. Disponível em <http://www.dittyproject.org/>. [Consultado 12/9/2005].
- DRAOT. **Plano de Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Algarve**. Direcção Regional do Ambiente e Ordenamento do Território. Ministério do Ambiente, 2000.
- DUARTE, P. A review of current methods in the estimation of environmental carrying capacity for bivalve culture in Europe. In: Determining environmental carrying capacity of coastal and marine areas: progress, constraints and future options, 11., PEMSEA. **Proceedings...** PEMSEA: H. Yu and N. Bermas, 2003, p.37-51.
- DUARTE, P.; MENESES, R.; HAWKINS, A. J. S.; ZHU, M.; FANG, J.; GRANT, J. Mathematical modelling to assess the carrying capacity for multi-species culture within coastal water. **Ecological Modelling**, v,168, p.109-143, 2003.
- DUARTE, P.; AZEVEDO, B.; PEREIRA, A. **Hydrodynamic Modelling of Ria Formosa (South Coast of Portugal) with EcoDynamo**. DITTY report. Disponível em <http://www.dittyproject.org/Reports.asp>, 2005a
- DUARTE, P.; PEREIRA, A.; FALCÃO, M.; SERPA, D.; AZEVEDO, B. Biogeochemical modelling of Ria Formosa (South Coast

- of Portugal) with EcoDynamo. DITTY report. Disponível em <http://www.dittyproject.org/Reports.asp>, 2005b.
- DUARTE, P.; PEREIRA, A.; NORRO, A., in prep. **Different modelling tools of aquatic ecosystems: A proposal for a unified approach.**
- FERREIRA J. G. EcoWin – An Object-oriented Ecological Model for Aquatic Ecosystems. **Ecological Modelling**, v.79, P.21–34, 1995.
- GUERREIRO, M. J.; MARTINS, C. Parameterização das Variáveis Climáticas Necessárias para Uso do Modelo SWAT. **Revista da Faculdade de Ciência e Tecnologia**, Universidade Fernando Pessoa, v.1, p.117-122, 2004.
- GUERREIRO, M. J. **Calibration of SWAT Model: Ria Formosa Basin (South Coast of Portugal).** DITTY report. Disponível em <http://www.dittyproject.org/Reports.asp>, 2005.
- IH - Instituto Hidrográfico. Proj. OC4102/01, **Maria Formosa, Relatório Técnico Final, Rel. TF. OC 04/2001, Monitorização Ambiental.** Instituto Hidrográfico, Divisão de Oceanografia, 2001.
- Knauss, J. A. **Introduction to physical oceanography.** Prentice-Hall, 1997. 309p.
- LAWS, E. A.; AECHIE, J. W. Appropriate use of regression analysis in marine biology, **Marine Biology**, v.65, p.99–118, 1981.
- LUZIO, M. D.; SRUNIVASAN, R.; ARNOLD, J. G.; NEITSCH, S. L. **Arcview Interface for Swat2000. User's Guide.** Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, 2002. 337p.
- MESPLÉ, F.; TROUSSELIER, M.; CASELLAS, C.; LEGENDRE, P. Evaluation of simple statistical criteria to qualify a simulation, **Ecological Modelling**, v.88, p.9–18, 1996.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINI, J. R.; LLIAMS, J. R.; KING, K. W. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation.** Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, 2002.
- NEVES, R. J. J. **Étude expérimentale et modélisation mathématique des circulations transitoire et résiduelle dans l'estuaire du Sado.** Tese de doutoramento, Universidade de Liège, 1985.
- NORVIG, P.; RUSSEL, S. J. **Artificial Intelligence: a modern approach.** Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1995. 932p.
- PEREIRA, A.; DUARTE, P. **EcoDynamo: Ecological Dynamics Model Application.** DITTY report. Disponível em <http://www.dittyproject.org/Reports.asp>, 2005.
- PEREIRA, A.; DUARTE, P.; REIS, L. P. **ECOLANG – A communication language for simulations of complex ecological systems.** In: EUROPEAN CONFERENCE on MODELLING AND SIMULATION, 19., 2005, Local. **Proceedings...** editado por I. MERKURYEV, R.; ZOBEL, e.; E. KERCKHOFFS.
- AGNETIS, A.; BASOSI, R.; CABALLERO, K.; CASINI, M.; CHESI, G.; CIASCETTI, G.; DETTI, P.; FEDERICI, M.; FOCARDI, S.; FRANCHI, E.; GARULLI, A.; MOCENNI, C.; PAOLETTI, S.; PRANZO, M.; TIRIBOCCHI, M.; TORSELLO, L.; VERCELLI, A.; VERDESCA, D.; VICINO A. **Development of a Decision Support System for the management of Southern European lagoons.** Center for Complex Systems Studies University of Siena, Siena, Italy. Disponível em http://www.dittyproject.org/Article/WP8_DSS_structure_final.pdf), 2006.
- POH, P. W. Tourism carrying capacity: Assessment and application. In: DETERMINING ENVIRONMENTAL CARRYING CAPACITY OF COSTAL AND MARINE AREAS: PROGRESS, CONSTRAINTS AND FUTURE OPTIONS, 11., 2003, PEMSEA. **Proceedings...** PEMSEA: editado por H. Yu and N. Bermas, p.131-142.
- PORTELA, L. I.; NEVES, R. Modelling temperature distribution in the shallow Tejo estuary. In: TSAKIRIS & SANTOS. **Advances in Water Resources Technology and Management.** Balkema: Rotterdam, p.457–463, 1994.
- REIS, L. P. **Coordenação em Sistemas Multi-Agente: Aplicações na gestão Universitária e no Futebol Robótico.** 451 Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J. **Biometry, The principles and practice of statistics in biological research.** W.H. Freeman and Company, 1995. 887p.
- UE, **Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho que estabelece um Quadro de Acção Comunitária no Domínio da Política da Água.** Jornal Oficial da Comunidade Europeia de 22.12.2000, Bruxelas. 72p.
- VREUGDENHIL, C. B. **Computational hydraulics, an introduction.** Springer-Verlag, 1989. 183p.
- WEARING, S.; NEIL, J. **Ecotourism: Impacts, potentials and possibilities.** Butterworth-Heinemann, 1999, 163 p.
- WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to Multi-Agent Systems,** John Wiley & Sons, 2002. 348p.
- YU, H.; BERMAS, N. (editores). Determining environmental carrying capacity of coastal and marine areas: progress, constraints and future options, 11., PEMSEA. **Proceedings...** PEMSEA, 2003, 156p.