

PLATAFORMA WEB DE SUPORTE AO SISTEMA DE MODELAÇÃO DA REDE HIDROGRÁFICA DA BACIA DO RIO AVE

WEB BASED TECHNOLOGICAL PLATFORM TO SUPPORT RIVER AVE BASIN MODELLING SYSTEM

José L. S. Pinho

Professor Auxiliar // Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga // jpinho@civil.uminho.pt

José M. P. Vieira

Professor Catedrático // Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga // jvieira@civil.uminho.pt

Rui P. Pinho

Engenheiro Informático // Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga // rppinho@civil.uminho.pt

José M. Araújo

Engenheiro Civil // Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga // jmaraujo@civil.uminho.pt

RESUMO: A hidroinformática tem sofrido desenvolvimentos apreciáveis nos últimos anos. O aumento das capacidades computacionais tem permitido a criação de modelos de simulação da hidrodinâmica e da qualidade da água em meios hídricos com elevadas resoluções espaciais e temporais. Desta forma, torna-se possível a implementação de modelos operacionais que constituem ferramentas de enorme potencial para a gestão da água. As tecnologias baseadas em ambiente Web constituem uma solução eficaz para a operação remota de modelos hidrodinâmicos e de qualidade de água e para a consulta e actualização da informação de Sistemas de Informação Geográfica.

Neste artigo apresentam-se as principais características de uma plataforma tecnológica vocacionada para o desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão para a gestão da água na bacia do rio Ave (Sistema de Modelação ODeAVE). Apresentam-se detalhes dos modelos construídos e resultados ilustrativos obtidos para a hidrodinâmica e qualidade da água no rio Ave.

Palavras-chave: hidroinformática, modelação matemática, rio Ave.

ABSTRACT: *Hydroinformatics has experienced considerable developments in the last years. The increase in computational capabilities has enabled the implementation of hydrodynamics and water quality simulation models to analyze water resources problems with high spatial and temporal resolutions. Thus, it becomes possible to implement operational models that constitute tools of great potential for water management. Web-based technological environments reveal to be an efficient way to implement solutions for remote operation of hydrodynamic and water quality models and to query and update databases in Geographic Information Systems.*

This paper presents the main characteristics of a technological web-based platform devoted to the development of decision support systems for water management in the river Ave basin (ODeAVE Modeling System). Details about the hydrodynamics and water quality model are synthesized and some illustrative results for the river Ave water quantity and quality are presented.

Keywords: hydroinformatics, mathematical modeling, river Ave.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem sido feito um esforço considerável no desenvolvimento de ferramentas adequadas ao apoio à decisão na gestão de recursos hídricos. A Directiva Quadro da Água (DQA), estabelece claramente que essas ferramentas devem ser utilizadas para ajudar a fazer o diagnóstico do estado da qualidade das massas de água e antecipar o impacto das medidas a serem implementadas a fim de alcançar um bom estado ecológico até 2015 (UE, 2000).

O aumento das capacidades de computação, por um lado, e a necessidade de abordagens integradas para a gestão de recursos hídricos, por outro, exige, actualmente, o desenvolvimento de plataformas computacionais que permitam a utilização de diferentes tipos de modelos para a obtenção de simulações dos diferentes processos envolvidos no ciclo hidrológico de forma eficiente e, simultaneamente, a integração de informação proveniente de estações de monitorização automática.

A modelação matemática tem vindo a adquirir uma importância crescente como método de estudo e como ferramenta de previsão dos processos envolvidos no ciclo hidrológico. A elevada complexidade deste ciclo conduziu, nos últimos anos, a uma abordagem especializada no desenvolvimento das diferentes ferramentas de modelação. Desta forma, as soluções a adoptar para as plataformas tecnológicas de modelação, têm necessariamente que considerar a inclusão de diferentes tipos de modelos: modelos hidrológicos, modelos hidrodinâmicos e modelos de qualidade da água. Estes modelos utilizam diferentes tipos de software seleccionados após uma avaliação criteriosa das diferentes opções disponíveis

De modo a permitir a utilização das ferramentas de modelação pelos actores envolvidos no processo de gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas, essas ferramentas devem ser simples, amigáveis e robustas. Borowski e Hare (2007) afirmam que os responsáveis pela gestão da água mostram forte interesse na utilização de ferramentas integradas de modelação no desenvolvimento das suas actividades. Salientam, no entanto, que a falta de tempo para formação sobre o uso de sistemas complexos e os custos de *software* e *hardware* constituem obstáculos que dificultam a implementação e utilização destas ferramentas nas instituições responsáveis pela gestão da água. Encontram-se em fase de desenvolvimento e implementação diferentes soluções tecnológicas,

decorrentes do desenvolvimento e integração de diferentes pacotes de software utilizando diferentes tecnologias de integração (De Kok et al, 2009).

Neste artigo apresentam-se as principais características de uma plataforma tecnológica vocacionada para o desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão para a gestão da água na bacia do rio Ave (Sistema de Modelação ODeAVE). A plataforma desenvolvida apresenta três componentes principais: (i) o sistema de informação com capacidade de apresentação de informação georreferenciada; (ii) o sistema de modelação com possibilidades de operação remota de modelos hidrológicos, hidrodinâmicos e de qualidade da água e visualização de resultados de simulações on-line por diferentes utilizadores; e (iii) o sistema de análise constituído por interfaces específicas dedicadas à análise do funcionamento dos meios hídricos (rios e albufeiras) em diferentes cenários ambientais e do impacto de medidas de gestão. Apresentam-se detalhes dos modelos construídos e resultados ilustrativos obtidos para a hidrodinâmica e qualidade da água.

2. CARACTERÍSTICAS DA PLATAFORMA TECNOLÓGICA

A plataforma tecnológica desenvolvida baseia-se num sistema integrado de bases de dados, aplicações computacionais, modelos hidrológicos, hidrodinâmicos e de qualidade da água e de páginas *Web* que comunicam entre si através de um conjunto organizado de fluxos de dados. Nesta plataforma são disponibilizadas funcionalidades de gestão de documentos de trabalho, informação sobre as linhas de água (sistema de informação), modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água (sistema de modelação) e ferramentas de análise de resultados (sistema de análise). A plataforma é ainda provida pelos seguintes serviços complementares: gestão de utilizadores; gestão de documentos; e gestão de dados de monitorização. O serviço de gestão de utilizadores permite condicionar o acesso a diferentes conteúdos temáticos, assim como as permissões para execução ou consulta de resultados de simulações. Com o serviço de gestão de documentos permite-se a execução de tarefas simples de publicação, e ao mesmo tempo realizar *upload* e *download* de documentos de trabalho. O serviço de gestão de dados de monitorização disponibiliza funcionalidades de recolha de dados provenientes

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em Janeiro de 2011, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em Fevereiro de 2011. Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 32, Nº 1, 13-28, Maio de 2011.
© APRH, ISSN 0870-1741

de estações hidrométricas e de qualidade da água automáticas ou convencionais instaladas na bacia hidrográfica, permitindo a sua análise e validação, integrando-os, posteriormente, em bases de dados projectadas especificamente para o efeito. O *site* que permite a interação do sistema com os seus utilizadores está dividido em quatro secções principais que permitem o acesso às funcionalidades anteriormente referidas: Projecto, Informação, Modelação e Análise. Estas secções compõem o menu principal de navegação do *site* (Figura 1).

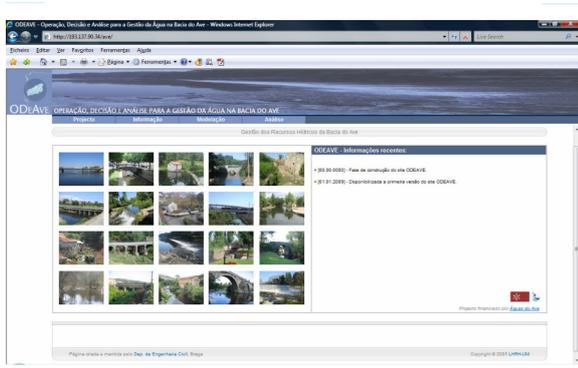


Figura 1 – Vista da janela principal do Sistema de Modelação ODeAve resultante da implementação da plataforma desenvolvida à bacia hidrográfica do rio Cávado.

No esquema da Figura 2 apresenta-se uma síntese com as tecnologias que servem de base ao sistema implementado e a sua interligação.

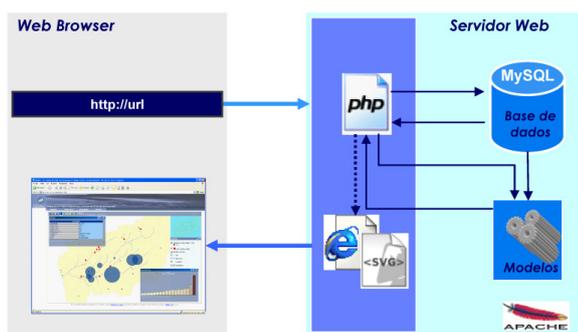


Figura 2 – Tecnologias utilizadas na plataforma desenvolvida para suporte à decisão na gestão de bacias hidrográficas.

Este sistema é suportado por um Servidor *Web* que disponibiliza as várias páginas *Web* que fazem parte da interface. A tarefa básica deste Servidor *Web* é

receber pedidos HTTP e produzir respostas HTTP, que são na sua maioria documentos HTML (páginas *Web*), considerando-se ainda outras possibilidades, como imagens, documentos PDF, imagens vectoriais SVG e texto simples. O servidor utilizado neste caso é o Apache (bastante popular devido à sua portabilidade e ao vasto leque de funcionalidades disponíveis, além de ser gratuito e de código aberto).

Grande parte da informação disponibilizada pelo Servidor *Web* encontra-se armazenada num Servidor de Base de Dados – neste caso, o MySQL, líder entre os Sistemas de Gestão de Bases de Dados Relacionais de código-aberto. O MySQL, além de oferecer vários recursos não existentes noutros sistemas tem a vantagem de ser totalmente gratuito para uso comercial ou privado. É um sistema rápido e robusto que permite lidar com um número ilimitado de utilizadores e de registos. Como características principais deste sistema destacam-se: a portabilidade (suporte para praticamente qualquer plataforma actual); a compatibilidade (existem *drivers* e módulos de interface para diversas linguagens de programação); o excelente desempenho e estabilidade; a facilidade de uso; e a pouca exigência em termos de recursos de *hardware*.

Foram integradas aplicações externas, por exemplo, para a execução dos modelos matemáticos (hidrodinâmicos e de qualidade da água), como é o caso do *software* Sobek (WL, 2005). Este *software* é aplicável a problemas de modelação hidrodinâmica e de qualidade da água em rios, sendo constituído por sete módulos: hidrologia, hidrodinâmica em canais, hidrodinâmica em rios, redes de águas residuais, controlo em tempo real, qualidade da água e previsão de áreas inundáveis. O seu desenvolvimento integrado permite a simulação de problemas envolvendo diferentes módulos em simultâneo. É baseado num método numérico bastante robusto que permite a obtenção de soluções mesmo para simulações de elevada complexidade.

3. PRINCIPAIS FUNCIONALIDADES DA PLATAFORMA

3.1. Sistema de informação

A plataforma desenvolvida possui um servidor de mapas em ambiente *Web* que foi desenvolvido a partir da aplicação de base GeoClient (Rogers e Rosyada, 2001). Esta aplicação foi melhorada, tendo sido introduzidas e desenvolvidas várias funcionalidades. Destaca-se a tradução para português de todos os menus e a inclusão da possibilidade de exportação automática de temas para a aplicação GoogleEarth.

Os temas a disponibilizar são organizados numa base de dados no formato específico. As actualizações de informação, a adição e eliminação de temas são operações que deverão ser realizadas ao nível da administração da base de dados, de acordo com metodologias e ferramentas normalmente utilizadas na realização destas operações. A composição do mapa a visualizar pelos clientes do serviço é definida a partir de um formulário com os temas disponíveis na base de dados construído automaticamente no momento da consulta por uma aplicação desenvolvida para o efeito. Na aplicação GeoClient desenvolvida na Universidade do Minho e integrada na plataforma desenvolvida são disponibilizadas as seguintes funcionalidades principais (Figuras 3, 4 e 5): navegação (*zoom in*, *zoom original*, *zoom out* e translações); consulta de informação associada às entidades gráficas; pesquisa espacial com resultados em gráfico ou tabela; colocação de etiquetas sobre as entidades gráficas; exportação do mapa para ficheiro (kml) compatível com leitura na aplicação GoogleEarth; apresentação de legenda configurável; apresentação de mapa de enquadramento (mini-mapa); selecção de opções de visualização (mini-mapa e legenda).

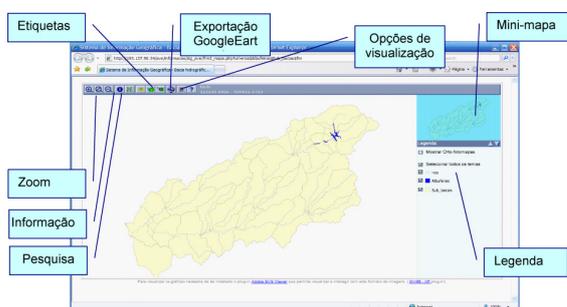


Figura 3 – Serviço Web-SIG da plataforma desenvolvida aplicada ao Sistema ODeAve resultante da implementação da plataforma desenvolvida à bacia hidrográfica do rio Cávado.

Permite-se ainda consultar toda a informação alfanumérica associada a cada uma das entidades e visualizar fotografias, sempre que estas estejam disponíveis. Tal como na aplicação desenvolvida para disponibilização do serviço Web-SIG, também neste caso, as operações de gestão da informação são realizadas sobre a base de dados. A edição, alteração, adição ou eliminação de informação é realizada com ferramentas adequadas de gestão de bases de dados. Os ortofotomapas são armazenados exteriormente à base de dados em ficheiro autónomo, constando da base apenas as suas propriedades.

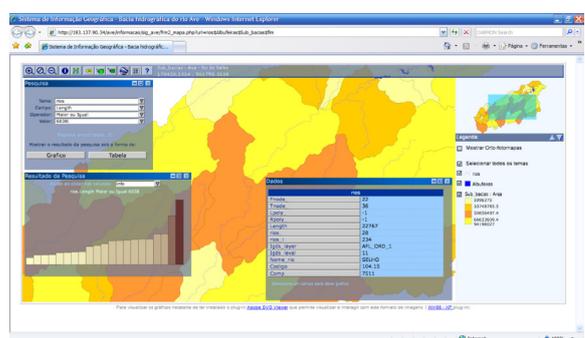


Figura 4 – Ferramenta de pesquisa da aplicação GeoClient do serviço Web-SIG do Sistema ODeAve resultante da implementação da plataforma desenvolvida à bacia hidrográfica do rio Cávado.

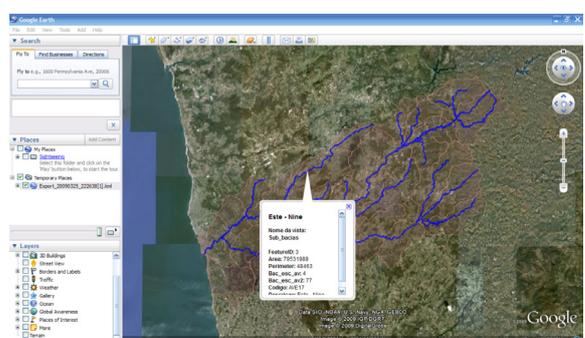


Figura 5 – Resultado da exportação realizada na aplicação GeoClient do serviço Web-SIG na plataforma desenvolvida para a bacia hidrográfica do rio Ave.

Na Figura 6 apresentam-se, a título ilustrativo algumas vistas relativas à informação detalhada dum rio da bacia hidrográfica do rio Ave.

Os dados meteorológicos, hidrométricos e de qualidade da água são disponibilizados na plataforma desenvolvida após a sua organização numa base de dados específica para este tipo de informação. Esta base de dados contém os registos históricos das variáveis monitorizadas em cada um dos tipos de estações activas das redes de monitorização na bacia hidrográfica. Estes dados constituem a informação fulcral necessária à elaboração de diagnósticos do estado da qualidade da água e à definição de cenários de modelação para previsão da evolução da qualidade da água. A consulta dos dados é realizada a partir de uma aplicação Web desenvolvida para o efeito. O serviço disponibilizado pela aplicação contempla as seguintes funcionalidades: selecção da estação através de mapa ou de listagem das estações; visualização em gráfico da

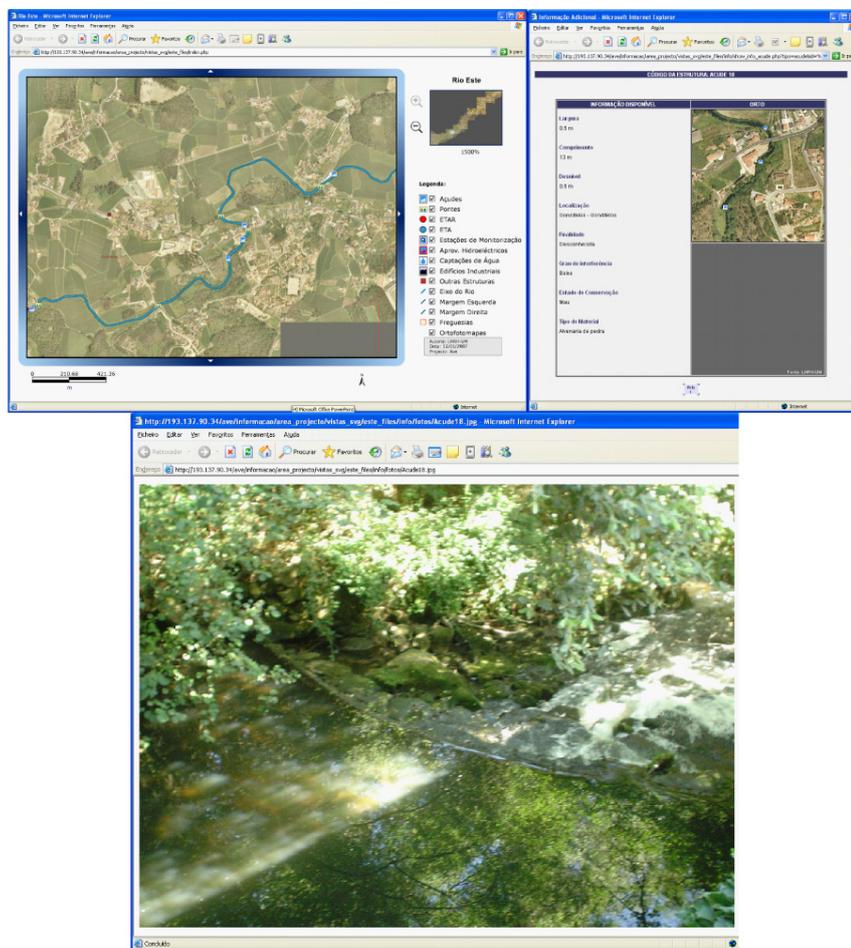


Figura 6 – Consulta de informação detalhada das linhas de água disponibilizada por aplicação desenvolvida para o efeito.

série de dados disponível para o parâmetro seleccionado para uma determinada estação; visualização dos dados em tabela e possibilidade de exportação para ficheiro compatível com a aplicação MSExcel. São ainda disponibilizados uma função que permite o cálculo de parâmetros estatísticos da série de dados activa e a geração automática de um relatório sobre a série de dados.

Após a selecção de um determinado parâmetro é visualizada sob a forma de gráfico ou tabela a série de dados que consta da base de dados (Figura 7). As variáveis estatísticas relativas à série de dados calculadas são as seguintes: número de valores da série, valores máximo e mínimo, média, desvio padrão e percentis 1%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90% e 99%.

3.2. Sistema de modelação

O sistema de modelação é constituído pelos modelos matemáticos relativos às massas de água superficiais que permitem simular os fluxos de água (hidrodinâmica) e o transporte de substâncias ou propriedades que serão utilizadas como indicadores do seu estado de qualidade. Na Figura 8 apresenta-se a rede fluvial correspondente ao modelo criado para a bacia hidrográfica do rio Ave. O modelo unidimensional criado compreende o rio Ave e os seus principais afluentes: rio Bugio, rio Castelões, rio Este, rio Ferro, rio Macieira, rio Pele, rio Pelhe, rio Pequeno M.D., rio Pequeno M.E., rio Póvoa, rio Sanguinhedo, rio Selho, rio Tabuaças, ribeira da Trofa, rio Vilar Chão e rio Vizela. As secções transversais dos canais fluviais consideradas nos modelos foram definidas a partir de informação batimétrica e topográfica disponível para as respectivas bacias hidrográficas.

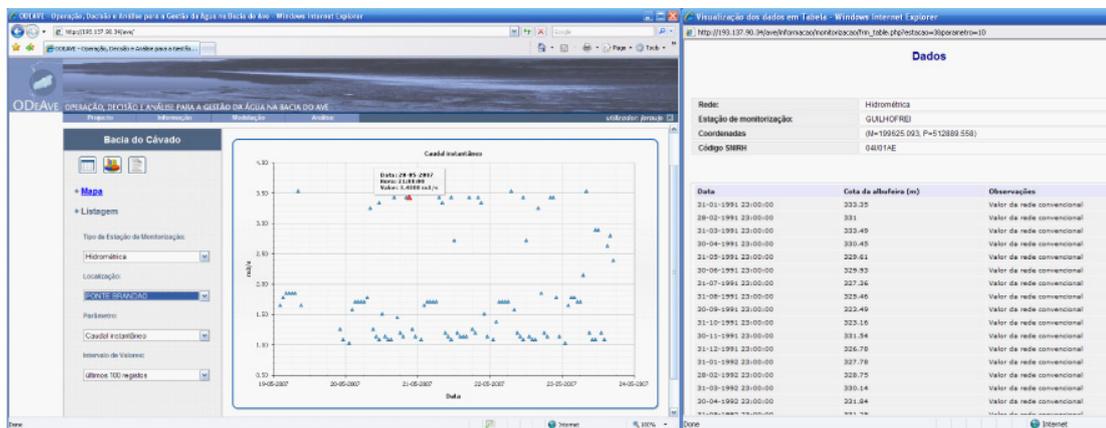


Figura 7 – Apresentação em ambiente Web de dados de monitorização.



Figura 8 – Rede fluvial objecto de modelação na bacia hidrográfica do rio Ave.

Para a operação dos modelos foram desenvolvidas interfaces *Web*. Trata-se de ferramentas especificamente desenvolvidas com o objectivo de permitir não só a visualização dos resultados de simulações em ambiente *Web* mas também interagir com o modelo instalado num servidor remoto, definindo-se e accionando-se a execução remota de novas simulações. Ao cliente são disponibilizadas ferramentas que permitem alterar as condições de abertura de comportas, turbinas de aproveitamentos hidroeléctricos, valores dos caudais dos principais afluentes dos rios e características das fontes tóxicas de poluição.

Na Figura 9 apresenta-se a vista principal da interface desenvolvida para os modelos, onde estão disponíveis diversas funcionalidades (visualização gráfica em perfil, planta, tabelas, gráficos e animações). Esta interface permite não só fornecer os dados necessários para a execução do modelo, como também a visualização

dos resultados finais. A janela principal da interface correspondente à visualização gráfica do perfil (Figura 10), tem uma série de ícones que permitem visualizar os resultados em diferentes formatos (tabelas, gráficos ou animação, por exemplo). Além disso, alguns dos ícones permitem especificar dados de entrada do modelo que o utilizador remoto poderá alterar.

Cada uma destas funcionalidades tem um ou mais módulos PHP a ela associados. Por exemplo, no caso da visualização da informação sob a forma de tabela, existem dois módulos PHP utilizados para disponibilizar esta funcionalidade. Um é responsável pela geração da janela *pop-up* que mostra uma tabela com os valores verificados e outro é responsável pela exportação desses dados para Excel. Como já foi referido, a interface desenvolvida permite, simultaneamente, definir os dados de entrada para o modelo e, ao mesmo tempo, a visualização dos resultados finais. Um dos

conjuntos de dados que é possível alterar é o que engloba os parâmetros da simulação. Para tal, utiliza-se o ícone associado ao texto “Definição dos parâmetros de simulação” (ver Figura 10). Este disponibiliza uma janela *pop-up* onde é possível definir esses parâmetros (Figura 11 à esquerda).

A *script* utilizada para esta janela é responsável pela definição da data inicial da simulação (dia, mês, ano, hora e minuto) e da duração da simulação (dias, horas e minutos). O formulário apresentado permite a definição dos valores de caudais nas cabeceiras de montante das linhas de água. É possível optar por um valor constante durante o período de simulação ou por uma lei variável ao longo daquele período. A imagem da barragem no formulário dá acesso à janela de definição de leis de abertura de comportas e orifícios [Figura 11 à direita]. Após a selecção da barragem ou açude em que a estrutura se encontra instalada é possível proceder à definição individualizada da lei de abertura de cada órgão hidráulico. Concluídos os passos anteriores, o utilizador poderá executar o modelo com os parâmetros definidos através do botão “Executar” que se encontra na zona inferior da janela principal (Figura 9).

3.3. Sistema de análise

O objectivo último de um sistema do tipo desenvolvido no âmbito deste trabalho pretende ser o apoio ao processo de decisão em problemas complexos de gestão da água através da estruturação de informação

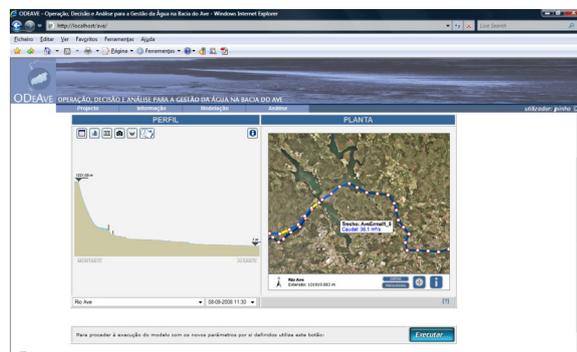


Figura 9 – Interface Web para modelos hidrodinâmicos.

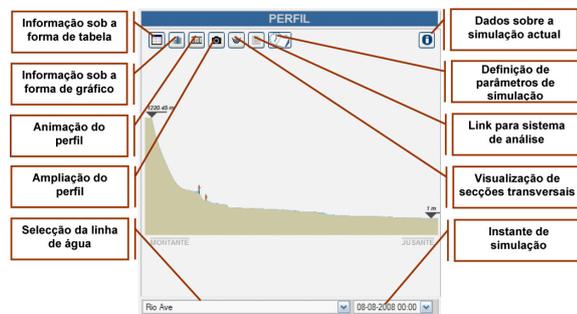


Figura 10 – Principais funcionalidades da interface Web dos modelos hidrodinâmicos: perfil.



Figura 11 – Janela de definição dos parâmetros de simulação e condições de fronteira.

e da análise e avaliação dos impactos de diferentes medidas alternativas. A complexidade dos problemas a equacionar em sistemas ambientais está relacionada com a incerteza do comportamento do sistema causada pela falta de informação essencial para descrever os fenómenos naturais relevantes e pela imperfeição da sua representação por modelos matemáticos. Esta complexidade é geralmente agravada pelo facto de existirem, na região em estudo, diversos actores com responsabilidades repartidas na solução dos problemas existentes e onde a cooperação nem sempre é efectiva.

No desenho do sistema de análise da plataforma desenvolvida procurou-se integrar as diferentes escalas envolvidas de uma forma simples e intuitiva, passando-se da escala da bacia para a escala das estruturas hidráulicas dentro da mesma aplicação. A análise de medidas de gestão em diferentes cenários ambientais resulta num conjunto de simulações que podem ser armazenadas pelo gestor da plataforma desenvolvida à medida que forem implementadas pelos diferentes utilizadores do sistema de modelação.

Através duma interface específica (Figura 12) é possível gerir (armazenar, consultar e eliminar) as diferentes simulações geradas no sistema de modelação. A consulta está organizada por linhas de água e a análise é realizada através de relatórios disponibilizados *on-line*. Foram consideradas duas aplicações distintas para o sistema de análise: uma dedicada unicamente à exploração e análise de resultados de simulações hidrodinâmicas e a segunda vocacionada para a análise e exploração de resultados de qualidade da água. O aspecto gráfico e as funcionalidades incluídas nas duas interfaces são idênticos, diferindo apenas no tipo de resultados disponibilizados. Esta divisão justifica-se pela expectável utilização por dois grupos distintos de utilizadores (um grupo que se pode centrar em análises quantitativas e outro mais interessado em análises qualitativas).

A janela principal exibe uma *Listbox* com as simulações disponíveis para análise de resultados, apresenta uma área com indicação de eventuais simulações disponíveis para armazenamento (se o utilizador tiver permissão para tal) e uma área com informação adicional sobre a linha seleccionada e dados da simulação. Após a selecção da linha de água objecto de análise, é disponibilizada a planta em que são representadas as estruturas hidráulicas e os nós e trechos de cálculo dos modelos (hidrodinâmico e de qualidade) (Figura 13).

Na planta, para além do ortofotomapa, são representados os limites e designações das freguesias e as designações das linhas de água que constituem informação auxiliar para a localização dos elementos dos modelos (nós, trechos e estruturas hidráulicas). Com base nestes elementos é possível

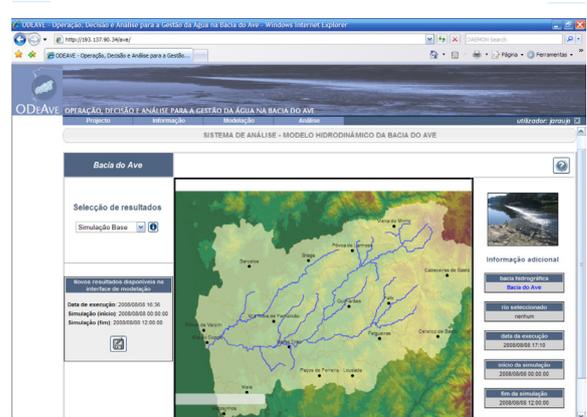


Figura 12 – Interface principal do sistema de análise.

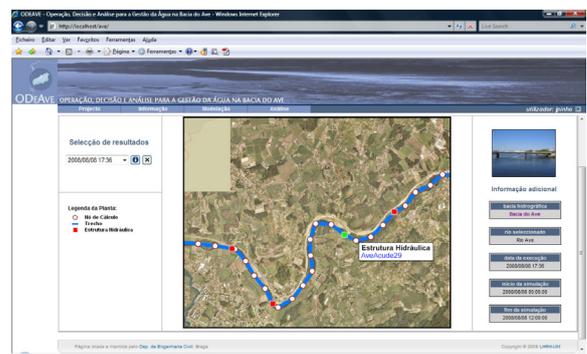


Figura 13 – Planta de selecção de objectos no sistema de análise.

gerar automaticamente um relatório de análise dos resultados da simulação seleccionada. O relatório é constituído pelos seguintes elementos: informação geral sobre a simulação e informação sobre o nó, trecho ou estrutura hidráulica; planta e perfil de localização do elemento seleccionado; representação do perfil no instante inicial, num instante intermédio e no instante final da simulação; tabela de resultados para o elemento activo; gráfico de resultados para todas as variáveis associadas ao elemento seleccionado; e uma análise estatística sumária da variável ao longo do período de simulação.

4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO

O escoamento é modelado recorrendo-se a formulações unidimensionais do escoamento com

superfície livre baseadas nas equações de continuidade e de conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_f} \right) + g A_f \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g Q |Q|}{C^2 R A_f} - W_f \frac{\tau_{wi}}{\rho_w} = 0 \quad (2)$$

em que,

Q , é o caudal [m^3/s]

t , é o tempo [s]

x , é a coordenada unidimensional [m]

A_f , é a área da secção molhada [m^2]

g , é a aceleração da gravidade [m/s^2]

h , é a altura do escoamento [m]

C , é o coeficiente de Chézy [$m^{1/2}/s$]

R , é o raio hidráulico [m]

W_f , é a largura superficial da linha de água [m]

q_{lat} , é o caudal lateral unitário [$m^3/(sm)$]

τ_{wi} , é a tensão tangencial devida ao vento [N/m^2]

ρ_w , é a massa volúmica da água [kg/m^3]

Para além destas equações são ainda utilizadas na construção de modelos unidimensionais, expressões adequadas ao cálculo das características de escoamento em estruturas como: pontes, passagens hidráulicas, sifões invertidos, orifícios, bombas, sifões e descarregadores. Nestas estruturas o escoamento depende dos níveis a montante e a jusante da estrutura, das suas dimensões e de um conjunto de parâmetros específicos de cada uma delas.

$$\frac{\partial (A_f C)}{\partial t} = - \frac{\partial (QC)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D A_f \frac{\partial C}{\partial x} \right) + S A_f \quad (3)$$

O modelo de qualidade da água é baseado na equação de transporte unidimensional.

em que,

C , é a concentração de constituinte [kg/m^3];

D , é o coeficiente de dispersão turbulenta [m^2/s];

S , é a fonte ou sumidouro devido a entradas ou saídas no sistema e a produção ou decaimento por reacções [$kg/m^3/s$].

O último termo da Eq. 3 refere-se às fontes de poluentes e à dependência em relação aos processos que ocorrem na coluna de água. São consideradas

tantas equações quantas as variáveis envolvidas no processo de qualidade da água a simular. Os diferentes processos biogeoquímicos com interesse para o estudo de problemas de qualidade da água apresentam uma diversidade muito grande, tendo-se optado por definir um quadro, o mais abrangente possível e que engloba quer processos simples (como por exemplo a modelação de descargas acidentais de poluentes conservativos), quer processos de maior complexidade, como é o caso da degradação de matéria orgânica.

Nos processos envolvendo substâncias conservativas considera-se apenas o transporte da substância no meio hídrico através dos processos de advecção e de difusão. A avaliação das extensões e durações de descargas acidentais poderá ser efectuada recorrendo-se a um modelo em que a descarga acidental é modelada por uma substância conservativa. Para além das situações de descargas acidentais, estes modelos simples têm também interesse prático para a quantificação dos tempos de residência e para a análise do efeito de diferentes condições hidrodinâmicas nas condições de mistura.

A generalidade dos elementos e substâncias nos meios aquáticos apresentam reacções com outros elementos e/ou substâncias, resultando na sua transformação (diminuição ou aumento de concentração). A contaminação bacteriana resultante de descargas de águas residuais domésticas ou de origem difusa, por exemplo, poderá ser modelada adoptando-se um decaimento de 1ª ordem. O comportamento de muitas outras substâncias (ou espécies) pode ser aproximado através da consideração de decaimentos ou crescimentos de 1ª ordem, tais como: carência bioquímica de oxigénio (CBO), algas, etc. Os coeficientes das leis de 1ª ordem deverão ser estabelecidos preferencialmente a partir dos dados de campo disponíveis ou de análises laboratoriais. O oxigénio dissolvido (OD) é um dos parâmetros ambientais mais utilizado para caracterizar a qualidade da água em sistemas hídricos. A análise do impacto provocado por descargas com elevada concentração de matéria orgânica poderá ser efectuada quantificando-se os efeitos, em termos das variações das concentrações de oxigénio dissolvido na coluna de água, devidos à decomposição da matéria orgânica contida nos efluentes rejeitados.

O modelo da rede fluvial da bacia hidrográfica do rio Ave foi discretizado através de uma rede unidimensional com 1902 nós de cálculo, 18 fronteiras abertas e 34 descargas controladas (Figura 14). Foram ainda considerados 255 estruturas hidráulicas não controladas (Figura 15). A geometria foi introduzida considerando-se 1936 secções transversais. Foram consideradas 128 localizações com possibilidade de introdução de descargas com origem em fontes tóxicas de poluição.

Foram consideradas as principais estruturas hidráulicas com influência nos regimes fluviais dos rios: açudes e aproveitamentos hidroeléctricos.

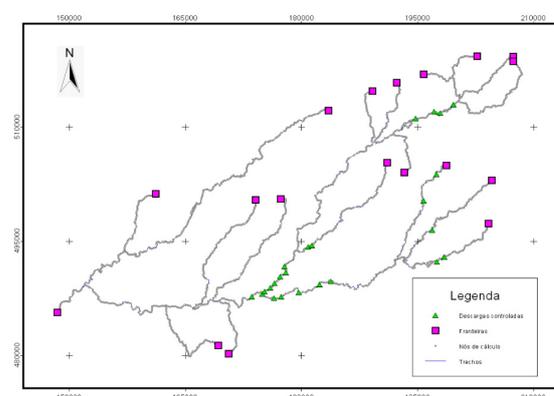


Figura 14 – Fronteiras abertas e estruturas hidráulicas controladas.

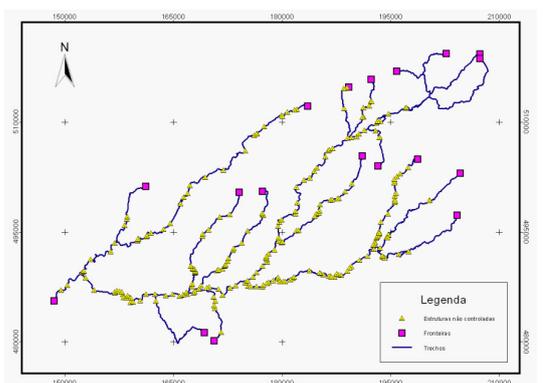


Figura 15 – Estruturas hidráulicas não controladas.

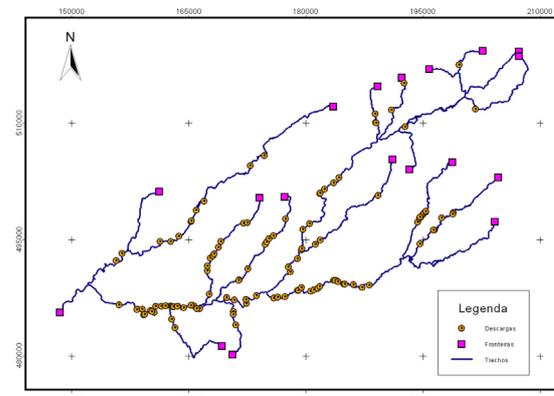


Figura 16 – Descargas poluentes.

5. RESULTADOS

5.1. Hidrodinâmica

O comportamento hidrodinâmico dos rios que constituem a bacia hidrográfica do rio Ave é influenciado essencialmente pela pluviosidade da região e pelos regimes de exploração dos respectivos aproveitamentos hidroeléctricos. A caracterização de cada um dos cenários simulados envolve a definição de valores em 41 variáveis do modelo hidrodinâmico (estruturas hidráulicas e caudais dos afluentes). Para ilustrar a aplicação do sistema foram considerados treze cenários que compreendem a escoamentos com caudais médios estimados mensais e o caudal médio estimado para o período de monitorização disponibilizado no sistema (dados existentes até 2007). Nas barragens foram consideradas em funcionamento as turbinas em função do caudal efluente médio de cada aproveitamento. Por se tratar de valores médios, não foram consideradas variações horárias de caudal turbinado. Considerou-se ainda todas as comportas dos descarregadores de fundo e de cheia fechadas em todas as barragens. Por ausência de informação considerou-se, na barragem da Queimadela, o caudal efluente igual ao afluente.

Nos aproveitamentos de menor dimensão como o do rio Selho, Bugio e Ferro optou-se por considerar uma abertura fixa das comportas. Por último, na fronteira oceânica do modelo não foram consideradas nas simulações as variações de maré, tendo sido adoptado um valor constante para o nível ao longo das simulações. Todas as simulações realizadas apresentam uma duração de 7 dias e um intervalo de tempo de cálculo de 15 minutos.

Na Figura 17 apresenta-se uma comparação entre o valor estimado e o valor simulado em diferentes trechos dos rios Vizela e Ave para a simulação correspondente ao escoamento médio verificado no período de monitorização. Os valores simulados apresentados referem-se exclusivamente ao último instante da simulação.

Da observação da Figura 17 é possível constatar uma grande aproximação entre os valores estimados e simulados. Apenas no trecho do rio Vizela identificado com o número 11 (entre a Foz do rio Ferro e o rio Ave), é possível verificar uma diferença de 0,5 m³/s entre os valores estimado e simulado. A diferença resulta da adição do caudal correspondente à contribuição da sub-bacia do rio Ave localizada entre a Foz do rio Vizela e Foz do rio Sanguinhedo, à fronteira do rio Ferro. Nas restantes simulações é notória a aproximação entre os valores simulados e os valores registados, em concordância com os resultados do cenário apresentado na Figura 17. Em alguns casos, existem pequenas diferenças entre os valores estimado e simulado, resultantes de variações de nível nas albufeiras e que implicam, uma vez que a abertura das comportas é constante, variações no caudal descarregado.

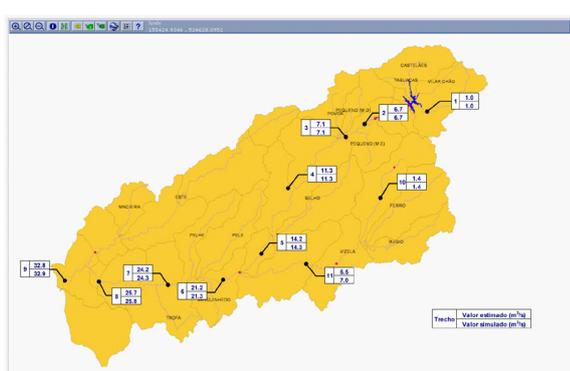


Figura 17 - Caudais médios estimados e simulados para um dos cenários simulados (correspondente à adopção de valores médios anuais do período analisado).

5.2. Qualidade da água

As simulações relacionadas com a qualidade da água são baseadas nas simulações da hidrodinâmica anteriormente apresentadas e resultaram da adopção

de diferentes características para as descargas consideradas no modelo criado: ETAR, indústrias e outras contribuições associadas aos diferentes afluentes, através da consideração de cargas poluentes nas respectivas cabeceiras. O estabelecimento de diferentes valores para as variáveis indicadas resulta em cenários de simulação distintos.

O modelo operacional permite criar um número ilimitado de simulações, considerando diferentes condições hidrodinâmicas nas linhas de água e diferentes condições para as descargas. Com o objectivo de ilustrar as potencialidades do sistema de modelação desenvolvido foram definidos cenários de descarga em situação de escoamento médio anual e mensal das linhas de água e considerando a eficiência espectável para as ETAR em conformidade com o respectivo tipo de tratamento. Foram ainda simulados para um dos meses mais húmidos (Janeiro) e um dos meses mais secos (Agosto) os efeitos das descargas das ETAR, adoptando valores extremos de eficiências referidas na bibliografia. Finalmente, foram considerados três cenários em que se considera a rotura de cada uma das três principais ETAR: Agra, Rabada e Serzedelo (Quadro 1).

Quadro 1 – Cenários de modelação da qualidade da água.

Cenário	Escoamento médio	Eficiência - ETAR
1	Anual	Média
2	Janeiro	Média
3	Fevereiro	Média
4	Março	Média
5	Abril	Média
6	Maio	Média
7	Junho	Média
8	Julho	Média
9	Agosto	Média
10	Setembro	Média
11	Outubro	Média
12	Novembro	Média
13	Dezembro	Média
14	Janeiro	Máxima
15	Agosto	Máxima
16	Janeiro	Mínima
17	Agosto	Mínima
18	Anual	Rotura em Agra, outras ETAR média
19	Anual	Rotura em Rabada, outras ETAR média
20	Anual	Rotura em Serzedelo, outras ETAR média

As características qualitativas das descargas das ETAR foram estimadas para os seguintes parâmetros: carência bioquímica de oxigénio, oxigénio dissolvido, coliformes totais, coliformes fecais e estreptococos fecais. Nas cabeceiras de cada uma das linhas de água optou-se por considerar as características de uma água sem qualquer poluição, ou seja, com valores nulos de concentrações de CB05 e das variáveis bacteriológicas. Em relação a oxigénio dissolvido, considerou-se um valor próximo da concentração de saturação (10 mg/L). Os resultados foram obtidos para as vinte simulações consideradas, abrangendo um tempo de simulação de sete dias em cada um dos cenários.

No primeiro cenário simulado foram consideradas situações de escoamento médias e descargas e eficiências das ETAR resultantes da adopção do valor intermédio no respectivo intervalo de variação referido na bibliografia. Nestas circunstâncias procede-se a uma comparação entre os resultados de simulação obtidos para o último instante de simulação e os valores médios monitorizados ao longo de todo o período de monitorização (Quadro 2).

Constata-se que nos rios Ave e Vizela o perfil de qualidade da água resultante da descarga de matéria orgânica, inferido dos resultados de concentrações de CB05, apresenta-se com valores praticamente uniformes (em torno de 1mg/L), existindo no entanto, uma diferença expressiva entre os valores monitorizados e simulados principalmente em Ponte da Trofa, Santo Tirso e Riba D'Ave (Figura 18). Nesta zona existem diversas ETAR, principalmente privadas, consideradas no modelo mas em que as descargas foram consideradas nulas por falta de informação para as quantificar. A existência destas descargas de águas residuais situadas na zona compreendida entre as estações de Riba D'Ave e Ponte da Trofa poderá justificar as diferenças entre os valores monitorizados e os valores simulados.

No que se refere aos resultados das variáveis bacteriológicas as diferenças entre os valores simulados e os valores observados são, no cenário 1, bastante significativas nos trechos analisados (Figura 18). Na estação da Cabeceira do Ave, os valores resultantes da simulação são mais aproximados dos monitorizados.

Quadro 2 – Resultados do modelo de qualidade da água na proximidade das estações de monitorização para o cenário 1.

Estação	Designação	Oxigénio dissolvido (mg/L)	Carência Bioquímica de Oxigénio (5 dias) (mg/L)	Temperatura (°C)	Coliformes Totais (NMP/100mL)	Coliformes Fecais (NMP/100mL)	Streptococos Fecais (NMP/100mL)
1	Ponte Trofa	7.8	4.3	16.4	161899	34846	2529
	Ave21_6	8.1	0.7	12.0	971	485	49
2	Santo Tirso	8.0	3.6	16.3	119040	27270	1615
	Ave30_1	8.1	0.7	12.3	377	188	19
3	Riba D'Ave	8.4	5.0	16.0	628903	109617	7891
	Ave32_2	8.0	0.9	12.5	161	80	8
4	Taipas	9.5	1.3	14.9	6459	928	412
	10_s5	8.1	1.3	12.8	284	142	14
5	Cabeceira do Ave	10.0	0.9	12.9	5108	2785	152
	CAve1_96	10.0	0.2	10.0	3466	1733	173
6	Vizela Sto. Adrião	10.5	1.4	14.2	25346	3317	2799
	8 148	8.1	0.2	10.8	2	1	0
7	Golães	9.7	1.0	13.7	3608	674	635
	67_4	8.1	0.8	12.1	0	0	0

As diferenças encontradas resultam essencialmente da incerteza associada à quantificação das cargas bacteriológicas (foram realizadas análises de sensibilidade aos parâmetros de calibração, tendo-se concluído que estes parâmetros não permitem justificar as diferenças encontradas). Os valores utilizados na estimação destas cargas (valores médios de cargas bacteriológicas) são muito variáveis, podendo justificar o comportamento simulado (subestimação das cargas bacteriológicas). Tal como no caso da carência bioquímica de oxigénio, também nas variáveis bacteriológicas a adopção de valores nulos para um conjunto de descargas de ETAR no cenário 1, poderá explicar as diferenças encontradas.

Com base nos resultados deste cenário poderemos afirmar que a poluição bacteriológica a partir da estação de Riba D’Ave tem sido uma realidade que as soluções utilizadas na recolha e tratamento de águas residuais ainda não tinham conseguido resolver (até ao final do ano de 2007) de modo eficaz nesta bacia. A poluição bacteriológica ocorre também durante a época de estiagem, o que diminui a probabilidade desta contaminação ter origem difusa.

Adoptando as mesmas condições de descargas poluentes do cenário 1 mas passando a considerar-se o escoamento médio mensal nas linhas de água, foram simulados os cenários 2 a 13 que permitem avaliar a influência da variação dos caudais no comportamento da qualidade da água. Na Figura 19 apresentam-se os resultados obtidos nos referidos cenários num trecho do rio Ave localizado em Santo Tirso.

Os resultados apresentados revelam uma forte influência da variação do regime de caudais ao longo do ano nos resultados obtidos para as variáveis de qualidade da água. As variações entre os valores mínimos e máximos atingem valores da ordem de 45% dos valores da concentração no mês mais húmido no caso das variáveis bacteriológicas e de cerca de 25% no caso da CB05.

Com os cenários 14 a 17 procura-se ilustrar as potencialidades do Sistema desenvolvido na avaliação do desempenho das ETAR (consideração de diferentes eficiências de tratamento) em diferentes situações de escoamento (Janeiro e Agosto). Na Figura 20 sintetizam-se os resultados obtidos nos referidos cenários no trecho do rio Ave localizado em Santo Tirso.

Os resultados revelam a maior sensibilidade dos meios receptores de águas residuais na época de estiagem, relativamente às descargas de águas residuais para todas as variáveis simuladas. Embora as eficiências de tratamento das ETAR consideradas em cada um dos cenários tenham sido definidas a partir de valores constantes da bibliografia, regista-se a grande

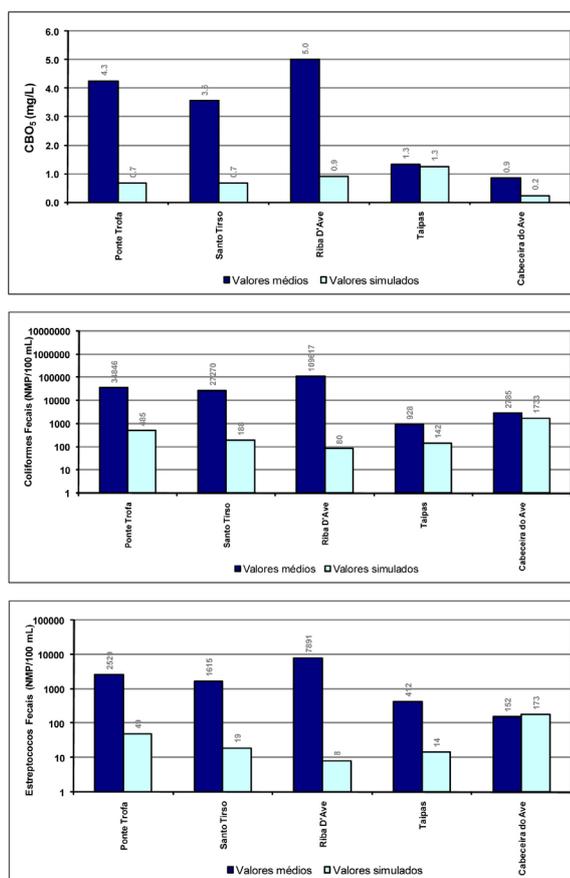


Figura 18 – Comparação entre resultados de médias registadas e concentrações simuladas de CBO5, coliformes fecais e estreptococos fecais [Cenário 1].

variabilidade de concentrações no meio receptor, sobretudo para as variáveis bacteriológicas. Para o local a que se referem os resultados apresentados, a concentração das variáveis bacteriológicas, para as ETAR a funcionarem com eficiências mínimas, é aproximadamente dez vezes superior à concentração que resulta de descargas das ETAR a funcionarem com eficiências máximas.

Este tipo de resultados simulados com o Sistema desenvolvido constitui uma grande valia para a avaliação de alternativas de investimento em estruturas de recolha e tratamento de águas residuais uma vez que permite, de uma forma simples, antecipar os efeitos dessas estruturas na melhoria da qualidade da água dos meios receptores.

Finalmente, apresenta-se na Figura 21 os resultados obtidos em cenário de rotura de funcionamento da

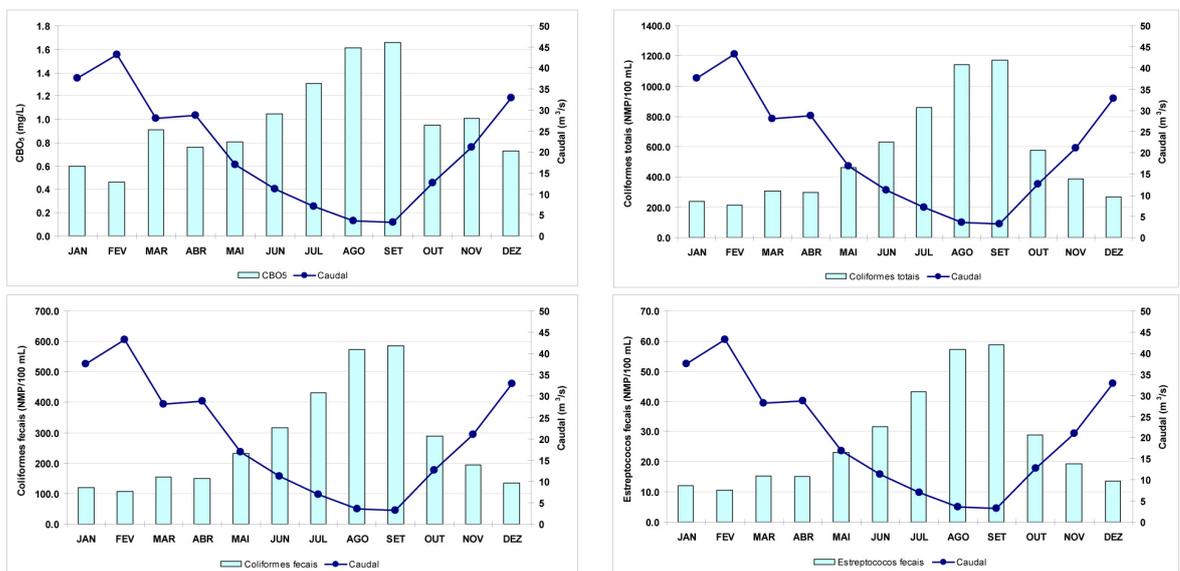


Figura 19 – Resultados de concentrações de CBO5, coliformes totais, coliformes fecais e estreptococos fecais para os cenários 2 a 13, no trecho do rio Ave localizado em Santo Tirso.

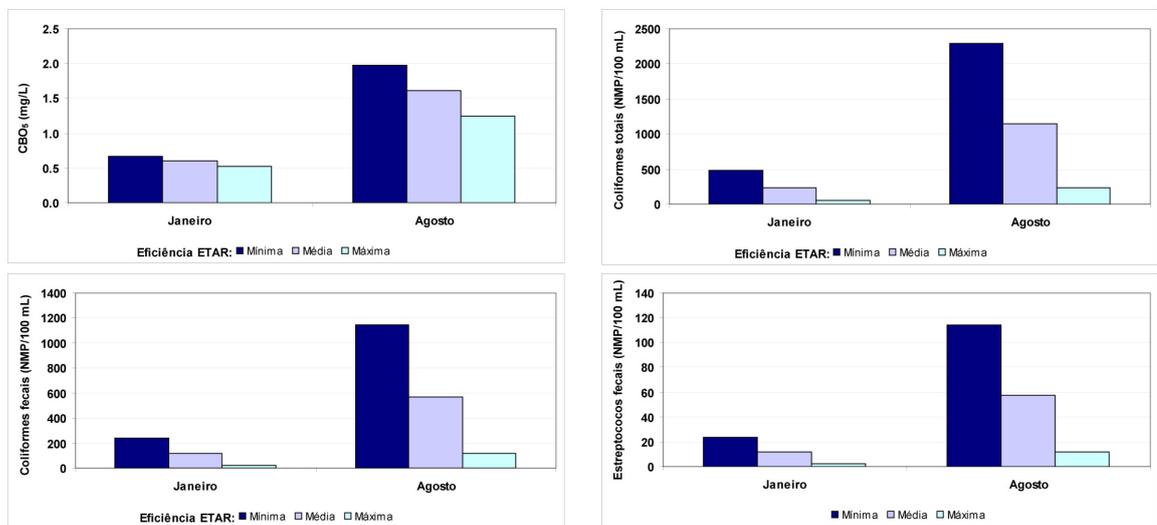


Figura 20 – Resultados de concentrações de CBO5, coliformes totais, coliformes fecais e estreptococos fecais para os cenários 14 a 17 no trecho do rio Ave em Santo Tirso.

ETAR de Agra (cenário 18). As roturas são simuladas em situação de escoamento médio, pelo que não traduzem a situação mais desfavorável em termos de impacto na qualidade da água, neste cenário de funcionamento excepcional. Os resultados apresentados referem-se a duas localizações distintas: uma na proximidade da descarga (imediatamente a jusante) e a outra num trecho relativamente afastado. Com base neste tipo de resultados é possível planejar medidas de protecção a outros usos da água instalados na bacia, minimizando-se assim os efeitos de situações acidentais. Salienta-se, uma vez mais, que os resultados apresentados não são exaustivos. Todas as simulações apresentadas estão disponíveis com a instalação do Sistema ODeAve, podendo ser consultados na plataforma Web desenvolvida. Com os exemplos aqui trabalhados pretendeu-se, acima de tudo, demonstrar as potencialidades das ferramentas informáticas desenvolvidas na abordagem e tratamento de alguns dos mais importantes aspectos de qualidade de água do rio Ave.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho procedeu-se à apresentação de uma plataforma tecnológica vocacionada para o suporte à decisão na gestão de recursos hídricos à escala da

bacia hidrográfica do rio Ave. Os resultados obtidos com a sua aplicação nesta bacia hidrográfica permitem antecipar que a ferramenta desenvolvida terá muito interesse e será efectiva para se alcançarem os objectivos de gestão da água à escala da bacia: a avaliação e controlo da qualidade da água superficial e o controlo de níveis e caudais de água em albufeiras e rios. A utilização de todas as potencialidades da plataforma com aplicação prática em situações de gestão diferenciadas constituirá, definitivamente, a melhor prova de aferição da eficácia da ferramenta desenvolvida. Por outro lado, as entidades responsáveis pela gestão da água passam a dispor de novas capacidades de informação e modelação, reforçando as suas competências tecnológicas na sustentação das políticas de gestão da água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, à Águas do Ave, SA e à Águas do Cávado, SA o apoio financeiro concedido para o desenvolvimento de soluções informáticas inovadoras e úteis para o suporte à decisão nas actividades de planeamento e gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas portuguesas.

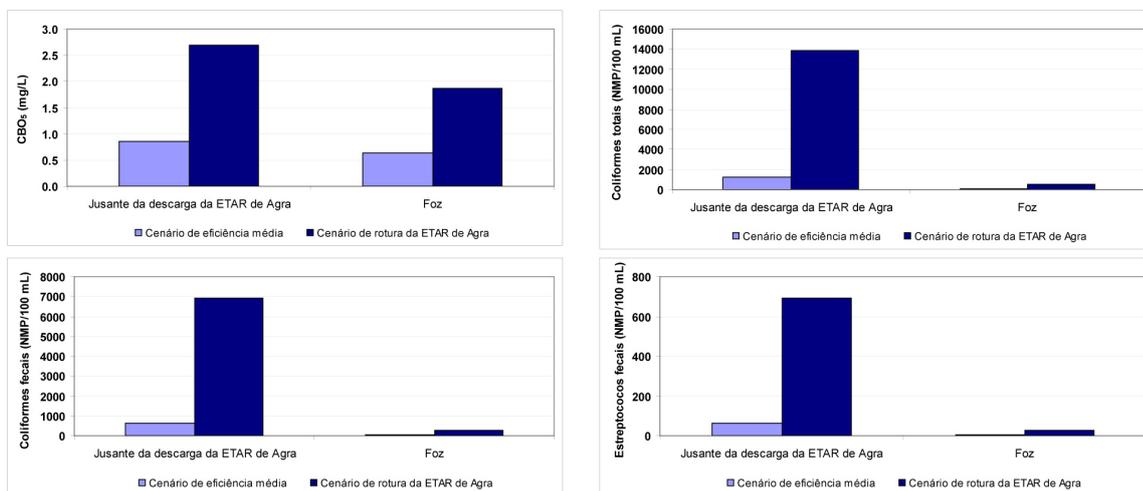


Figura 21 – Resultados de concentrações de CB05, coliformes totais, coliformes fecais e estreptococos fecais para o cenário 18 (rotura da ETAR de Agra) em dois locais distintos.

BIBLIOGRAFIA

- Borowski, I. e Hare, M. (2007). Exploring the gap between water managers and researchers. Difficulties of model-based tools to support practical water management. *Water Resources Management* 21 (7), 1049-1074
- De Kok, J.L., S. Kofalk, J. Berlekamp, B.M. Hahn e H. Wind (2008). From Design to Application of a Decision-support System for Integrated River-basin Management, *Water Resources Management*, (23), 1781-1811.
- Rogers e Rosyada (2001). "GeoClient Project".
- UE (2000). "Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2000, que estabelece um Quadro de Acção Comunitária no Domínio da Política da Água", *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, L327, 22.12.2000, pp. 1-73.
- WL (2005). "SOBEK - Reference Manual". Delft Hydraulics, Netherlands.
<http://www.mycgiserver.com/~amri/geoclient.cocoon.xml>.