

## FERRAMENTA DE APOIO À GESTÃO COSTEIRA E PORTUÁRIA: O SISTEMA HIDRALERTA

Conceição J.E.M. FORTES<sup>1</sup>; Maria Teresa REIS<sup>1</sup>; Pedro POSEIRO<sup>1</sup>; João A. SANTOS<sup>2</sup>; Tiago GARCIA<sup>5,1</sup>; Rui CAPITÃO<sup>1</sup>; Liliana PINHEIRO<sup>1</sup>; Rui REIS<sup>1</sup>; João CRAVEIRO<sup>1</sup>; Inês LOURENÇO<sup>1</sup>; Pedro LOPES<sup>5,1</sup>; Armanda RODRIGUES<sup>3</sup>; André SABINO<sup>3</sup>; João P. ARAÚJO<sup>3</sup>; José C. FERREIRA<sup>4</sup>; Susana F. SILVA<sup>4</sup>; Paulo RAPOSEIRO<sup>4</sup>; Anabela SIMÕES<sup>5</sup>; Eduardo B. AZEVEDO<sup>5</sup>; Francisco V. REIS<sup>5</sup>; Maria da Conceição RODRIGUES<sup>6</sup>; Carlos PEREIRA DA SILVA<sup>4</sup>

### RESUMO

Nesta comunicação, descreve-se o sistema HIDRALERTA (sistema de previsão e alerta de inundações em zonas costeiras e portuárias), sistema em ambiente SIG que tem como ideia-base a utilização de previsões da agitação marítima (a 180 horas) para calcular os seus efeitos na costa, nomeadamente em termos de galgamentos e inundações. Dos desenvolvimentos mais recentes ou em curso destacam-se: a construção de mapas de risco costeiro, a partir da análise de uma série de 30 anos de dados de agitação marítima; o desenvolvimento e aplicação do sistema de alerta e da plataforma WEB para a zona da praia de São João da Caparica e para o porto e baía da Praia da Vitória (Terceira, Açores); a aplicação, com recurso a ferramentas SIG, de metodologias quantitativas de análise das consequências do galgamento/inundação (por exemplo, o Processo de Análise Hierárquica – AHP); e a realização de ensaios em modelo físico de galgamento de uma secção do perfil do molhe sul do porto da Praia da Vitória, cujos dados serão utilizados na avaliação do desempenho de ferramentas baseadas em fórmulas empíricas, redes neuronais e/ou modelos numéricos. A comunicação termina com uma referência ao trabalho futuro.

**Palavras-chave:** agitação marítima; avaliação de risco; galgamento/inundação; gestão costeira e portuária; SIG; sistema HIDRALERTA.

---

<sup>1</sup> LNEC; Av. do Brasil 101; 1700-066 Lisboa; jfortes@lnec.pt, treis@lnec.pt, pposeiro@lnec.pt, garci2010@gmail.com, rcapitao@lnec.pt, lpinheiro@lnec.pt, rreis@lnec.pt, jcraveiro@lnec.pt, inesfl90@gmail.com, pedro\_jeanpierre@hotmail.com; 00351 218443445.

<sup>2</sup> ISEL-IPL; Rua Conselheiro Emídio Navarro 1; 1959-007 Lisboa; jasantos@dec.isel.ipl.pt; 00351 218317002.

<sup>3</sup> NOVA LINGS, DI, FCT/UNL; Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, a.rodrigues@fct.unl.pt, amgs@campus.fct.unl.pt, joao.araujo@fct.unl.pt; 00351 212948536.

<sup>4</sup> UNL/FCT; Quinta da Torre; 2829-516 Caparica; jcrf@fct.unl.pt, s.silva@campus.fct.unl.pt, praposeiro@fct.unl.pt, cpsilva@fct.unl.pt; 00351 212948536.

<sup>5</sup> Universidade dos Açores-CCMMG; Rua Capitão João D'Ávila; 9700-042 Angra do Heroísmo; anabela@uac.pt, edubrito@mail.angra.uac.pt, fvieira@uac.pt; 00351 29540236.

<sup>6</sup> Azorina – Sociedade de Gestão Ambiental e Conservação da Natureza, S.A.; Edifício das Pescas - Porto de S. Mateus da Calheta; 9700-025 Angra do Heroísmo; Maria.CS.Rodrigues2@azores.gov.pt; 00351 295240106.

## 1. INTRODUÇÃO

No planeamento e gestão integrada de zonas costeiras e portuárias, torna-se fundamental desenvolver instrumentos de auxílio às autoridades competentes para prevenir situações de emergência e de risco associadas à ação da agitação marítima ou para planear a curto e médio prazo intervenções que visem minimizar esses riscos. Em especial, destacam-se os casos relacionados com o galgamento de estruturas costeiras e portuárias, pelo risco associado à destruição dessas estruturas ou à inundação das zonas por elas protegidas.

Neste âmbito, encontra-se em desenvolvimento no LNEC um sistema de previsão, alerta e avaliação de risco associado ao galgamento e inundação em zonas costeiras e portuárias, que opera a partir da utilização de medições e previsões da agitação marítima nessas zonas. Trata-se de uma ferramenta capaz de:

- a) avaliar, em tempo real, situações de emergência e emitir alertas dirigidos às entidades competentes sempre que se preveja que a segurança de pessoas, bens ou atividades desenvolvidas nessas zonas esteja em causa;
- b) produzir mapas de risco que possibilitem o apoio à decisão para a gestão a médio e a longo prazo das zonas costeiras e portuárias.

O protótipo deste sistema está a ser desenvolvido para o porto e baía da Praia da Vitória (Terceira, Açores) e para uma praia na zona da Costa da Caparica. O trabalho desenvolvido é financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia e envolve a participação das seguintes instituições: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, do Departamento de Hidráulica e Ambiente), Universidade Nova de Lisboa (Faculdade de Ciências e Tecnologia e Faculdade de Ciências Sociais e Humanas) e Universidade dos Açores.

Nesta comunicação apresenta-se um resumo das principais metodologias e resultados até agora alcançados no projeto HIDRALERTA. Assim, no ponto 2, a seguir a esta introdução, descrevem-se o sistema e as suas principais componentes, no ponto 3 descrevem-se os casos de estudo e os desenvolvimentos já efetuados para os mesmos e no ponto 4 apresentam-se algumas considerações finais.

## 2. O SISTEMA HIDRALERTA

### 2.1 Generalidades

O sistema HIDRALERTA (Neves *et al.*, 2012; Fortes *et al.*, 2013; Poseiro *et al.*, 2013a; Fortes *et al.*, 2014; Sabino *et al.*, 2014, 2015) é um sistema de previsão e de avaliação de risco associado ao galgamento e inundação em zonas costeiras e portuárias, que se baseia em medições e previsões da agitação marítima ao largo. Para testar este sistema, são usados dois protótipos: a praia de São João da Caparica e o porto e baía da Praia da Vitória.

O sistema utiliza as medições e previsões de agitação marítima ao largo para a determinação dos seus efeitos em termos de valores de galgamento e/ou de cotas de inundação em áreas específicas, recorrendo a modelos numéricos, redes neuronais e fórmulas empíricas. A comparação destes valores com valores máximos admissíveis pré-estabelecidos permite: i) a avaliação, em tempo real, de situações de emergência e a

emissão de alertas dirigidos às entidades competentes sempre que se preveja estar em causa a segurança de pessoas, bens ou atividades desenvolvidas; e ii) a construção de mapas de risco, considerando longas séries temporais de previsões da agitação marítima ou cenários pré-definidos associados a mudanças climáticas e/ou a eventos extremos.

Este sistema resulta assim numa ferramenta de apoio ao planeamento e gestão de zonas costeiras e portuárias. Com efeito, uma vez que permite a identificação de situações de emergência, possibilita também, atempadamente, a adoção de medidas, pelas entidades responsáveis, para evitar perdas de vidas e minimizar prejuízos económicos e ambientais. Além disso, a sua componente de gestão a longo prazo permite simular cenários futuros.

Saliente-se que as ferramentas desenvolvidas, tradicionalmente, possibilitavam já o zonamento ponderado de riscos (projetando e localizando tendências de evolução de fatores potencialmente danosos), como ainda experimentado para a zona da Costa da Caparica (Craveiro *et al.*, 2012), mas não permitiam atender a avaliações de emergência em tempo real. Com efeito, a abordagem convencional limita-se a um zonamento de vulnerabilidades, considerando o uso e ocupação do solo e os danos prováveis indiciados por futuros eventos extremos, de natureza disruptiva. Ora, este tipo de abordagem convencional adequa-se certamente a um ordenamento do território, sendo útil numa perspetiva de longo prazo. Contudo, a programação de ações de emergência requer uma outra escala de intervenções, em tempo real, mais em função de condições observadas e circunstanciais de momento.

É neste sentido que o sistema ensaiado se torna eficaz, assumindo uma escala de intervenção adequada a situações de emergência, e integrando um sistema de alerta, como descrito a seguir. O utilizador dispõe, assim, de uma ferramenta de simulação imediata, em plataforma web, de acordo com condições reais e observadas a ter em conta.

O sistema é constituído por 4 módulos (Figura 1): I – Características da Agitação Marítima; II – Galgamento/Inundação; III – Avaliação do Risco, e IV - Sistema de Alerta. O sistema está a ser desenvolvido em linguagem Python e implementado numa plataforma WebGIS.



Figura 1. Esquema do sistema HIDRALERTA.

## 2.2 Agitação marítima

O objetivo deste módulo é a determinação das características da agitação marítima em zonas costeiras e portuárias a partir das respetivas condições ao largo (Poseiro *et al.*, 2013a, 2014b). Estas características podem ser obtidas através de previsões de modelos regionais, até 180 horas, o que constitui a base do sistema de alerta, ou através da síntese de regimes de agitação marítima locais já existentes, necessários para a avaliação do risco de galgamentos e inundações.

Neste módulo são utilizados vários modelos numéricos, nomeadamente: o modelo de previsão da agitação marítima à escala regional, WAVEWATCH III (WWIII; Tolman, 1999); o modelo espectral não linear de geração e propagação de ondas em zonas costeiras, SWAN (Booij *et al.*, 1999); o modelo linear de propagação de ondas em zonas portuárias, DREAMS (Fortes, 2002); e o modelo de Boussinesq BOUSS-WMH (Pinheiro, 2015).

Na componente de alerta, o sistema faz diariamente o *download*, a partir do *Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center* (FNMOC), das características da agitação marítima ao largo previstas com o modelo WWIII (180 horas seguintes, com intervalo de 3 horas). Estes valores são transferidos para junto à costa com o modelo SWAN e, no caso de se tratar de zonas portuárias, são ainda aplicados os modelos DREAMS ou BOUSS-WMH, consoante haja necessidade de considerar um modelo linear ou não linear, respetivamente. Estes dois últimos modelos consideram o efeito de reflexão no interior das bacias portuárias.

Para a avaliação do risco, em vez de previsões de agitação marítima, o sistema utiliza séries temporais longas estimadas pelo modelo WWIII para o largo, as quais são depois transferidas para a costa, tal como acontece no sistema de alerta, com os modelos SWAN, DREAMS ou BOUSS-WMH. A avaliação do risco pode também ser feita para cenários futuros pré-definidos, associados a mudanças climáticas e/ou a eventos extremos.

Em termos do trabalho desenvolvido neste módulo, efetuou-se:

- a) Automatização do processo de *download* (Neves *et al.*, 2012; Poseiro *et al.*, 2013a,b) dos dados referentes à agitação marítima, com o modelo de previsão WWIII (FNMOC) e a inclusão do modelo WAM (ECMWF) para o mesmo efeito, das marés, com o modelo WXTide, e dos ventos, fornecidos pelo modelo NAVGEM (FNMOC) e também pelo modelo WAM (ECMWF);
- b) Acoplamento dos modelos WWIII/WAM, SWAN e DREAMS, e validação de cada modelo, bem como do seu acoplamento, através da comparação com medições efetuadas *in situ* (dados de boia no porto da Praia da Vitória e na praia da Costa da Caparica);
- c) Automatização dos processos de criação dos *layouts* gerados por cada um dos modelos numéricos, bem como dos ficheiros que indicam os valores obtidos para cada parâmetro em pontos específicos;
- d) Realização de uma campanha de medição de dados de agitação marítima (Capitão *et al.*, 2012), em 29 e 30 de outubro de 2012, na praia de São João da Caparica (Figura 1), onde se efetuaram medições de dados hidrodinâmicos para testar e validar os modelos numéricos do sistema HIDRALERTA. Além desta campanha de medições, foram efetuadas duas campanhas de levantamento de perfis de praia em 29 e 30 de abril e 10 de outubro de 2014 (Poseiro *et al.*, 2014a,c);

- e) Aperfeiçoamentos do modelo de Boussinesq BOUSS-WMH (Pinheiro, 2015), que resolve as equações de Boussinesq estendidas, deduzidas por Nwogu (1993). Estes aperfeiçoamentos passaram pela inclusão de termos adicionais para modelar a geração das ondas no interior do domínio, a absorção e reflexão das ondas nas fronteiras, para controlar as oscilações numéricas, para incluir a dissipação de energia devida ao atrito de fundo e à rebentação das ondas, fenómenos particularmente importantes em zonas de baixa profundidade;
- f) Desenvolvimento de uma rede neuronal do tipo ARTMAP com lógica Fuzzy (Santos, 2013) para determinação de condições de agitação marítima à entrada de portos e no seu interior, que tem uma grande eficiência computacional e que poderá, em certos casos, substituir a utilização dos modelos numéricos. Esta rede foi já aplicada na previsão da agitação marítima transferida desde a boia situada em frente ao Porto de Sines até ao posto 2 do seu terminal de granéis líquidos.

Recentemente, tem-se efetuado a aplicação da ferramenta acoplada WWIII, SWAN e/ou DREAMS a vários locais da costa portuguesa, para além dos portos da Praia da Vitória e da Costa da Caparica, com o objetivo de aí estabelecer os regimes de agitação marítima observados, médios e/ou de extremos. Consideraram-se 30 anos de dados de agitação marítima ao largo fornecidos pelos modelos WWIII ou WAM. Os locais de estudo são os portos de Ponta Delgada, Madalena do Pico, Sines, Funchal, Leixões, Nazaré, Sines e Faro, bem como as zonas costeiras do Arquipélago dos Açores (Rocha *et al.*, 2013; Santos, 2013; Pereira *et al.*, 2014).

### 2.3 Galgamento e inundação

O objetivo deste módulo é a determinação do espraiamento (*run-up*), galgamentos em áreas costeiras (*overwash*) e infraestruturas portuárias (*overtopping*) e consequente inundação (*coastal flood*). Para uma dada condição de agitação marítima, prevista ou observada utilizando o módulo I do sistema, estimam-se os valores da cota de inundação e do caudal médio galgado correspondentes. Encontra-se igualmente em curso a determinação do volume máximo de galgamento, o qual irá complementar a avaliação de risco e o processo de tomada de decisão com informação relativa aos extremos de cada evento gerador de galgamento.

A cota de inundação é obtida pela soma do espraiamento com o nível de maré tendo ainda em consideração o efeito da sobrelevação meteorológica do nível do mar (*storm surge*). Para o cálculo da inundação em zonas costeiras, sem e com estruturas de proteção, utilizam-se fórmulas empíricas da literatura que estimam o espraiamento e/ou o galgamento (Fortes *et al.*, 2013), bem como fórmulas desenvolvidas e testadas no âmbito do HIDRALERTA (Mase *et al.*, 2013; Reis *et al.*, 2013).

Para o caso de galgamento de zonas com estruturas portuárias (*overtopping*), recorre-se à ferramenta de redes neurais artificiais NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) que fornece o caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura. De forma complementar, consideraram-se ainda outras ferramentas neurais (Verhaghe, 2005; Santos *et al.*, 2013).

Os desenvolvimentos efetuados até ao presente consistiram no/a:

- Desenvolvimento de formulações:
  - a) Desenvolvimento de novas formulações de espraçamento e galgamento para o caso de estruturas localizadas em zonas de águas pouco profundas ou com o pé da estrutura essencialmente acima do nível de água (Mase *et al.*, 2013), que foram incorporadas no sistema;
  - b) Extensão a estruturas marítimas verticais da aplicabilidade da formulação semi-empírica de cálculo do galgamento de Hedges e Reis (Reis *et al.*, 2013), inicialmente desenvolvida para estruturas em talude;
  - c) Análise numérica e física do galgamento onda a onda, muito importante para a definição de níveis (*thresholds*) para acionamento de alertas, quer em termos de caudais médios de galgamento, quer em termos de volumes máximos;
- Aplicação de fórmulas empíricas:
  - d) Desenvolvimento/aperfeiçoamento de programas em Fortran para a implementação das fórmulas empíricas, de modo a realizar-se o acoplamento destas fórmulas e da ferramenta neuronal com os modelos numéricos, bem como a visualização automática dos resultados (Fortes *et al.*, 2013a,b,c);
  - e) Realização de cálculos de espraçamento e de galgamento com as fórmulas empíricas existentes para vários locais da costa portuguesa (Costa da Caparica, Vale do Lobo);
- Desenvolvimento/aplicação de ferramentas neuronais:
  - f) Integração da ferramenta neuronal NN\_OVERTOPPING2 com os modelos de agitação marítima com vista a obter previsões dos galgamentos em cada secção de estrutura considerada;
  - g) Implementação de uma nova ferramenta neuronal Overtopping (Verhaghe, 2005) que é mais adequada para previsão de pequenos caudais. Efetuou-se a comparação dos resultados obtidos por esta ferramenta neuronal e pela NN\_OVERTOPPING2 para o porto da Praia da Vitória (Reis *et al.*, 2014);
  - h) Desenvolvimento de uma nova rede neuronal do tipo ARTMAP com lógica Fuzzy para o cálculo do galgamento de estruturas marítimas (Santos, 2013) que, após calibração, pode consistir numa alternativa às ferramentas NN\_OVERTOPPING2 e Overtopping, sobretudo para pequenos caudais. A rede foi aplicada ao estudo do galgamento de um trecho do molhe Oeste do porto de Sines (Santos *et al.*, 2013). Os resultados obtidos até ao momento foram bastante satisfatórios, apesar de terem utilizado para parâmetros de treino da rede valores ainda não otimizados, pelo que será necessário realizar uma análise de sensibilidade a estes parâmetros para garantir que a rede ARTMAP-Fuzzy gera os melhores resultados possíveis.

Recentemente, tem-se efetuado cálculos das séries temporais de caudal médio galgado (com recurso a ferramentas neuronais) para diferentes secções das estruturas dos portos de Praia da Vitória, Ponta Delgada, Madalena do Pico e Funchal, com base em longas séries de agitação marítima - até 30 anos de dados. Estão ainda a ser realizados ensaios em modelo físico de galgamento dessas estruturas tipo para medição do espraçamento e

caudais galgados. Estes dados serão utilizados na avaliação do desempenho de ferramentas baseadas em fórmulas empíricas, redes neuronais ou modelos numéricos.

## 2.4 Avaliação do risco

O objetivo deste módulo é a avaliação do risco ao galgamento/inundação em zonas costeiras e portuárias e a construção de mapas de risco. A avaliação do risco é baseada na determinação do grau de risco, resultante do produto do grau de probabilidade associado à ocorrência de galgamento/inundação acima de um certo limiar pré-estabelecido pelo grau de consequências associado aos prejuízos desse acontecimento.

O estabelecimento do limiar para o galgamento/inundação depende do tipo de estrutura, bem como da avaliação da natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura e do impacto do galgamento/inundação na segurança de pessoas e infraestruturas. Tal avaliação passa pela caracterização da zona em estudo, no que diz respeito à distribuição espacial das pessoas, edifícios, infraestruturas, vias de comunicação, vegetação, modelo digital de superfície, etc. Tem sido realizado um trabalho importante junto das instituições locais para a obtenção da maior informação possível dos locais de estudo. Os limites de caudal de galgamento são definidos com base nas diretivas existentes (Pullen *et al.*, 2007), que levam em conta a natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura, o perfil da estrutura galgada e a necessidade de garantir a segurança de pessoas e infraestruturas localizadas nessa zona.

As consequências dos galgamentos/inundações têm sido estimadas com uma metodologia que permite avaliar de forma qualitativa o grau de consequências de acontecimentos perigosos na zona em estudo (Raposeiro *et al.*, 2010). Outras metodologias, de âmbito mais quantitativo, têm sido também implementadas, como AHP e ANP (Saaty, 1996, 2005; Craveiro *et al.*, 2012). A determinação da perigosidade, da vulnerabilidade e do risco na Costa da Caparica (litoral arenoso com e sem estruturas de proteção) tem sido efetuado com recurso a uma base de dados georreferenciada e à análise multicritério.

Os desenvolvimentos efetuados até ao presente consistiram no/a:

- a) Estabelecimento da metodologia de avaliação do risco de galgamento/inundação numa dada zona costeira ou portuária: a) avaliar a natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura e qual o impacto da inundação/galgamento na segurança de pessoas e infraestruturas; b) estabelecer os caudais críticos de galgamento admissíveis em cada secção de estrutura; c) avaliar o grau de probabilidade de ocorrência desses caudais; d) avaliar o grau de consequências; e) avaliar o Grau de risco=Grau de probabilidade X Grau de consequências (Neves *et al.*, 2012; Poseiro *et al.*, 2013a);
- b) Aplicação das metodologias de risco a vários locais da costa portuguesa (Raposeiro *et al.*, 2010; Neves, 2013; Neves *et al.*, 2012, 2013; Pereira *et al.*, 2014; Rodrigues, 2014);
- c) Desenvolvimento de metodologias de análise das consequências da ocorrência de galgamentos, nomeadamente:
  - Metodologia simples: de forma qualitativa e global, define as consequências que um galgamento/inundação têm para a zona de estudo (para as atividades

desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura, para o perfil da estrutura galgada, para a segurança de pessoas e infraestruturas localizadas nessa zona ou para o ambiente) (Raposeiro *et al.*, 2010, 2013). Note-se que nesta metodologia não há qualquer hierarquização ou atribuição de pesos a estas diferentes vertentes ambientais, económicas ou sociais. É uma forma qualitativa de obter para uma zona de estudo o grau de consequências da ocorrência de um dado evento perigoso (acima de um dado limiar pré-estabelecido);

- Processo de Análise Hierárquica - AHP (Saaty, 1996): permite analisar espacialmente, classificar e atribuir pesos a cada uma das vertentes que caracterizam uma dada zona de estudo, através do desenvolvimento de um índice espacial de pressão antrópica (Antunes, 2012; Poseiro *et al.*, 2013b);
- Processo Analítico em Rede - ANP (Saaty, 1996, 2005): extensão do AHP, distingue-se deste por ser uma técnica de avaliação de risco que dá maior ênfase à probabilidade de risco, ao impacto, ao *feedback* e à independência entre os riscos. O ANP permite assim a existência de *feedback* e dependência entre os elementos do sistema e ainda determinar os pesos de cada um dos elementos.

Foram efetuadas aplicações das metodologias na análise das consequências aos portos da Praia da Vitória e de Ponta Delgada (Poseiro *et al.*, 2013a,b; Rodrigues, 2014);

- d) Desenvolvimento de mapas de vulnerabilidade, perigosidade e risco costeiro aos galgamentos/inundações utilizando o Sistema de informação Geográfica ArcGis™:
- Construção da base de dados georreferenciada com os usos e ocupações do solo suscetíveis aos diferentes perigos para a Planície Costeira da Costa da Caparica (entre a Cova do vapor e a Ribeira Foz do Rego);
  - Construção de um modelo digital de terreno (topográfico e batimétrico) que suporte uma base de dados georreferenciada sobre a componente biofísica e geomorfológica para a Planície Costeira da Costa da Caparica.

Recentemente deu-se início à execução de um manual de mapas de risco de apoio à decisão (com base na análise multicritério) para as áreas costeiras de baixa vulnerabilidade e à construção do modelo de governança e gestão do risco para áreas costeiras de elevada vulnerabilidade a fenómenos de galgamento e inundação. Os pontos abordados são i) identificação da organização e procedimentos da Autoridade Nacional de Proteção Civil / Proteção Civil Municipal face a fenómenos extremos; ii) quais as estratégias de prevenção, mitigação e proteção; iii) como é feito o planeamento de emergência; iv) perceber a arquitetura e fluxos, ou seja, que entidades e meios estão envolvidos, em que fase atuam, qual é a cadeia causal desde que é dado o alerta até os meios estarem no terreno.

## 2.5 Sistema de alerta

O objetivo deste módulo é a identificação, em tempo real, das situações de emergência para uma determinada área de interesse e o envio automático de mensagens de alerta para as autoridades responsáveis. Cada um destes passos corresponde a uma componente do módulo.



Na componente de identificação de situações de emergência, parte-se do princípio que estas ocorrem sempre que o limiar de galgamento/inundação, em cada secção das estruturas/praias analisadas, é ultrapassado. Os resultados desta componente são gráficos, mapas e relatórios que são depois transmitidos à componente de interação com o utilizador para que este proceda à avaliação da situação.

A componente de interação com o utilizador é materializada numa aplicação web, na qual todo o sistema de alerta está parametrizado (Sabino *et al.*, 2014, 2015). A aplicação está desenhada para ser utilizada em *browsers* tradicionais e móveis, adequando a informação às características do dispositivo cliente.

Este módulo envolve a construção de uma base de dados intermédia que relaciona as localizações de áreas de risco e sensores com os dados coletados pelos sensores, os resultantes de transferências de dados e os resultados de processos de avaliação de galgamentos/inundações.

A plataforma Web está a ser desenvolvida com recurso a ferramentas de domínio público: a plataforma de desenvolvimento web Django (Python), para o componente de interação; e o sistema de gestão de base de dados PostgreSQL (com a extensão espacial PostGIS), permitindo oferecer visualizações através de mapas.

O desenvolvimento do módulo conduziu ainda a um estudo sobre a variabilidade no desenho de aplicações de alerta em zonas costeiras, identificando as diferenças entre vários cenários de aplicação. Este estudo resultou no modelo de variabilidade para o domínio de aplicação (Figura 2).

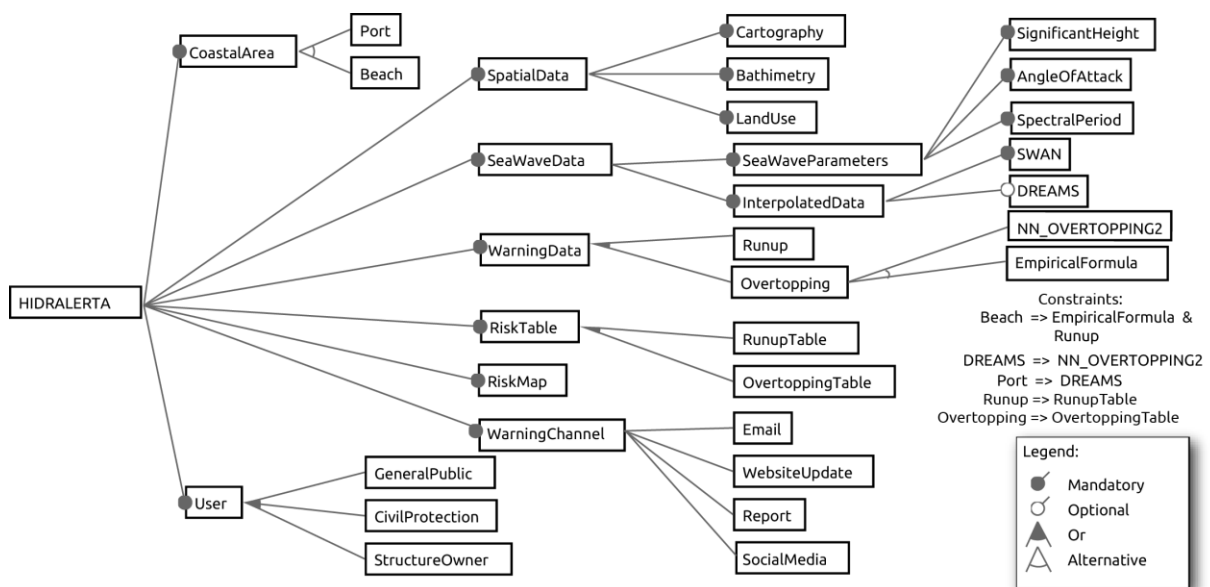


Figura 2. Modelo de variabilidade.

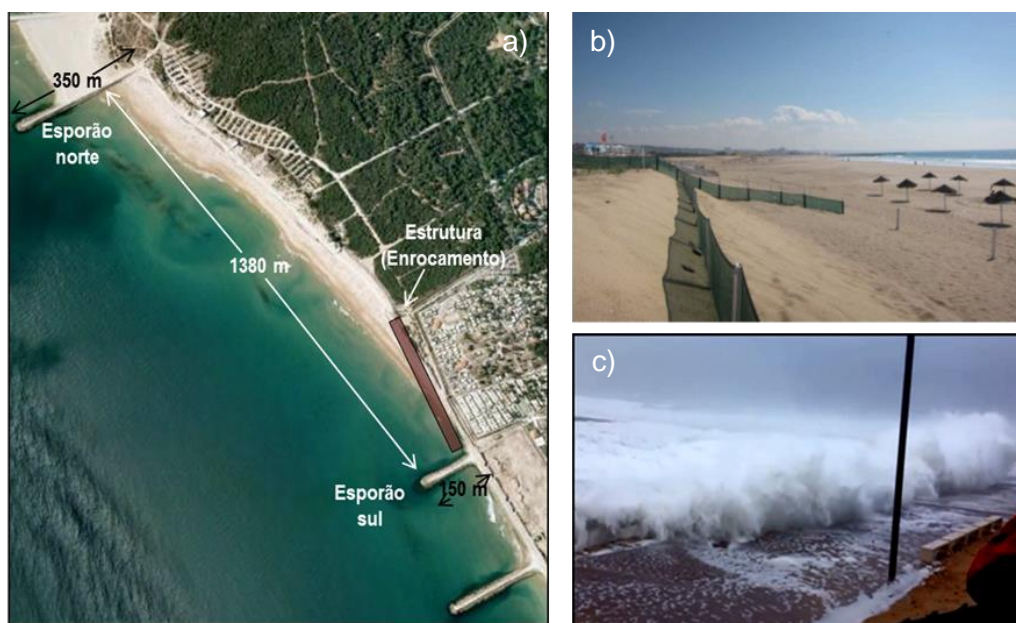
### 3. APLICAÇÃO AO PORTO E BAÍA DA PRAIA DA VITÓRIA E À PRAIA DE SÃO JOÃO DA CAPARICA

#### 3.1 São João da Caparica

A praia de São João da Caparica localiza-se no extremo norte da Costa da Caparica, município de Almada (Figura 3). Trata-se de uma praia relativamente extensa, representando uma área balnear de grande importância para as cidades de Lisboa e Almada. Constitui ainda um ponto de lazer para moradores e turistas durante todo o ano.

A praia de São João da Caparica tem um comprimento de 1380 m e está confinada entre dois esporões. O esporão norte tem um comprimento de 350 m e o esporão sul tem um comprimento de 150 m. A praia é de origem sedimentar arenosa e é caracterizada por um sistema dunar pequeno e frágil, com uma série de construções de madeira (bares e restaurantes) localizados na duna frontal (Figura 3b). Junto ao esporão sul encontra-se ainda uma estrutura longitudinal aderente constituída por uma camada de enrocamento e com um núcleo constituído por areias e pedras de pequenas dimensões.

A escolha por este local foi resultado das seguintes razões: a) encontra-se próximo de uma cidade onde o risco associado à ocorrência de galgamento/inundação é de maior importância para a sociedade civil; b) é um local onde existem vários dados históricos de perfis batimétricos e topográficos, de agitação, de situações de galgamentos da estrutura aderente e inundação das zonas adjacentes; c) foi neste local que recentemente, em janeiro de 2014, ocorreu um grave evento de galgamento e inundação.



**Figura 3.** a) Praia de São João da Caparica. Praia em situação b) calma e c) de tempestade.

Para esta praia, o trabalho efetuado até à data envolveu: a) campanhas de medições; b) aplicação da metodologia de avaliação do risco em dois perfis da praia, sem e com estrutura aderente, para 30 anos de dados; c) construção de mapas de vulnerabilidade, de

perigosidade e de risco costeiro (Ferreira *et al.*, 2015) (Figura 4); d) desenvolvimento do sistema de alerta; e) desenvolvimento da plataforma WEB (Figura 5).

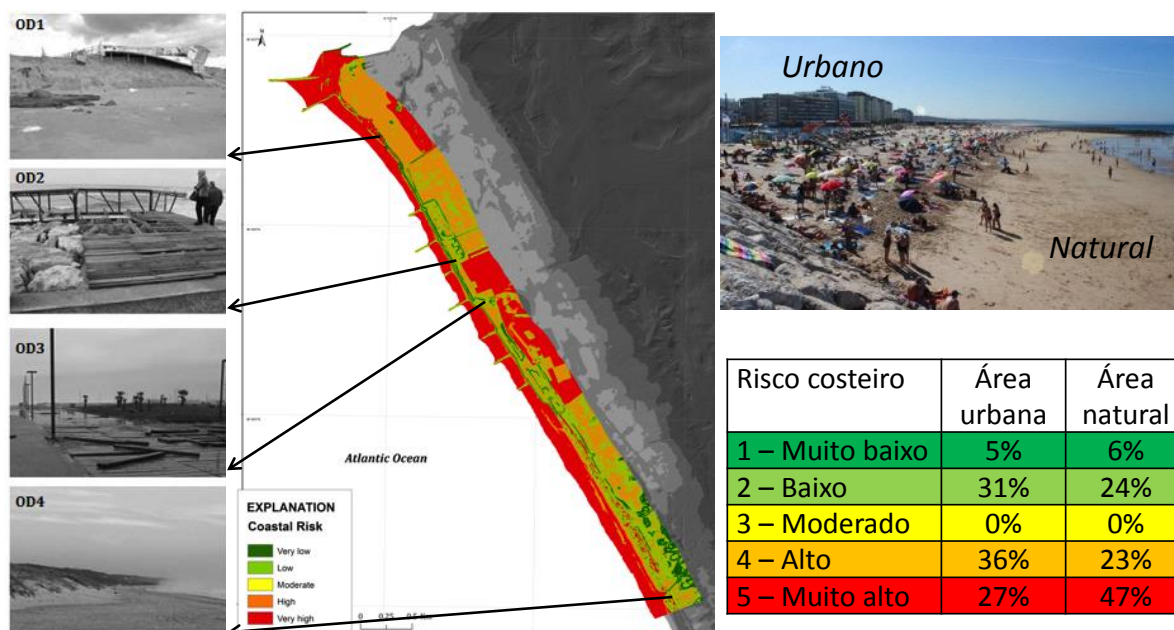


Figura 4. Mapa de risco costeiro.

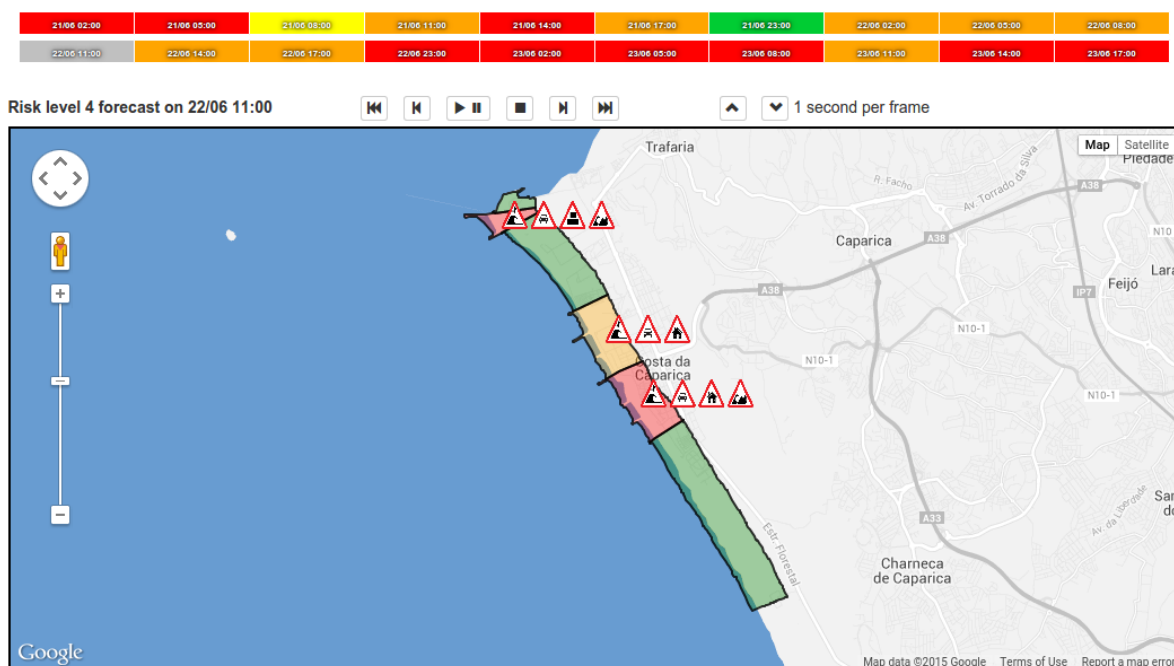


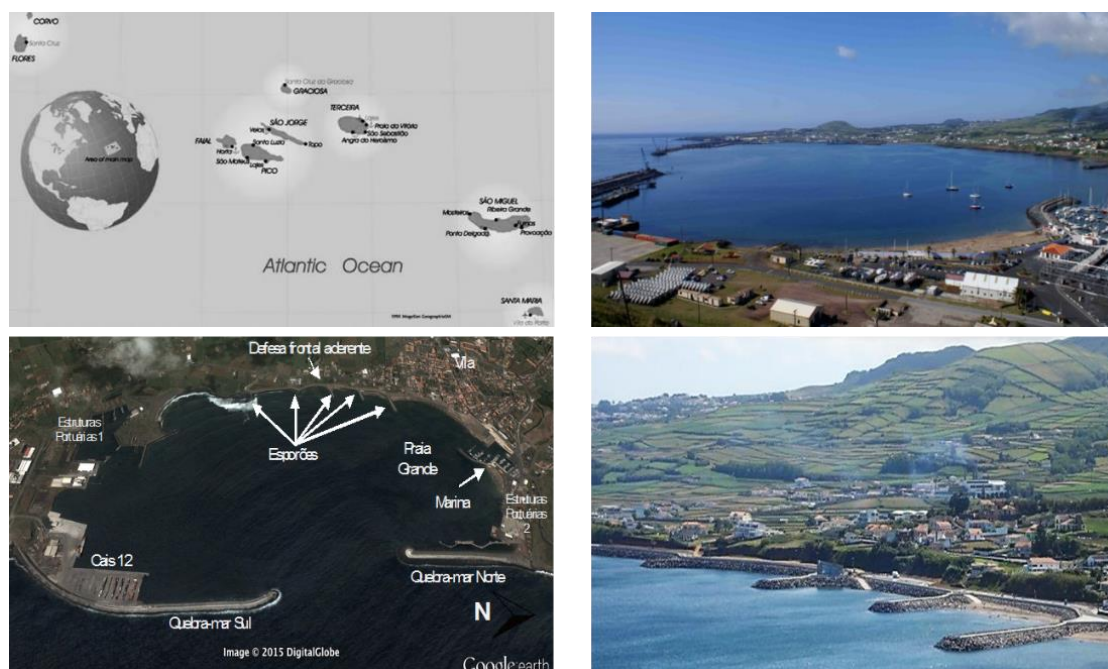
Figura 5. Sistema de alerta e Plataforma WEB.

A opção pelo desenvolvimento da aplicação na WEB garante consistência na apresentação da informação proveniente das diversas fontes de dados envolvidas no projeto. Torna-se também

mais simples oferecer acesso a novos colaboradores, sem impor restrições tecnológicas para além do acesso a um *browser* atual. A abordagem WEB torna ainda mais eficiente alargar o acesso a plataformas móveis, já que estas acedem ao mesmo conteúdo, que se adapta às restrições dos dispositivos.

### 3.2 Porto e baía da Praia da Vitória

A baía da Praia da Vitória localiza-se na costa este da Ilha Terceira, uma das nove ilhas do arquipélago dos Açores (Figura 6), e tem cerca de 2400 m de comprimento e 1200 m de largura (Figura 6). A proteção da baía é realizada por intermédio de 2 quebra-mares: quebra-mar norte, com 560 m de comprimento, destinado a abrigar as instalações portuárias de apoio à Base Aérea das Lajes; e quebra-mar sul, com cerca de 1300 m de comprimento e um traçado curvo, para abrigar as instalações portuárias dos setores comercial e das pescas. O porto da Praia da Vitória é a maior infraestrutura portuária dos Açores e a segunda maior, a seguir à de Ponta Delgada, no que se refere ao movimento de navios e de mercadorias.



**Figura 6.** Localização dos Açores no Oceano Atlântico e mapa da baía da Praia da Vitória, com as suas principais estruturas portuárias. Vistas da baía e das estruturas de proteção no seu interior.

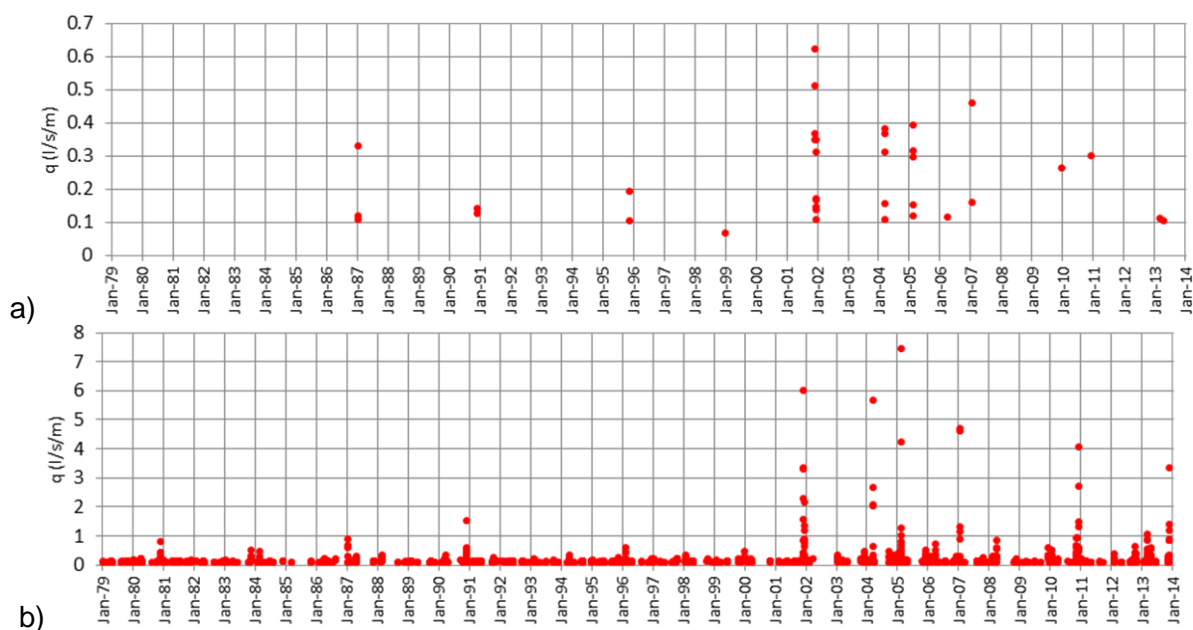
A linha de costa da baía caracteriza-se pela existência de uma defesa frontal aderente com cerca de 1 km de comprimento e de um campo de cinco esporões na zona central, em frente à abertura existente entre os molhes, que enraízam na defesa frontal. Estes têm comprimentos diferentes e estão implantados segundo uma direção próxima de WSW-ENE. Beneficiando do abrigo proporcionado pelo quebra-mar norte, foi construída, no final da década de 1990, pela Câmara Municipal da Praia da Vitória, uma marina, entre a Prainha e a Praia Grande, com cerca de 210 postos de amarração, cais de receção e infraestruturas de apoio.

Para este local, o trabalho efetuado até à data envolveu: a) a aplicação da metodologia de

avaliação do risco às estruturas existentes na baía; b) a construção de mapas de risco; c) a aplicação das análises multicritério AHP e ANP para a criação do mapa de consequências; d) o desenvolvimento do sistema de alerta; e) a criação da plataforma WEB.

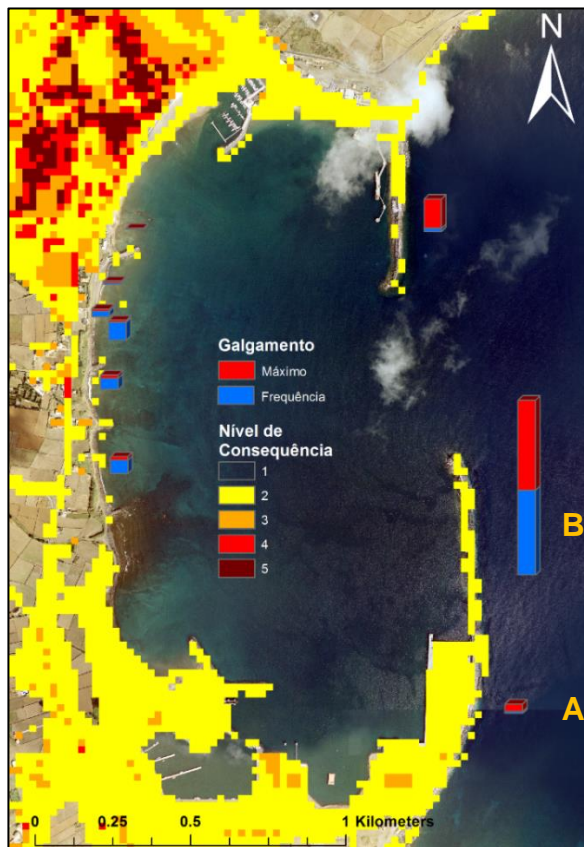
Na Figura 8 apresentam-se os resultados da avaliação das consequências considerando:

- a série temporal da agitação marítima de 30 anos, obtida por transferência dos dados de 30 anos previstos por WWIII para junto à baía com o modelo SWAN; utilizaram-se as características da agitação marítima estimadas pelo modelo WWIII (Tolman, 1999), as estimativas de ventos do modelo NCDC/NOAA (Tolman, 1999) e a variação do nível de maré astronómica do modelo da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL). O modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999), primeiro, e o modelo DREAMS (Fortes, 2002), a seguir, permitiram o cálculo das condições de agitação marítima em frente às estruturas no interior da baía;
- a série temporal do caudal médio de galgamento obtido para cada estrutura, com base na ferramenta NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005), que considera as características de agitação marítima obtidas com o modelo DREAMS e as características geométricas da estrutura (Poseiro *et al.*, 2013a); a Figura 7 ilustra estes resultados para as duas secções do quebra-mar sul consideradas;
- o AHP de avaliação das consequências.

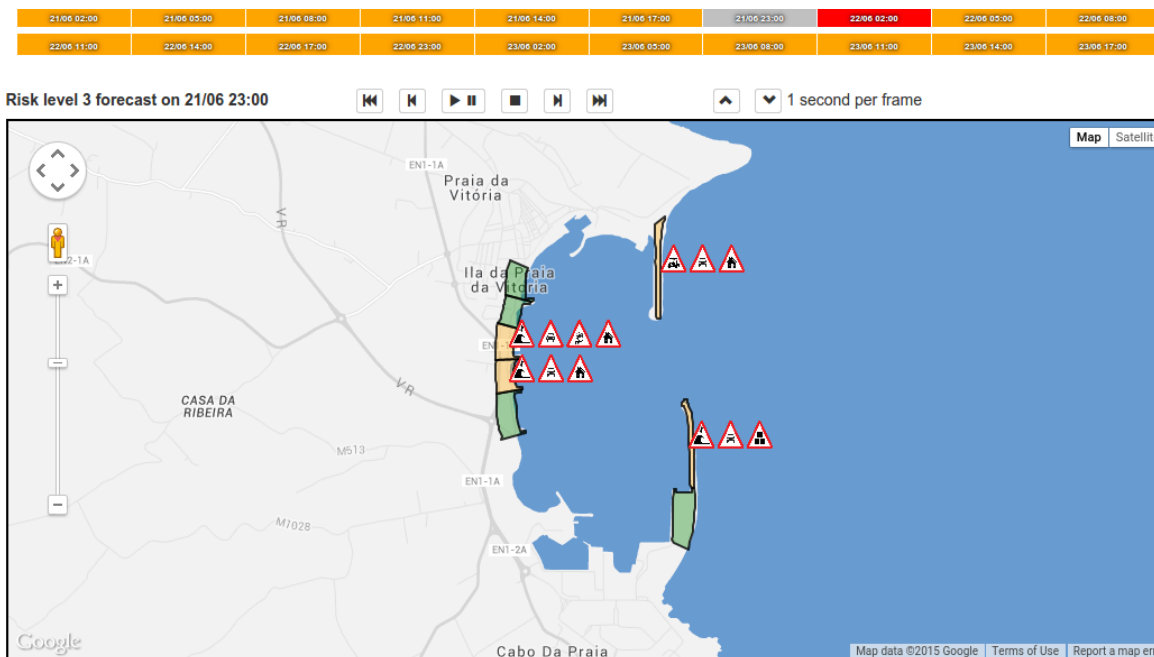


**Figura 7.** Série temporal do caudal médio de galgamento,  $q$ , obtido para o quebra-mar sul de proteção do porto e baía da Praia da Vitória: a) secção A; b) secção B.

Na Figura 9 apresenta-se a plataforma WEB que está a ser desenvolvida para este local de estudo.



**Figura 8.** Mapa de consequências da ocorrência de galgamentos/inundações na Praia da Vitória, frequência de ocorrência e valor máximo de  $q$ .



**Figura 9.** Sistema de Alerta e Plataforma WEB.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Efetuiu-se nesta comunicação um resumo das metodologias e dos principais resultados obtidos no desenvolvimento do sistema HIDRALERTA – sistema de previsão e alerta de inundações em zonas costeiras e portuárias. Trata-se de um sistema em ambiente SIG que tem como ideia-base a utilização de previsões da agitação marítima (a 180 horas) para calcular os efeitos dessa agitação na costa, nomeadamente em termos de galgamentos e inundações.

Dos trabalhos mais recentes salientam-se a construção de mapas de risco costeiro e o desenvolvimento e aplicação dos sistemas de alerta e da plataforma WEB para os dois casos de estudo: a zona da praia de São João da Caparica e o porto e baía da Praia da Vitória.

Salienta-se ainda a realização de ensaios em modelo físico de galgamento de uma secção do perfil do molhe sul do porto da Praia da Vitória. Estes dados serão utilizados na avaliação do desempenho de ferramentas baseadas em fórmulas empíricas, redes neuronais ou modelos numéricos.

Finalmente, o trabalho futuro envolverá as seguintes atividades:

- aplicar o modelo de ondas BOUSS-WMH aos casos de estudo do projeto;
- criar mapas que ilustrem a distribuição espacial dos volumes galgados, que possam ser cruzados/complementados com mapas de consequências, de modo a poderem obter-se mapas de risco mais completos de ocorrência de galgamentos/inundações;
- melhorar a metodologia de construção de mapas de consequências através da especificação *a priori* de pesos a atribuir a cada indicador/sub-indicador, de acordo com informações fornecidas pelas autoridades portuárias e costeiras. Caso se considere necessário, pode expandir-se a utilização do AHP a sub-indicadores, como se fez neste trabalho para o caso dos edifícios;
- definir os níveis (*thresholds*) para acionamento de alertas;
- melhorar as diferentes fases do sistema de alerta e da plataforma WEB.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o financiamento concedido através do projeto HIDRALERTA, ref. PTDC/AAC-AMB/120702/2010. A obtenção de dados da agitação marítima foi feita no âmbito do projecto ESTRAMAR (FEDER-MAC/3/C117) (E.B. Azevedo; F. V. Reis). Agradece-se também o apoio dos Portos dos Açores (F. Silva), da Câmara Municipal de Praia da Vitória, da APL (T. Sá Pereira), da FCUL (C. Antunes), do Restaurante Pé Nú (Carlos Manuel), da FCTUC (P. Neves e J. Antunes do Carmo), da FEUP (T. Rocha, J. Rodrigues e F. Taveira Pinto) e da Universidade da Madeira (D. Pereira e L. Lopes).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antunes, Ó. (2012). *Análise Multicritério em SIG para Determinação de um Índice Espacializado de Pressão Antrópica Litoral. Casos de Espinho, Caparica e Faro*. Tese de

Mestrado, FCSH, Universidade Nova de Lisboa.

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *J. Geographical Res.*, C4(104), 7649-7666.

Capitão, R., Fortes, C.J.E.M., Raposeiro, P. (2012). *Relatório da Campanha à Costa da Caparica, 29-30 de outubro de 2012*. Relatório 02/2012 – HIDRALERTA, LNEC. Lisboa, Portugal.

Coeveld, E.M., Van Gent, M.R.A., Pozueta, B. (2005). *Neural Network: Manual NN\_OVERTOPPING2*. CLASH WP8 – Report.

Craveiro, J.L., Antunes, O., Freire, P., Oliveira, F., Almeida, I.D., Sancho, F. (2012). Comunidades urbanas na orla costeira: a metodologia multicritério AHP (Analytic Hierarchy Process) para a construção de um índice de vulnerabilidade social face à ação marítima. In *Atas do 2º Congresso Ibero Americano de Responsabilidade Social*. Lisboa, Portugal.

Ferreira, J.C., Silva, S.F., Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Santos, J., Poseiro, P., Capitão, R., Pereira da Silva, C., Rodrigues, A., Sabino, A., Raposeiro, P.D., Craveiro, J., Simões, A., Azevedo, E., Malvarez, G.C., Tenedório, J.A. (2015). Vulnerabilidade e risco ao galgamento costeiro em situações de tempestade na Costa da Caparica. *Seminário sobre a Vulnerabilidade e Gestão do Risco Costeiro – que soluções para a Costa da Caparica?*. Organizado pelo Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia e FCT/UNL. CMI/ACosta da Caparica, 10 de abril.

Fortes, C.J.E.M. (2002). *Transformações Não Lineares de Ondas em Zonas Portuárias. Análise pelo Método dos Elementos Finitos*. Tese de Doutoramento, Eng. Mecânica, IST.

Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Poseiro, P., Capitão, R., Santos, J.A., Pinheiro, L.P., Rodrigues, A., Sabino, A., Rodrigues, M.C., Raposeiro, P., Ferreira, J.C., Silva, C., Simões, A., Azevedo, E.B. (2013). O Projeto HIDRALERTA. Sistema de Previsão e Alerta de Inundações em Zonas Costeiras e Portuárias. In *Atas das 8ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. LNEC, Lisboa, Portugal.

Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Neves, P. (2013a). *Programa Calcula\_Runup\_NovasEquações\_condições\_largo\_1.f. Programa de cálculo do run-up e do nível máximo de inundação utilizando várias formulações empíricas*. Relatório 01/2013 – HIDRALERTA, LNEC. Lisboa, Portugal.

Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Neves, P. (2013b). *Calcula\_Runup\_Holman\_condicoescosta.f. Programa de cálculo do runup e do nível máximo de inundação utilizando várias formulações empíricas*. Relatório 02/2013 – HIDRALERTA, LNEC. Lisboa, Portugal.

Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Neves, P. (2013c). *Calcula\_Runup\_galgamento\_Mase.f. Programa de cálculo do runup e do nível máximo de inundação utilizando várias formulações empíricas*. Relatório 03/2013 – HIDRALERTA, LNEC. Lisboa, Portugal.

Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Poseiro, P., Santos, J.A., Capitão, R., Pinheiro, L., Sabino, A., Rodrigues, A., Ferreira, J.C., Martinho, S., Raposeiro, P., Silva, C., Simões, A., Azevedo, E. B., Rodrigues M.C. (2014). Desenvolvimentos recentes do HIDRALERTA. Sistema de previsão e alerta de inundações em zonas costeiras e portuárias. In *Atas das 3ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, 24 a 26 de junho. Lisboa, Portugal. ISSN - 978-989-705-073-2.

Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T.S., Reis, M.T. (2013). Wave runup and overtopping at seawalls built on land and in very shallow water. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 139(5), 346-357.

Neves, D.R., Santos, J.A., Reis, M.T., Fortes, C.J.E.M., Simões, A., Azevedo, E.B., Rodrigues,



- M.C. (2012). Metodologia de avaliação do risco associado ao galgamento de estruturas marítimas. Aplicação ao porto e à baía da Praia da Vitória, Açores, Portugal. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 12(3), 291-312.
- Neves, P. (2013). *Avaliação do risco de inundação da zona da Costa da Caparica*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, FCT, Universidade de Coimbra.
- Neves, P., Poseiro, P., Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Capitão, R., Antunes do Carmo, J.S., Raposeiro, P., Ferreira, J.C. (2013). Aplicação da metodologia de avaliação do risco de inundação/galgamento na praia de São João da Caparica. In *Atas das 8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. LNEC, Lisboa, Portugal.
- Nwogu, O. (1993). Alternative form of Boussinesq equations for near-shore wave propagation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 119(6), 618-638.
- Pereira, D., Lopes, L. G., Reis, M. T., Fortes, C. J. E. M., Poseiro, P. (2014). Avaliação do risco de galgamento de estruturas portuárias: aplicação ao porto de Ponta Delgada. In *Atas das 3<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, 24 a 26 de junho. Lisboa, Portugal. ISSN - 978-989-705-073-2.
- Pinheiro, L.V. (2015) *Modelação Numérica da Propagação de Ondas e do Comportamento de Navios Amarrados no Interior de Portos*. Tese de Doutoramento, IST.
- Poseiro, P., Capitão, R., Fortes, C.J.E.M., Silva, S.F., Ferreira, J.C. (2014a). *Relatório do levantamento de perfis morfológicos do sistema praia-duna da Costa da Caparica, entre Cova do Vapor e Ribeira Foz do Rego - 29 e 30 de abril de 2014*. Relatório 01/2014 - HIDRALERTA, LNEC. Lisboa, Portugal.
- Poseiro, P., Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Santos, J.A., Simões, A., Rodrigues, C., Azevedo, E. (2013a). A methodology for overtopping risk assessment in port areas: Application to the Port of Praia da Vitória (Azores, Portugal). In *Proc. SCACR 2013, 6<sup>th</sup> International Conference on Applied Coastal Research*. Lisboa, Portugal.
- Poseiro, P., Fortes, C., Reis, M.T., Santos, J.A. (2014b). Aplicações do sistema de previsão e alerta do risco de galgamentos em zonas costeiras e portuárias: Costa da Caparica e Praia da Vitória. In *Atas do VI SEMENGO – Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*. Rio Grande, Brasil.
- Poseiro, P., Fortes, C.J.E.M., Santos, J.A., Reis, M.T., Craveiro, J. (2013b). Aplicação do processo de análise hierárquica (AHP) à análise das consequências de ocorrência de galgamentos. O caso da baía da Praia da Vitória. In *Atas das 8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. LNEC, Lisboa, Portugal.
- Poseiro, P., Reis, R., Ferreira, J.C., Fortes, C.J.E.M., Capitão, R. (2014c). *Relatório do levantamento de perfis morfológicos do sistema praia-duna da Costa da Caparica, entre Cova do Vapor e Ribeira Foz do Rego. 10 de outubro de 2014*. Relatório 04/2014 - HIDRALERTA, LNEC. Lisboa, Portugal.
- Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H., Van der Meer, J.W. (2007). *EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*. Environment Agency, UK, Exper. Netwerk Waterkeren, NL, Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, DE, August.
- Raposeiro P.D., Fortes, C.J.E.M., Capitão, R., Reis, M.T., Ferreira, J.C., Pereira, M.T., Guerreiro, J. (2013). Preliminary phases of the Hidralerta System: Assessment of the flood levels at São João da Caparica beach, Portugal. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 1896-1900.
- Raposeiro, P.D, Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Ferreira, J.C. (2010). Development of a

methodology to evaluate the flood risk at the coastal zone. In *Geographic Techs. Applied to Mar. Spatial Plan. and Int. Coastal Zone Manag.*, 129-137.

Reis, M.T., Hedges, T.S., Neves, S., Neves, M.G., Hu, K., Mase, H. (2013). Extending the H&R Wave Overtopping Model to Vertical Structures. In *Proc. SCACR 2013, 6<sup>th</sup> International Conference on Applied Coastal Research*, 4 a 7 de junho. LNEC, Lisboa, Portugal.

Reis, R., Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Poseiro, P., Santos, J.A. (2014). Avaliação comparativa de ferramentas neuronais. Aplicação à Praia da Vitória, Terceira, Açores. In *Atas do VI SEMENGO – Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*. Rio Grande, Brasil.

Rocha, T., Fortes, C., Reis, M.T., Santos, J.A., Neves, D., Portela, L., Pinto, F.T. (2013). Comparative evaluation of overtopping risk at Praia da Vitória, Terceira, Azores. *Vetor – Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, 23(1), 104-120.

Rodrigues, J. (2014). *Avaliação do Risco e Aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP) na Avaliação das Consequências de Galgamento em Zonas Costeiras e Portuárias. Aplicação ao Porto de Ponta Delgada, Açores*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, Porto.

Saaty, T.L. (1996). *Decision Making With Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. RWS Publications, Pittsburgh.

Saaty, T.L. (2005). *Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks*. RWS Publications, Pittsburgh.

Sabino, A., Rodrigues, A., Poseiro, P., Reis, M.T., Fortes, C.J., Reis, R. (2015). Coastal risk forecast system. *Proc. GISTAM 2015, 1st International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*, C. Grueau & J.G. Rocha (Eds.), SCITEPRESS, 201-209. ISBN: 978-989-758-099-4

Sabino, A., Rodrigues, A., Araújo, J., Poseiro, P., Reis, M.T., Fortes, C.J.E.M. (2014). Wave Overtopping Analysis and Early Warning Forecast System. In *Proc. ICCSA 2014*, Guimarães, Part I, LNCS 8579, pp. 267-282.

Santos, F.L. (2013). *Redes neurais artificiais ARTMAP-FUZZY aplicadas ao estudo de agitação marítima e ondas de lagos*. Tese de Doutoramento em Engenharia Elétrica, FEIS, UNESP, Brasil.

Santos, F.L., Reis, M.T., Fortes, C.J., Lotufo, A.D.P., Maciel, G.F. (2013). Estudo de Galgamentos Utilizando Redes Neurais Artificiais do Tipo Artmap com Lógica Fuzzy. *Atas das 8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. LNEC, Lisboa, Portugal.

Tolman, H. (1999). *User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III. Version 1.18*, NOA/NWS/NCEP/OMB. Technical Note 166, Washington, E.U.A.

Verhaeghe, H. (2005). *Neural Network Prediction of Wave Overtopping at Coastal Structures*. PhD Thesis, Universiteit Gent, Belgium.