



PROJETO TO-SEALERT. DESENVOLVIMENTOS RECENTES

Ana Catarina Zózimo¹; Conceição J.E.M. Fortes¹, João Alfredo Santos², Liliana Pinheiro¹, Rute Lemos¹, Rui Capitão¹, Ana Fonseca¹, Dora Roque¹, Rui Taborda³, Ana Silva³, Vera Serrazina¹, João Lutas Craveiro¹, Maria Teresa Reis¹, Umberto Andriolo⁴, José Carlos Ferreira⁵, Catarina Jóia Santos⁵

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ²ISEL, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, ³Instituto Dom Luiz, UL, ⁴INESC, Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Universidade de Coimbra, ⁵FCT NOVA & MARE, UNL

aczozimo@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, jasantos@dec.isel.ipl.pt, lpinheiro@lnec.pt, rlemos@lnec.pt, rcapitao@lnec.pt, anafonseca@lnec.pt, droque@lnec.pt, rtaborda@fc.ul.pt, amasilva@fc.ul.pt, vserrazina@lnec.pt, jcraveiro@lnec.pt, treis@lnec.pt, uandriolo@mat.uc.pt, jrcf@fct.unl.pt, csj.santos@campus.fct.unl.pt

Resumo

O projeto To-SEAlert tem como objetivo a inclusão de um conjunto de ferramentas/metodologias de modo a tornar o sistema HIDRALERTA (Poseiro, 2019, Fortes *et al.*, 2020, Pinheiro *et al.*, 2020) mais eficiente, fiável e robusto. Essas ferramentas incluem o uso de imagens de satélite e de vídeo, de modelação numérica e física, métodos quantitativos e probabilísticos para a avaliação do risco e planeamento de emergência, para melhorar a eficiência e a confiança no sistema, bem como proporcionar a sua validação. Este projeto tem como objetivo principal a implementação de um sistema que seja capaz de apoiar as autoridades responsáveis na monitorização, prevenção e gestão de situações de emergência.

Este artigo apresenta o trabalho desenvolvido recentemente nas diferentes tarefas do projeto, entre o qual se pode destacar o desenvolvimento do protótipo do sistema para a zona costeira da Costa da Caparica, a validação do protótipo do porto da Ericeira com recurso a imagens de vídeo-monitorização, o teste de modelos numéricos para o cálculo do galgamento, e a implementação de metodologias de avaliação quantitativa das consequências do risco.

Introdução

Por estar sujeita à ação direta das ondas do Oceano Atlântico, a costa portuguesa está exposta a tempestades marítimas, que conduzem à ocorrência de episódios de galgamentos e inundações costeiras. Nas zonas costeiras, os galgamentos e as inundações associadas podem ser responsáveis por danos em infraestruturas, edifícios e equipamentos, e ainda por fenómenos de erosão costeira, além de colocarem em perigo vidas humanas, animais, e o ecossistema em geral. Quando os galgamentos e as inundações associadas afetam zonas portuárias, poderão ser responsáveis por danos, tanto nas estruturas do porto, como nos navios atracados, podendo também afetar a operacionalidade portuária.

A existência de ferramentas de gestão dos riscos associados aos efeitos da agitação marítima em zonas costeiras e portuárias é essencial para que se possam implementar atempadamente medidas e procedimentos que evitem ou minimizem os danos causados por estes fenómenos.

São muito poucos os sistemas de alerta e previsão de galgamentos e inundações costeiras, com aplicabilidade extensível a zonas portuárias, podendo-se referir o sistema iCoast (Gracia *et al.*, 2014) e o sistema HIDRALERTA (Poseiro, 2019, Fortes *et al.*, 2020, Pinheiro *et al.*, 2020) com estas características, sendo que o último é o único que aborda os riscos relacionados com os navios amarrados.

O sistema iCoast (Gracia *et al.*, 2014) fornece alertas para o galgamento e respetiva inundações, tanto para costas arenosas, como para zonas portuárias, no mar Mediterrâneo, através da utilização de modelos numéricos em tempo real.

O sistema HIDRALERTA (Poseiro, 2019, Fortes *et al.*, 2020, Pinheiro *et al.*, 2020) é um sistema



de previsão, de alerta e de avaliação do risco, para zonas costeiras e portuárias, da ocorrência de situações de emergência associadas a riscos induzidos pelas ondas, nomeadamente o galgamento e respetiva inundação, e o risco para os navios amarrados. As previsões são fornecidas com 72 horas de antecedência e incluem as características da agitação marítima desde o largo até à zona em estudo, as suas consequências (galgamentos e efeitos nos navios amarrados) e os níveis de risco associados.

Para que possa ser uma ferramenta relevante para a gestão dos riscos associados aos efeitos da agitação marítima em zonas costeiras e portuárias, o sistema carece de uma validação exaustiva, necessita de melhorias ao nível da precisão da previsão das áreas inundadas e da implementação de abordagens mais quantitativas na avaliação do risco, e deverá ser introduzida uma componente de apoio à tomada de decisão em situações de emergência.

O projeto To-SEAlert procura dar resposta às lacunas do sistema HIDRALERTA, contemplando o desenvolvimento, a implementação, e a validação, num sistema *WebGIS*, de um conjunto de ferramentas e metodologias para previsão do galgamento e inundação em zonas portuárias e costeiras. No final do projeto, pretende-se que o sistema HIDRALERTA seja uma ferramenta de gestão, a longo prazo, de portos e zonas costeiras, que dará apoio aos decisores (Proteção Civil, Autoridades Portuárias), permitindo a prevenção e a gestão de situações de emergência, acrescentando valor e potenciais benefícios às áreas sob sua responsabilidade.

Projeto To-SEAlert

Nesta secção são apresentados os objetivos e as tarefas previstas no projeto To-SEAlert, assim como os principais resultados previstos.

Objetivos e tarefas do projeto

Foram delineadas sete tarefas para alcançar os objetivos propostos para o projeto To-SEAlert (Figura 1): i) a validação dos modelos numéricos de modelação das inundações costeiras a partir de imagens de satélite (T1), a partir de resultados de vídeo-monitorização (T2) e a partir de resultados de ensaios em modelo físico (T3), ii) a implementação e validação de procedimentos para simulação de galgamento e inundação em zonas costeiras e portuárias (T4), iii) a implementação de metodologias quantitativas para avaliação da exposição, vulnerabilidade, consequências e risco dos galgamentos oceânicos e consequentes inundações em termos de custos para infraestruturas estratégicas (T5), iv) o desenvolvimento de um sistema de informação geográfica que inclua toda a informação das tarefas anteriores (T6) e v) a implementação e validação do protótipo do To-SEAlert na zona costeira da Costa da Caparica e no porto da Ericeira (T7). Descrevem-se, de seguida, essas tarefas:

- T1. Metodologias de imagens de satélite: os objetivos iniciais desta tarefa eram a identificação de inundações causadas pelo galgamento das ondas no caso de estudo da Costa da Caparica e a caracterização das condições de agitação na costa portuguesa. As conclusões retiradas da finalização da *milestone* “catálogo de eventos de inundação associados à tempestade Hércules na praia da Costa da Caparica” obrigaram a uma reformulação do trabalho a desenvolver, pois devido às características efémeras das inundações costeiras, não se conseguiram identificar inundações nas imagens de satélite pós-evento disponíveis. Consequentemente, foram definidos dois novos objetivos para a T1: i) articulação com o Programa Europeu Copernicus (<https://www.copernicus.eu/pt-pt>) e ii) estudo de deteção de alterações entre imagens de satélite pré-evento e pós-evento;
- T2. Integração de vídeo-monitorização: implementação de sistemas de vídeo-monitorização nas zonas de estudo, para possibilitar a caracterização dos galgamentos e das zonas inundadas (com base nas metodologias desenvolvidas por Taborde e Silva, 2012 e Andriolo, 2018), a observação em tempo real deste fenómeno e a construção de séries longas de dados para apoiar a calibração e validação de modelos numéricos;



- T3. **Modelação física:** construção e exploração de um modelo físico bidimensional e de um modelo físico tridimensional, ambos do porto da Ericeira, para a caracterização do volume galgado e da área inundada em situações controladas;
- T4. **Modelos numéricos:** implementação e validação de novos procedimentos para a simulação do galgamento e da inundação em zonas costeiras e portuárias. Para as zonas costeiras será implementado e validado o modelo XBEACH (Roelvink *et al.*, 2009), que considera as modificações do perfil da praia na determinação do volume de água galgado e da consequente inundação. Nas zonas portuárias, para a determinação do volume galgado e da área inundada será implementado e validado o modelo SWASH (Zijlema *et al.*, 2011), baseado nas equações não lineares de águas pouco profundas, e o modelo IHFOAM (Higuera *et al.*, 2013), baseado nas equações RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*);
- T5. **Avaliação do risco e planos de emergência:** implementação de metodologias quantitativas para avaliação da exposição, vulnerabilidade, consequências e risco dos galgamentos oceânicos e consequentes inundações em termos de custos para infraestruturas estratégicas. Na construção dos mapas de vulnerabilidade, será incorporada a vulnerabilidade percebida pela população;
- T6. **Ferramenta WebGIS:** desenvolvimento de sistema de informação geográfica que inclui toda a informação das tarefas anteriores. Será dada especial atenção à robustez e flexibilidade do sistema para que possa ser aplicado em outras zonas costeiras e portuárias;
- T7. **Casos de teste:** o protótipo do To-SEAlert será implementado e validado na zona costeira da Costa da Caparica e no porto da Ericeira.

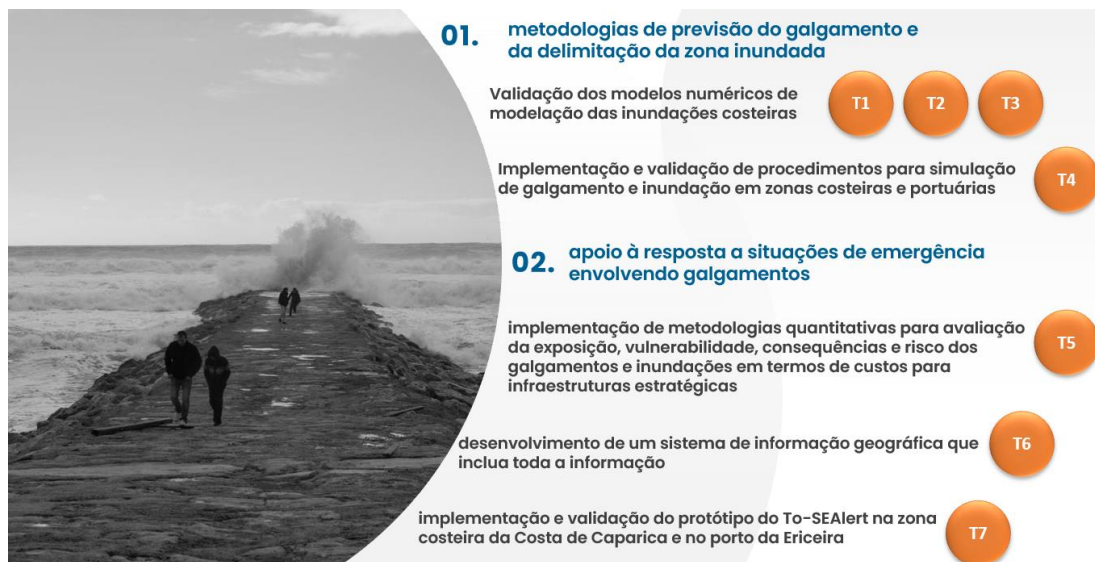


Figura 1. Objetivos do projeto To-SEAlert e sua interligação com as tarefas do projeto.

Resultados previstos

A inovação do projeto To-SEAlert resulta da junção, interligação e validação das metodologias acima referidas, da utilização dos mais avançados modelos numéricos de galgamento e inundação, de novos métodos para validar/calibrar a simulação dos galgamentos (e.g. imagens de satélite e vídeo), assim como de um novo módulo de planeamento de emergência e avaliação do risco.

Os principais resultados do projeto serão os seguintes: i) sistema para monitorização, previsão

e alerta precoce, bem como para planeamento de resposta a emergências e avaliação de risco associado ao galgamento oceânico e à consequente inundação de áreas vizinhas; ii) metodologias para avaliação de galgamentos oceânicos e das áreas inundadas a partir de imagens de vídeo e de modelos numéricos; iii) metodologias para processamento de imagens de vídeo suficientemente versáteis para aplicações em protótipo e em modelos físicos reduzidos; iv) um modelo numérico validado para simulação de galgamento e de inundação; v) um conjunto de metodologias quantitativas para avaliação do risco; vi) um novo sistema de planeamento para situações de emergência numa plataforma *WebGIS*; vii) protótipos operacionais e validados para o porto da Ericeira e para a zona costeira da Costa da Caparica.

Desenvolvimentos recentes do projeto To-SEAlert

De seguida apresentam-se os desenvolvimentos mais recentes do projeto To-SEAlert, em complemento aos desenvolvimentos iniciais apresentados em Fortes *et al.* (2021).

T1 - Metodologias de imagens de satélite

Após a reformulação da tarefa, os trabalhos foram direcionados para a identificação de alterações da cobertura do solo ocorridas na zona costeira da Costa da Caparica durante a tempestade Hércules, para validar os modelos numéricos de inundações costeiras. Esta tarefa foi apoiada pelo programa Europeu Copernicus, que efetuou um estudo relativo ao risco de inundações na área de interesse, através do serviço de gestão de emergências (Indra Sistemas S.A., 2017). Nesse estudo foi efetuada uma análise da situação pré-evento para apoiar ações de mitigação, preparação e resposta a futuras ocorrências. Para esse efeito, foram desenvolvidos mapas de perigosidade para inundações costeiras e erosão, tendo, também, sido identificadas localizações apropriadas para operações de socorro, acessos e vias para evacuação da população. Foram, ainda, determinados vários cenários de probabilidade de inundação.

Através do programa Copernicus, foi possível aceder a uma imagem de muito alta resolução do satélite Pléiades, adquirida sobre a área de interesse durante a tempestade, no dia 9 de janeiro de 2014. Apesar de não serem visíveis áreas inundadas na imagem, esta contém informação sobre o estado da zona costeira durante o evento, que pode ser comparado com o estado da mesma área numa época anterior, fornecendo a informação sobre a localização das áreas afetadas necessária à calibração dos modelos. A fim de realizar a comparação, foi adquirida uma imagem do satélite WorldView-2, correspondente ao dia 3 de dezembro de 2013 (Figura 2).

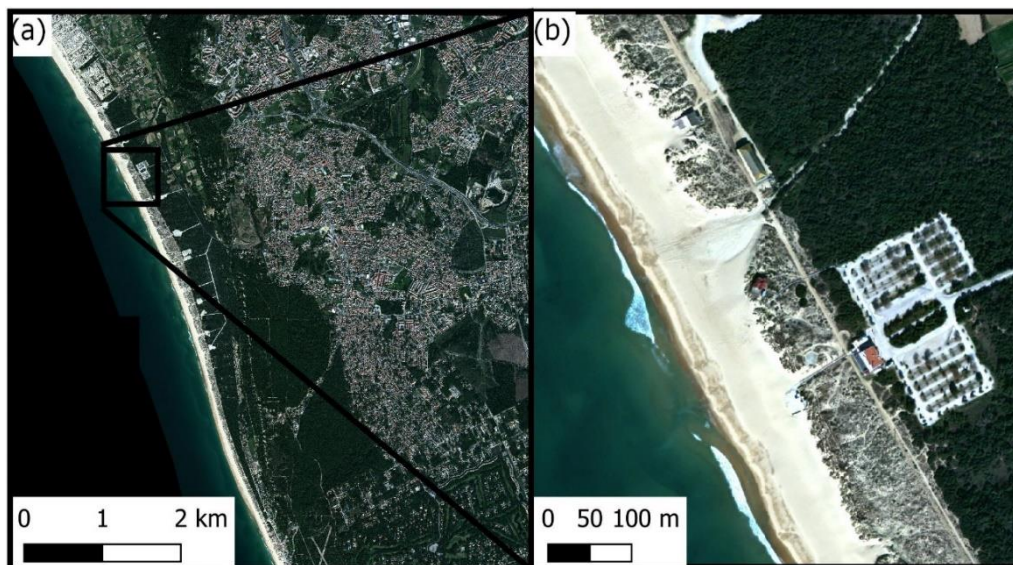


Figura 2. Imagem pré-evento (a) e ampliação na zona costeira (b).



Esta imagem foi alvo de operações de correção radiométrica, nomeadamente a calibração do sensor e correção atmosférica, para obter valores de refletância no topo da atmosfera, à semelhança dos apresentados pela imagem Plêiades, que já estava corrigida. A imagem WorldView-2 foi, também, processada com o algoritmo *pan sharpening* para se obter uma imagem multiespectral de muito alta resolução, equivalente à imagem Plêiades. Nesta tarefa, são consideradas quatro bandas espectrais das duas imagens (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo), com resoluções espaciais de 0,50 m. As duas imagens estão, atualmente, a ser ortorretificadas, para poder ser efetuada a deteção de alterações.

T2 - Integração de vídeo-monitorização

No âmbito desta tarefa, deu-se continuidade à recolha e ao armazenamento dos dados adquiridos nas estações de vídeo-monitorização da Costa da Caparica e Ericeira. As imagens adquiridas vão permitir a validação do sistema de previsão e alerta. O acesso remoto aos sistemas de vídeo-monitorização foi estendido à Ericeira através de instalação recente de equipamento de comunicação 4G e respetivo acesso sem fios ao computador que está ligado à câmara de vídeo (Figura 3).

Um dos maiores desafios associados à concretização desta tarefa reside na necessidade de assegurar a operação continuada destes sistemas. Por exemplo, a precariedade do edifício onde está instalada a câmara da Ericeira levou, durante uma tempestade, à queda da vedação onde o cabo de Ethernet estava fixado, e à consequente avaria da câmara IP. Para minimizar os efeitos desta avaria técnica, durante o período em que a câmara da Ericeira esteve inoperacional, foi estabelecido um protocolo com o projeto NAVSAFETY (<http://navsafety.web.ua.pt/>) que também tem uma câmara (embora numa localização diferente) no porto da Ericeira. Foram também intensificadas as visitas ao local, durante eventos identificados pelo sistema HIDRALERTA como causadores de galgamentos. Presentemente, os dados recolhidos têm sido utilizados para a validação qualitativa, não sistemática, dos alertas do sistema para a Ericeira.

Na Costa da Caparica são também efetuadas visitas frequentes ao local de instalação da câmara, não só para assegurar a limpeza e bom estado do equipamento, como também o correto funcionamento do dispositivo onde os dados, continuamente recolhidos, são armazenados. O funcionamento do computador é, por vezes, interrompido devido à precariedade do equipamento, cessando durante esses períodos o armazenamento dos vídeos recolhidos. Ainda assim, os resultados analisados até à data revelaram que não houve ocorrência de quaisquer galgamentos desde a instalação da câmara, estando em fase adiantada de execução algoritmos para determinação do *runup* em contexto de praia e de algoritmos para a avaliação da altura de onda.

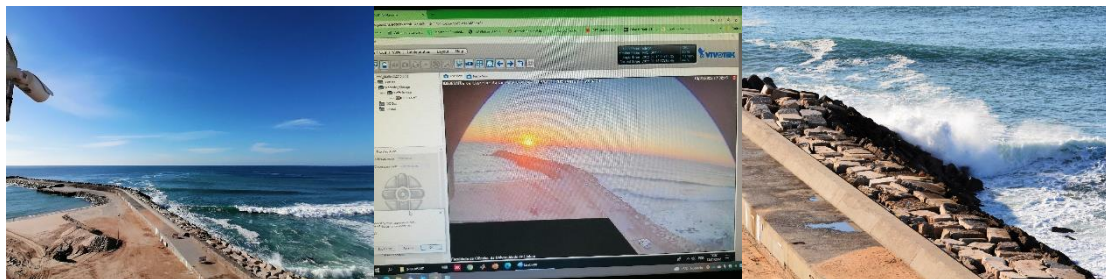


Figura 3. Sistema de vídeo-monitorização do porto da Ericeira e acesso remoto ao sistema.

T3 – Modelação física

Os ensaios em modelo físico 2D do porto da Ericeira foram realizados num canal de ondas irregulares do LNEC, tendo sido implementado o perfil da seção da zona de cais do quebra-mar (Figura 4a e Figura 4b). Os objetivos dos ensaios foram: i) a determinação do espraiamento e do galgamento nessa zona do cais para várias condições de agitação marítima extremas, incluindo



cenários de alterações climáticas; ii) a obtenção de medições destas grandezas e das características da agitação marítima ao longo do canal e no pé da obra para validação de modelos numéricos.

O modelo físico foi construído e explorado de acordo com a lei de semelhança de *Froude*, à escala geométrica de 1:50. Os fundos em frente ao local de implantação do perfil foram reproduzidos por uma rampa com inclinação de ~1,6% até à cota -27 m (ZH). Os ensaios foram realizados com períodos de pico da agitação (T_p) de 12 s, 14 s e 16 s, associados a diferentes alturas de onda (H_{m0}) e a três níveis de maré (Figura 4a): preia-mar (PM), baixa-mar (BM) e nível médio (NM).

Foram efetuadas medições da agitação marítima gerada (sondas B1 e B2, Figura 4a) e da sua propagação ao longo do canal (sondas S1 a S5, Figura 4a e Figura 4c). Para a medição do espraçamento, utilizou-se uma sonda (S7, Figura 4d) e uma câmara de filmar. Efetuou-se a comparação de resultados de ambas as metodologias para avaliar o seu desempenho e verificou-se que o uso de técnicas de vídeo é uma alternativa bastante eficaz, desde que o vídeo seja efetuado em boas condições de luz artificial. Quanto ao galgamento, foram identificadas as respetivas ocorrências (sonda S8, Figura 4d) e foram efetuadas medições através de duas técnicas (para permitir a confirmação dos resultados obtidos): a pesagem da água galgada (com uma balança digital) e a medição do nível dentro do reservatório através de uma sonda (sonda S6, Figura 4e). Neste caso, os dois métodos são concordantes quando os galgamentos são pequenos. O mesmo já não se passa no caso de galgamentos significativos, para os quais a sonda origina um sinal com ruído significativo.

A Figura 5a confirma que, para o mesmo valor do período de pico, ocorre um aumento do valor do espraçamento ($Ru2\%$, valor de espraçamento excedido apenas por 2% das ondas que atingem a estrutura) com o aumento de H_{m0} incidente no quebra-mar. Verifica-se ainda que a um aumento do T_p do estado de agitação corresponde também um aumento do valor característico do espraçamento, sendo também claro que tal aumento está limitado ao desnível entre o coroamento da estrutura e o nível de repouso, ou bordo livre (0,12 m).

Na Figura 5b apresenta-se o caudal relativo, q , em função de H_{m0} para PM e para os vários períodos. Verifica-se que os resultados para $T_p = 12$ s são muito pequenos em comparação com os resultados para $T_p = 14$ s e $T_p = 16$ s, não se apresentando assim na mesma curva exponencial. Como seria expectável, para o mesmo nível de água, q aumenta com o aumento de H_{m0} e com o aumento do T_p . Apesar da existência de galgamento, na Figura 5a observa-se que os valores de $Ru2\%$ não atingem a cota correspondente ao bordo livre. Este facto deve-se a que apenas as ondas correspondentes ao espraçamento máximo atingem o coroamento e eventualmente originam galgamento.

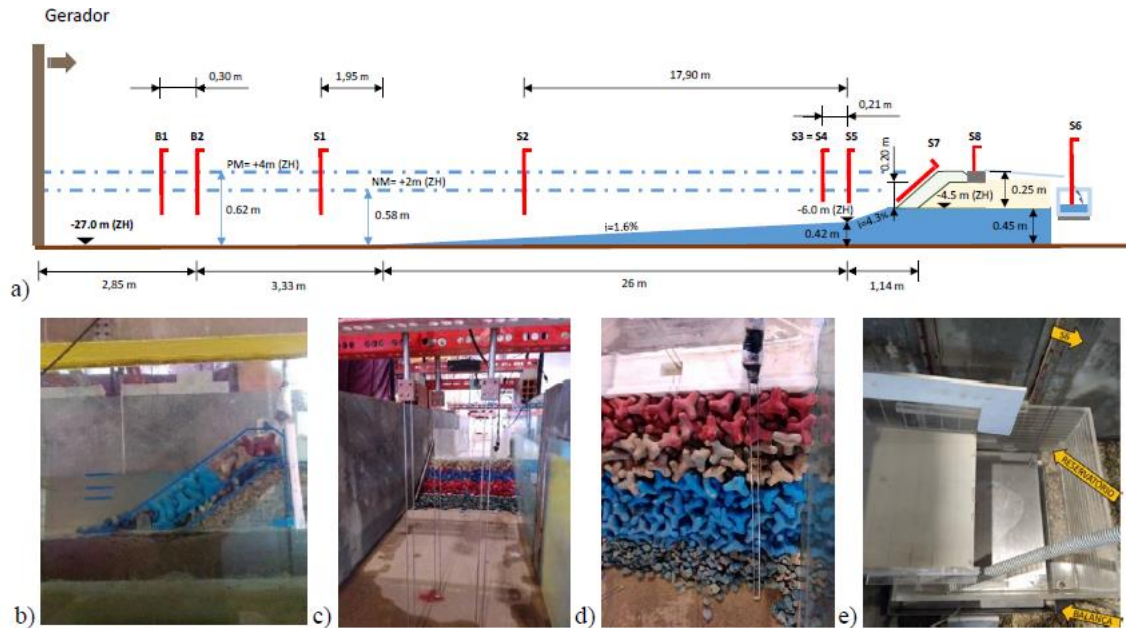


Figura 4. a) Esquema do modelo físico e do equipamento de medição no canal; b) Perfil transversal do quebra-mar; c) Sondas S3 a S5; d) Sonda de espraimento; e) Descarregador e reservatório para galgamentos. Fonte: Santos *et al.* (2021).

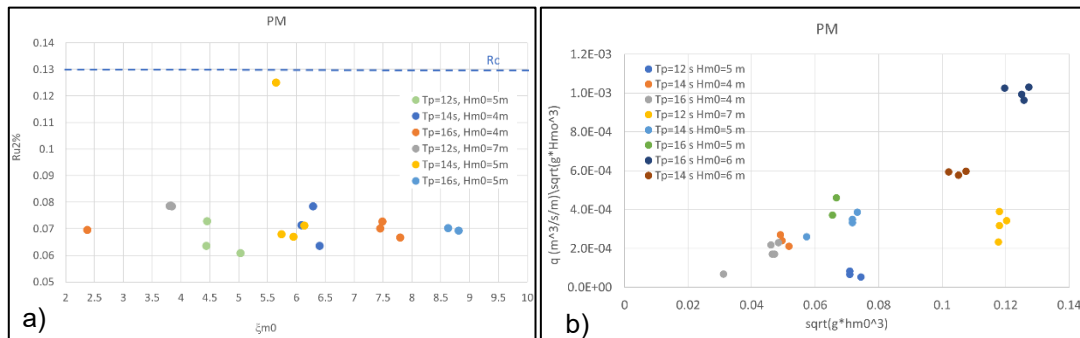


Figura 5. a) Variação do espraimento com a altura (H_{m0}) da agitação incidente, b) Variação do galgamento relativo com a altura significativa da agitação incidente. R_c é o bordo livre da parte impermeável da estrutura relativo ao nível de repouso e ξ é o número de Iribarren.

T4 - Modelos numéricos

No âmbito da tarefa T4 foram efetuadas diversas simulações para a aferição do desempenho do modelo numérico SWASH na estimativa dos volumes de galgamento na secção do quebra-mar do porto da Ericeira que foi ensaiada em modelo físico 2D (T3). Foi também analisada a capacidade do modelo na avaliação da extensão da área inundada no tardoz do quebra-mar.

O modelo SWASH foi também aplicado à escala de protótipo a dois perfis transversais do porto da Ericeira com características geométricas distintas, diferentes orientações face à agitação incidente e diferentes blocos de betão no manto principal. Na simulação das tempestades Elsa e Fabien, de 2019, os resultados do modelo SWASH foram calibrados, para a escala de protótipo, por comparação com resultados da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005), devido à inexistência de dados de campo e à ampla utilização desta ferramenta. O parâmetro de calibração utilizado foi o coeficiente de Manning que representa a rugosidade da

estrutura. Após a calibração do modelo para os dois perfis, foram deduzidas cinco expressões empíricas para a determinação do coeficiente de Manning com base nas variáveis R_c/H_s , declividade da onda (S_{op}), direção de incidência da onda relativamente à perpendicular da estrutura (α) e tipo de blocos de betão do manto principal (tetrápodes ou cubos Antifer). Com a utilização de um coeficiente de Manning calibrado, o modelo SWASH conseguiu reproduzir os caudais médios de galgamento estimados pela ferramenta NN_OVERTOPPING2 (ver Figura 6 para o perfil de tetrápodes e expressão desenvolvida para ondas incidentes com α entre 15° e 30°, os casos numerados são os apresentaram os maiores erros).

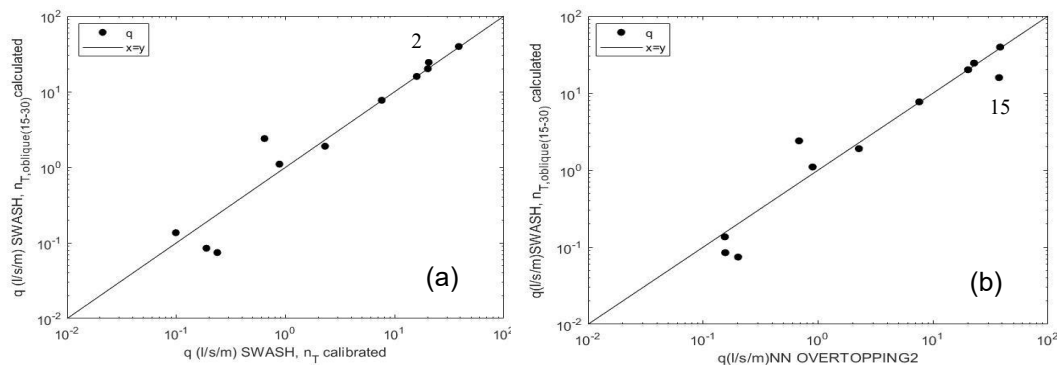


Figura 6 – Perfil de tetrápodes para α entre 15° e 30°. Comparação do caudal médio de galgamento estimado pelo modelo SWASH utilizando o coeficiente de Manning calculado através da expressão empírica, com o caudal médio de galgamento estimado pelo modelo SWASH utilizando o coeficiente de Manning calibrado (a) e com o caudal médio de galgamento estimado pelo NN_OVERTOPPING2 (b). Fonte: Manz (2021).

Os coeficientes de Manning calculados através das expressões desenvolvidas deram origem a pequenos erros quando comparados com os coeficientes de Manning calibrados e as expressões desenvolvidas revelaram que o ângulo de incidência da onda tem influência no coeficiente de Manning e deverá ser incluído nas simulações. Em Manz (2021) apresentam-se mais detalhes sobre os resultados obtidos para o perfil de tetrápodes e para o perfil de cubos Antifer.

A possibilidade de calcular os valores dos coeficientes de Manning de forma automática, com base em determinadas variáveis conhecidas, é essencial para que se possa implementar o modelo SWASH no sistema HIDRALERTA.

Relativamente à zona da Costa da Caparica, foram concluídas as simulações com o modelo SWASH para determinação dos galgamentos, com o modelo XBeach 1D recorrendo ao módulo não-hidrostático (nonh) e com o XBeach 2D em modo *surf beat*. Os resultados do modelo SWASH e do modelo XBeach 1D foram comparados por forma a analisar a diferença de abordagem destes dois modelos: o SWASH tem uma abordagem determinística (para as mesmas condições de entrada, devolve sempre o mesmo resultado) e o XBeach recorre a uma metodologia estocástica (gera uma série temporal de ondas diferente para cada simulação, pelo que se obtém um conjunto de resultados que podem ser analisados em termos probabilísticos). Mais detalhes sobre esta comparação podem ser encontrados em Ferreira *et al.* (2021a).

Para o desenvolvimento de uma rede Bayesiana (Ferreira *et al.*, 2021a) a ser utilizada na tarefa T7, foram realizadas simulações com o modelo XBeach 1D para 123 tempestades sintéticas, com forçamentos que variam nos seguintes intervalos: $H_s = [2,50-7,50]$ m, $T_p = [9-21]$ s, $NM = [2,75-4,75]$ m (ZH).

T5 - Avaliação do risco e planos de emergência

Um dos principais objetivos da tarefa T5 é a elaboração de mapas de perigosidade,



vulnerabilidade e risco (Figura 7). Assim, pretende-se aperfeiçoar estes mapas, através de duas etapas principais: 1) inclusão de novos elementos e classes de risco e 2) inclusão da perceção do risco através do envolvimento de diversos *stakeholders* das áreas de estudo (Costa da Caparica e Ericeira).

No contexto da primeira etapa, já decorreram duas reuniões de enquadramento com a Proteção Civil de Almada, onde se explicou o funcionamento do projeto, assim como os principais objetivos da tarefa. A Proteção Civil de Almada mostrou total disponibilidade em auxiliar a equipa, por forma a melhorar o modelo de risco – através da inclusão das variáveis associadas à Proteção Civil (localização dos postos de socorro, corredores de emergência, entre outros) –, do qual os próprios acabarão por ser utilizadores finais. Mostrou ainda interesse em colaborações adicionais, através, por exemplo, de um acompanhamento mais profundo das atividades da etapa 2 (descritas abaixo). O objetivo é repetir a sessão, com o mesmo tipo de *feedback* positivo, com a Proteção Civil de Mafra.

Relativamente à segunda etapa, desenvolveu-se e adaptou-se a metodologia AHP (*Analytic Hierarchy Process*, Saaty, 1970) preliminar a aplicar nas sessões participativas, que servirá para hierarquizar os diferentes critérios de perigosidade e vulnerabilidade, através de uma escala de 1 a 9, considerados para a obtenção dos diferentes mapas.

A AHP foi a metodologia escolhida, uma vez que se destina à tomada de decisões em contextos de incerteza, em que, perante a necessidade de priorizar ações e medidas face a recursos de intervenção não ilimitados, há que tomar decisões com base numa avaliação racional da eficiência das ações e medidas, e das suas consequências a escalas diversas. Uma das vantagens principais da AHP face a outras metodologias multicritério de ponderação hierárquica é a sua maior objetividade na análise. Para isso, a AHP utiliza um índice de consistência, assim como um rácio (numa escala de 0 a 1) que permite verificar o grau de congruência das avaliações ponderadas dos intervenientes (peritos, *stakeholders*, população em geral e decisores), o que permite assegurar que os resultados da AHP não traduzem avaliações feitas de forma aleatória, mas antes o mais racional possível. A metodologia AHP será aplicada a *stakeholders* e residentes locais (associações de moradores) no sentido de esquematizar, a par das avaliações por decisores e técnicos, peritos e autoridades locais, o faseamento de uma estratégia adaptativa face ao risco oceânico de galgamento costeiro.

No contexto de ambas as etapas, fizeram-se também levantamentos com recurso a um veículo aéreo não tripulado (vulgo *drone*) para elaboração de mapas. Estes levantamentos concretizaram-se para ambas as áreas de estudo, com auxílio da equipa da Agência Portuguesa do Ambiente encarregue do Projeto SIARL (<https://siarldev.apambiente.pt/>), e têm como resultado o ortofotomapa da área delimitada, assim como o modelo digital de superfície correspondente. O levantamento para a área do porto da Ericeira decorreu já em 2022, com recurso ao drone *DJI Matrice* – pelo que o ortofotomapa resultante apresenta uma precisão de 3 cm e uma resolução de 1 cm. Sobre este ortofotomapa, será iniciada brevemente a classificação da cobertura e do uso do solo para o porto da Ericeira.

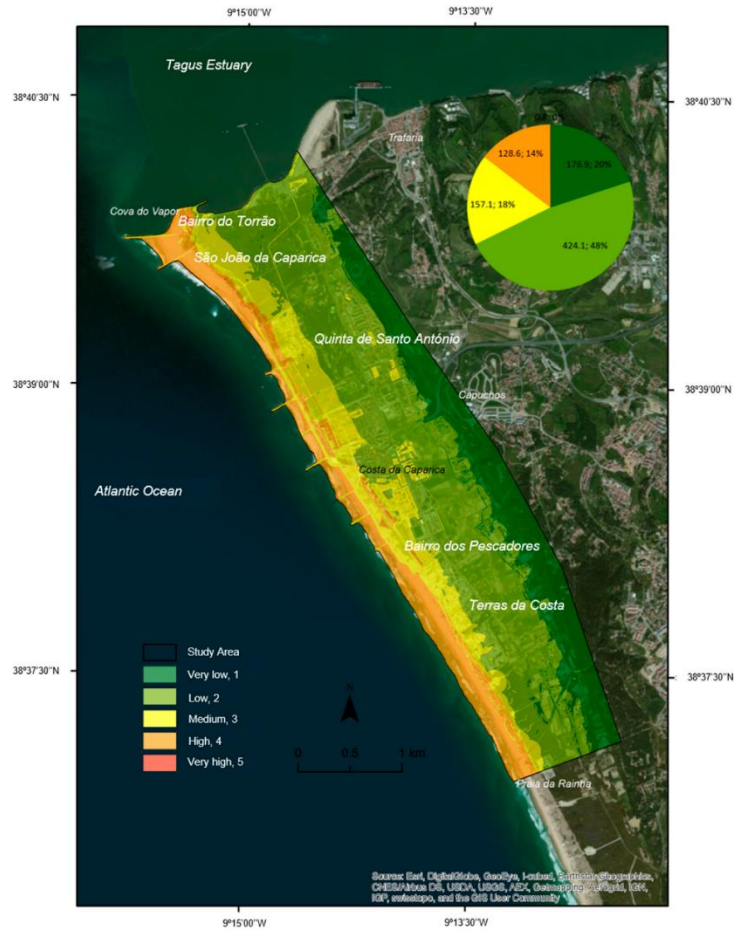


Figura 7. Mapa de risco já existente para a zona costeira da Costa da Caparica (Ferreira *et al.*, 2021b).

T6 - Ferramenta WebGIS

Foi implementada uma versão de teste do protótipo do sistema HIDRALERTA para a Costa da Caparica (Figura 8), com base na estimativa do risco i) através de fórmulas empíricas de galgamento e de espraçamento (Poseiro *et al.*, 2014) e ii) através de uma rede Bayesiana baseada nos resultados obtidos pelo modelo XBeach na tarefa T4 (Ferreira *et al.*, 2021a).

Foi iniciada a otimização do código do sistema HIDRALERTA de forma a simplificar a integração de futuros desenvolvimentos e foi ainda implementada a opção de adquirir os dados offshore de agitação e de ventos ao serviço Copernicus, em acréscimo ao serviço ECMWF (<https://www.ecmwf.int/>) que tem estado a ser utilizado até ao momento. Encontra-se em fase de conclusão o desenvolvimento da nova plataforma *Web* que terá novas funcionalidades em termos de análise de dados e de interatividade do utilizador com o sistema.

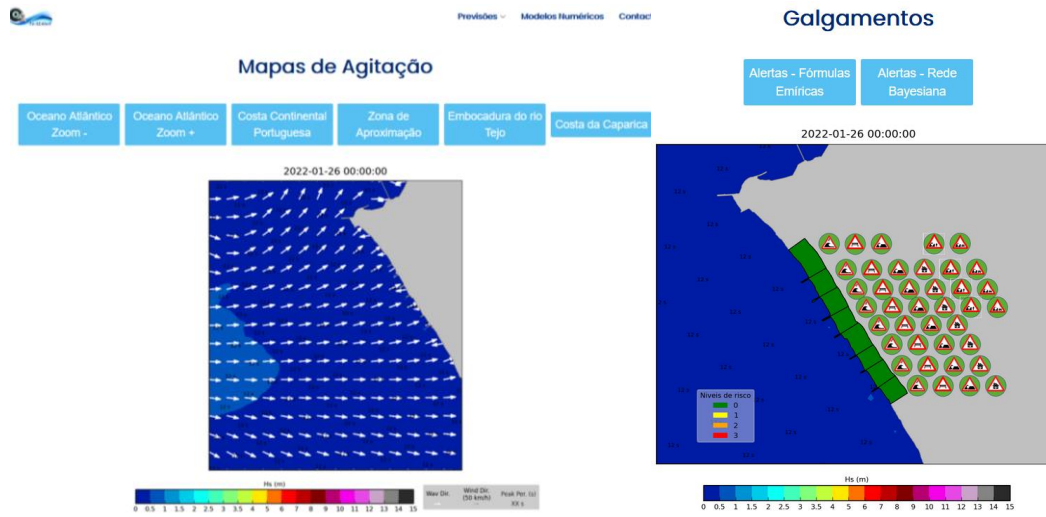


Figura 8 – Interface Web para o protótipo da Costa da Caparica.

Entretanto, foi também desenvolvida uma nova interface *Web* que deu resposta a uma série de problemas, estando atualmente já implementado o protótipo para a Costa da Caparica nesta nova interface e em fase de migração o protótipo da Ericeira. Esta interface transitória será futuramente substituída pela que está a ser finalizada.

Foi também desenvolvida uma aplicação para telemóvel, que será adaptada no futuro próximo para os protótipos da Ericeira e da Costa da Caparica.

T7 - Casos de teste

O protótipo do porto da Ericeira foi atualizado de forma a incorporar os desenvolvimentos obtidos durante a fase de validação (Zózimo *et al.*, 2020) efetuada durante o 2.º ano do projeto. Foi implementada a versão inicial do protótipo do To-SEAlert para a zona costeira da Costa da Caparica, contemplando a estimativa do risco, tanto através de fórmulas empíricas de galgamento e de espreamento, como através da implementação de uma rede Bayesiana (Figura 9) com base nos resultados obtidos com o modelo XBeach. Esta versão inicial irá brevemente começar a fase de teste.

A rede Bayesiana possibilita a estimativa em tempo real dos galgamentos para um determinado evento de agitação marítima, permitindo a inclusão do modelo XBeach no sistema HIDRALERTA. Os riscos por recetor correspondem ao risco para pedestres, veículos e edifícios, entre outros, para os quais foram considerados 4 níveis de risco: verde, amarelo, laranja e vermelho, sendo o vermelho o risco máximo (Ferreira *et al.*, 2021a). Esta rede Bayesiana já foi testada para as tempestades Hércules (Figura 9) e Emma.

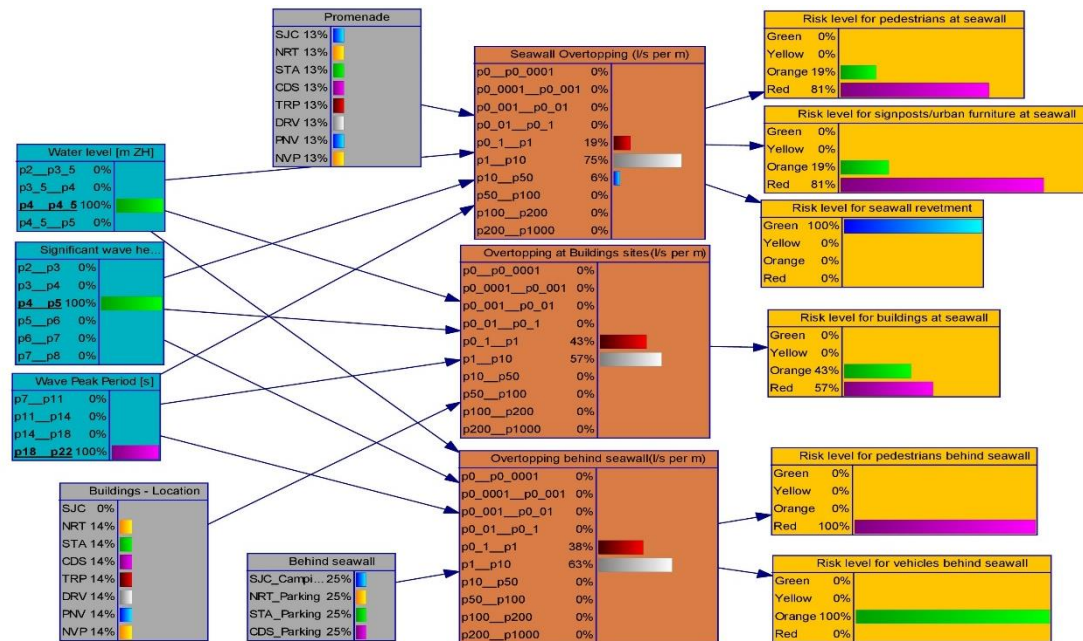


Figura 9 – Arquitetura da rede Bayesiana definida para a Costa da Caparica (Azul – Condições de Fronteira; Cinzento – Localização; Laranja – Perigosidade; Amarelo: Risco) e exemplo de aplicação para a tempestade Hércules (Ferreira *et al.*, 2021a).

Tarefas futuras

Como tarefas a desenvolver no curto prazo, destacam-se a validação dos alertas emitidos pelos protótipos da Ericeira e da Costa da Caparica, a finalização da recolha de informação de base para a aplicação da AHP ao porto da Ericeira, a finalização da nova interface *Web* e a deteção de alterações em imagens pré e pós-evento para a tempestade Hércules.

Agradecimentos

Agradece-se aos projetos To-SEAlert (Ref. PTDC/EAM-OCE/31207/2017), EW-Coast (Ref. ALG-LISBOA-01-145-FEDER-028657), BSafe4Sea (Ref. PTDC/ECI-EGC/31090/2017), NAVSAFETY (Financiamento Fundo Azul, Operação FA_04_2017_013). Agradece-se à Infraestrutura Nacional de Computação Distribuída (INCD), pela utilização dos seus recursos computacionais e ao Instituto Hidrográfico pelo acesso aos dados das boias da sua rede de monitorização. Agradece-se também ao Posto Territorial de Mafra da GNR, à Câmara Municipal de Almada e ao Hotel TRYP Lisboa Caparica Mar.

Referências Bibliográficas

- Andriolo, U. (2018). Nearshore Hydrodynamics and Morphology Derived from Video Imagery. PhD thesis, University of Lisbon, Portugal, 197 pp.
- Ferreira, A.M., Garzon, J.L., Fortes, C.J.E.M., Ferreira, Ó., Reis, M.T. (2021a). Desenvolvimento de um sistema de previsão de galgamentos costeiros. Proc. X Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa. Rio de Janeiro.
- Ferreira, J.C., Cardona, F.S., Jóia Santos, C., Tenedório, J.A. (2021b). Hazards, vulnerability, and risk analysis on wave overtopping and coastal flooding in low-lying coastal areas: The case of Costa da Caparica, Portugal. *Water*, 13(2):237. <https://doi.org/10.3390/w13020237>



- Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Pinheiro, L., Poseiro, P., Serrazina, V., Mendonça, A., Smithers, N., Santos, M.I., Barateiro, J., Azevedo, E.B., Salvador, M., Reis, F.V. (2020). The HIDRALERTA system: Application to the harbours of Madalena do Pico and São Roque do Pico, Azores. *Journal of Aquatic Ecosystem Health & Management*. Doi: 10.1080/14634988.2020.1807295
- Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Zózimo, A.C., Santos, J.A., Pinheiro, L., Lemos, R., Capitão, R., Fonseca, A., Barateiro, J., Serrazina, V., Craveiro, J., Andriolo, U., Taborda, R., Silva, A., Ferreira, J.C., Duarte, C.M., Lara, J. (2021). Project TO-SEALERT. First developments. Proc. 15^o Congresso da Água, 22-26 de março de 2021, Lisboa. https://www.aprh.pt/congressoagua2021/docs/15ca_83.pdf
- Gracia, V., García-León, M., Sánchez-Arcilla, A., Gault, J., Oller, P., Fernández, J., Sairouní, A., Cristofori, E., Toldrà, R. (2014). A new generation of early warning systems for coastal risk. The iCoast project. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), 18. <https://doi.org/10.9753/icce.v34.management.18>.
- Higuera, P., Lara, J.L., Losada, I.J. (2013). Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM. *Coastal Engineering*, 71:102-118.
- Indra Sistemas S.A. (2017). EMSN-034: Coastal Flood Risk Analysis for Population and Assets, Caparica, Setúbal, Portugal – Final Report Summary. Relatório Ref. P11104: 113. <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSN034>
- Manz, A. (2021). Application of SWASH to determine overtopping during storm events in the port of Ericeira and its introduction into HIDRALERTA system. Master Dissertation, UALG.
- Pinheiro, L., Fortes, C., Reis, M.T., Santos, J., Soares, C.G. (2020). Risk forecast system for moored ships. Proc. VICCE (virtual International Conference on Coastal Engineering), 6 a 9 de outubro.
- Poseiro, P. (2019). Forecast and Early Warning System for Wave Overtopping and Flooding in Coastal and Port Areas: Development of a Model and Risk Assessment. Doctoral Dissertation, IST-UL.
- Poseiro, P., Reis, M.T., Fortes, C., Lopes, E., Sabino, A., Rodrigues, A. (2014). Desenvolvimento do sistema de previsão e alerta de inundações HIDRALERTA: Caso de estudo da Costa da Caparica. Proc. 3^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, pp. 147–150.
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11–12):1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- Saaty, T. L. (1970). How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48, 9-26. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1)
- Santos, J.A., Lemos, R., Fortes, C.J.E.M., Neves, M.G., Pinheiro, L., Pinto, M., Sanches, C., Gueifão, J., Zózimo, A.C. (2021). Modelação física da resposta à agitação incidente de um trecho do quebra-mar do porto da Ericeira. Proc. 15^o Congresso da Água, 22-26 de março de 2021, Lisboa. https://www.aprh.pt/congressoagua2021/docs/15ca_143.pdf
- Taborda, R., Silva, A. (2012). COSMOS: A lightweight coastal video monitoring system. *Comp. & Geosciences*, 49:248-255.
- Zijlema, M., Stelling, G., Smit, P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58:992-1012.
- Zózimo, A.C., Fortes, C.J., Pinheiro, L.V. (2021). Validação do protótipo do sistema To-SEALert para o porto da Ericeira. *Depressões Elsa e Fabien*. Proc. 6^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica, 3-5 de novembro, pp. 183-186. https://jornadas.hidrografico.pt/recurs.os/files/documentos/Livro_Atas_6JEH_2020.pdf