

## HIDRALERTA: O SISTEMA E AS FERRAMENTAS DE VALIDAÇÃO

Pedro Poseiro

LNEC, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

### 1. Introdução

A ocorrência de galgamentos em zonas costeiras e portuárias é frequente em Portugal e pode ter consequências significativas na segurança e gestão costeira, com efeitos nas operações de carga e descarga, danos nas infraestruturas, impactos ambientais ou até perda de vidas humanas.

Desta forma, o aparecimento de serviços/sistemas que fornecem previsões meteorológicas e de agitação marítima tem aumentado significativamente nos últimos anos. Muitas instituições públicas e privadas investiram para poder fornecer este tipo de informação de forma fidedigna a uma escala local, regional, nacional ou, em alguns casos, global. No entanto, a existência de ferramentas de previsão para lidar especificamente com o galgamento é limitada. Em Poseiro et al. (2017b) é apresentado o levantamento e a comparação dos sistemas atualmente existentes para lidar com este fenómeno. Em geral, esses sistemas tiveram grandes avanços na previsão de galgamentos costeiros devido, principalmente, aos estudos com os ensaios em modelo físico realizados desde a década de 80 em laboratórios no Reino Unido, Dinamarca, Holanda e Itália (Verhaeghe 2005). Estes ensaios permitiram um melhor conhecimento a cerca do fenómeno do galgamento e a validação de fórmulas empíricas e modelo numéricos utilizados para a sua determinação.

Em Portugal, existe apenas um sistema com estas competências, o sistema HIDRALERTA (Fortes et al. 2013; Sabino et al. 2017), que foi desenvolvido num concórcio liderado pelo LNEC, com a participação da Universidade dos Açores e da Universidade Nova de Lisboa, e que teve como aplicação a Praia da Vitória, Terceira, e a Costa da Caparica, Almada.

A validação deste tipo de sistemas está dependente, em grande parte, da existência de evidências observadas no campo e registadas através de fotografias e vídeos que mostrem o impacto do fenómeno. O histórico de tempestades existentes, que se encontra documentado em relatórios e notícias, é uma oportunidade para verificar a competência de um sistema desta natureza, uma vez que é possível realizar a simulação de eventos passados recorrendo a dados de *hindcast*. Para além disso, no caso da Praia da Vitória, onde o sistema se encontra operacional desde o inverno de 2015, é possível alertar as comunidades e autoridades locais, sobre a ocorrência de galgamentos em locais específicos, o que permite, nestes casos, a antecipação e preparação para a captação dos eventos. De forma complementar, outros métodos de validação devem ser executados, de forma a cobrir todas as componentes do sistema. Neste caso, a utilização da boia ondógrafo para validação da agitação marítima e ensaios em modelo físico para a modelação do galgamento são duas formas que, em muito, contribuem para a validação transversal do sistema. Este último, permite a validação da ferramenta neuronal NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld et al. 2005), atualmente em funcionamento no sistema, e do modelo SWASH (Zijlema et al. 2011) que se pretende integrar no mesmo. Também a utilização de câmeras de vídeo no campo e nos ensaios em modelo físico, são um contributo para uma análise qualitativa da interação onda-estrutura e obviamente do galgamento.

Esta comunicação aborda a validação do sistema HIDRALERTA, começando por abordar a utilização de dados de *hindcast* e de previsão, para o caso de estudo da Praia da Vitória, com recurso a fotografias, vídeos e notícias. Posteriormente, é apresentada a validação da agitação marítima, através da utilização dos dados da boia ondógrafo existente perto do porto e é também mostrada uma breve descrição da análise realizada com os ensaios de galgamento em modelo físico para uma secção específica do quebra-mar sul deste porto (junto ao Cais 12).

### 2. O sistema HIDRALERTA

O HIDRALERTA (Fortes et al. 2013; Sabino et al. 2017) foi um projeto de investigação coordenado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e com a Universidade dos

Açores (UAc) e a Universidade Nova de Lisboa (UNL) como parceiros. O projeto foi iniciado em 2012 e, ao longo de quatro anos, a sua equipa desenvolveu um sistema de alerta capaz de:

- Obter diariamente as previsões de agitação marítima a três dias, com o modelo numérico WAM (WAMDI Group 1988), e de vento, com o modelo HRES (Persson 2001), da ECMWF, para toda a bacia do Atlântico Norte;
- Resolver a propagação das ondas até às águas pouco profundas, usando o modelo numérico SWAN (Booij et al. 1999);
- Obter a agitação marítima no interior do porto com o modelo numérico DREAMS (Fortes 2002);
- Estimar o galgamento de estruturas marítimas nas zonas portuárias com a rede neuronal NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld et al. 2005) ou da cota de inundação em zonas costeiras, a partir de fórmulas empíricas (Mase 1989; Stockdon et al. 2006; Teixeira 2009);
- Mostrar os diferentes níveis de alerta e atividades em perigo em cada secção. Enviar um alerta às autoridades responsáveis sempre que se justifique.

O sistema foi desenvolvido em linguagem de programação *Python* e implementado numa plataforma *Web-based*. O sistema é constituído por quatro módulos (Figura 1), para a agitação marítima (I), galgamento (II) e alerta (IV), e ainda um módulo para avaliação de risco (III).



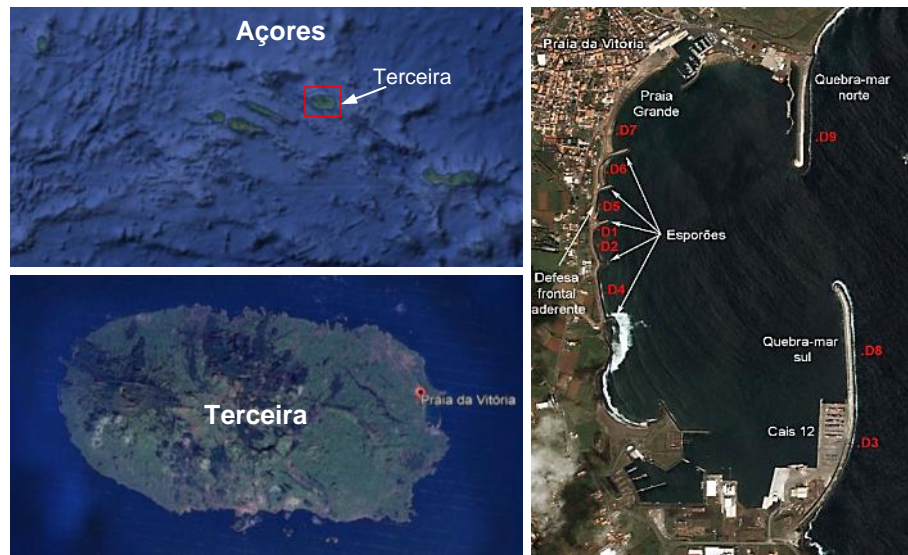
**Figura 1.** Estrutura do Sistema HIDRALERTA.

A componente de avaliação do risco (III) foi definida para auxiliar no planeamento a longo prazo e para apoiar em decisões estratégicas, e é descrito em mais detalhe em Poseiro et al. (2013) e Lourenço et al. (2015). Diariamente, o sistema HIDRALERTA prepara uma previsão de agitação marítima a 72 horas e todos os *outputs* dos módulos do sistema são publicados *online* e acessíveis para qualquer utilizador que solicite o seu acesso.

O sistema HIDRALERTA encontra-se operacional para o porto e baía da Praia da Vitória, Ilha Terceira, Açores (Poseiro et al. 2014b), e foi também desenvolvido para praia de São João da Caparica, Costa da Caparica, Almada (Poseiro et al. 2014a), apesar de não se encontrar operacional para este último. No caso da Praia da Vitória, o sistema foi desenvolvido para responder ao fenómeno de galgamento junto das estruturas costeiras, onde se incluem dois grandes quebra-mares e uma defesa frontal (Figura 2 e Figura 3).

O chamado quebra-mar sul, com cerca de 1300 m de comprimento e um traçado curvo, encontra-se enraizado no lado sul da baía, para abrigar o Cais 12 e as instalações portuárias dos setores comercial e das pescas do porto da Praia da Vitória. Ao longo do Cais 12, existe um muro deflector de 11 m acima do Zero Hidrográfico (ZH, 0.2 m abaixo da maré mais baixa). Nas restantes secções do quebra-mar não existe muro e a altura atinge os 7.1 m (ZH). 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 que enraízam na defesa frontal. A defesa frontal tem um muro que varia entre os 6.3 m e 7.1 m de altura.

Existem algumas praias ao longo da baía, onde se destaca a Praia Grande, no lado norte. Junto a esta praia encontra-se uma marina com cerca de 210 postos de amarração, cais de receção e infraestruturas de apoio. Enraizado na Ponta da Má Merenda e com a direção norte-sul, encontra-se o quebra-mar norte, com 560 m de comprimento, destinado a dar abrigo às instalações portuárias de apoio à Base Aérea das Lajes. Este quebra-mar tem uma altura que varia entre os 7.7 m ZH (perto do cabo) e os 10.2 m ZH (perto da ponta).



**Figura 2.** Localização e imagem aérea da Praia da Vitória, Ilha Terceira, Açores.

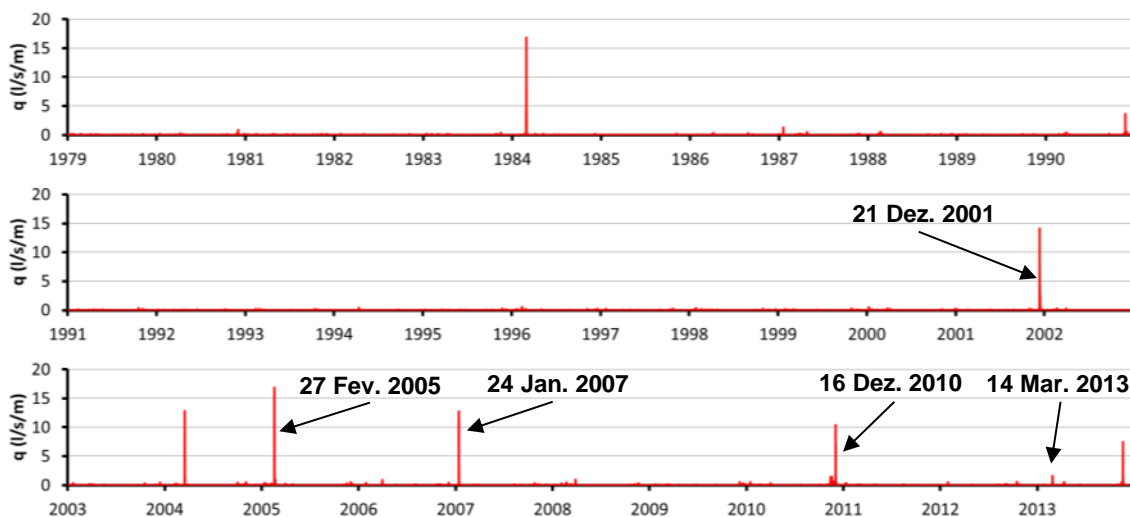


**Figura 3.** Principais estruturas marítimas da Praia da Vitória.

### 3. Validação com dados de *hindcast*

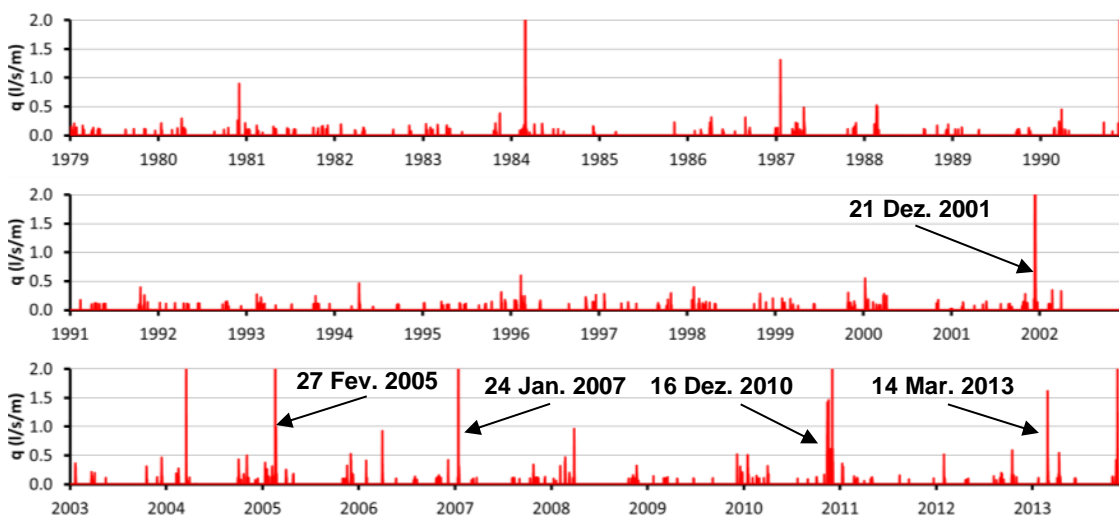
Nesta secção pretende-se validar os eventos ocorridos no passado para os quais se dispõem de elementos que possam comprovar esses acontecimentos. Para tal, recorrendo a dados de *hindcast* é possível simular com o sistema uma série temporal longa e depois verificar se o sistema regista essas situações que aconteceram no passado.

Para o HIDRALERTA utilizou-se uma série de dados de agitação marítima compreendidos entre 1979 e 2014 como *input* para o sistema, a fim de simular a ocorrência de galgamento em eventos passados na Praia da Vitória. Para esta análise considerou-se, principalmente, um local com eventos frequentes de galgamento, a secção do quebra-mar sul sem muro de proteção, D8 (Figura 2). Os resultados do sistema para esse ponto são apresentadas na Figura 4 (escala completa, 0-20 l/s/m) e na Figura 5 (escala amplificada, 0-2 l/s/m).



**Figura 4.** Resultados com a escala vertical completa (0 to 20 l/s/m) do galgamento médio  $q$  (l/s/m) obtido no quebra-mar sul (sem muro de proteção), utilizando como *input* do sistema HIDRALERTA, as previsões da agitação marítima no período de 1979-2014.

A Figura 5 mostra com mais detalhe os eventos de galgamento com descargas médias menores. De acordo com os resultados, houve poucos eventos no intervalo de 0.75 a 1.5 l/s/m, enquanto que a grande maioria dos restantes ficaram abaixo de 0.5 l/s/m.



**Figura 5.** Resultados com a escala vertical amplificada (0 to 2 l/s/m) do galgamento médio  $q$  (l/s/m) obtido no quebra-mar sul (sem muro de proteção), utilizando como *input* do sistema HIDRALERTA, as previsões da agitação marítima no período de 1979-2014.

Os resultados de *hindcast* mostram cerca de nove eventos de galgamento (Tabela 1) de grandes dimensões nos 34 anos analisados para esta secção. Os respetivos galgamentos variaram entre 1.2 l/s/m (14 de março de 2013) e 16.6 l/s/m (27 de fevereiro de 2005).



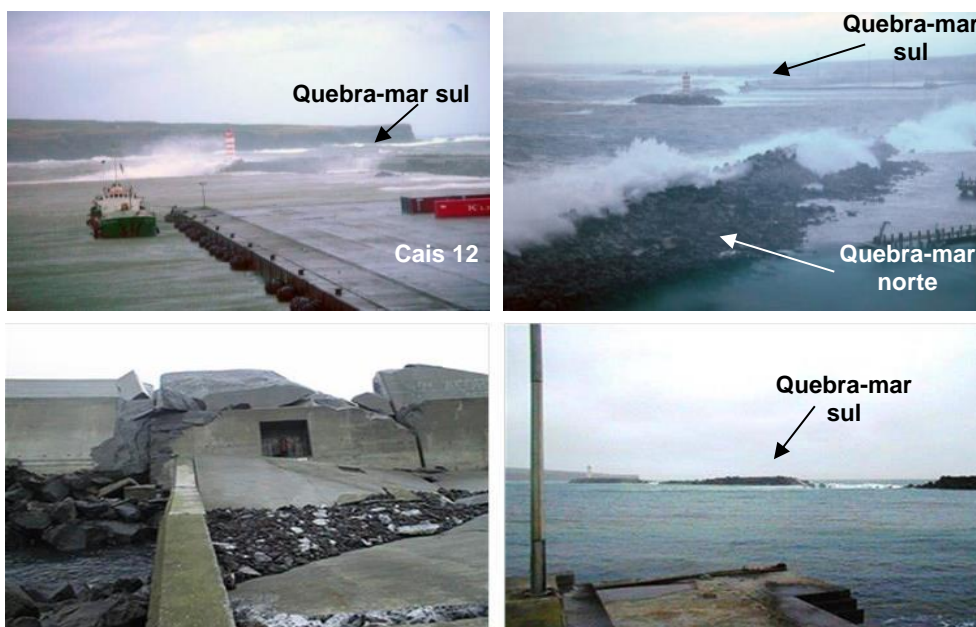
**Tabela 1.** Eventos mais relevantes, durante o período de 1979-2014, previstos pelo sistema com as condições de agitação marítima e galgamento médio máximo  $q_{\max}$  (l/s/m) obtido no quebra-mar sul (sem muro de proteção).

Data	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$\theta$ (°)	NM (m, ZH)	$q$ (l/s/m)
1984/03/02 18:00	6.20	12.33	78.71	1.25	16.56
1990/12/02 12:00	4.95	12.33	78.22	1.73	3.66
2001/12/21 06:00	5.70	12.33	86.00	1.83	14.14
2004/03/25 18:00	5.52	13.64	84.47	1.75	12.84
2005/02/27 00:00	6.17	13.64	85.03	1.03	16.62
2007/01/24 06:00	5.44	12.33	99.14	2.17	12.78
2010/12/16 12:00	5.60	12.33	91.69	1.69	10.41
2013/03/14 06:00	4.50	11.14	82.48	1.67	1.22
2013/12/05 06:00	5.47	11.14	81.10	1.80	7.47

A validação do sistema via *hindcast* concentrou-se principalmente nos grandes eventos de galgamento. O objetivo foi ter acesso a qualquer tipo de evidência histórica irrefutável que pudesse confirmar a ocorrência desses grandes eventos. A magnitude de cada evento deve ser validada com evidências das consequências da ocorrência do fenómeno. Como será possível constatar mais adiante, não foi possível validar todos os eventos listados na Tabela 1, quer por falta de registos históricos ou por não ter sido detectado pelo sistema.

### 21 de dezembro de 2001

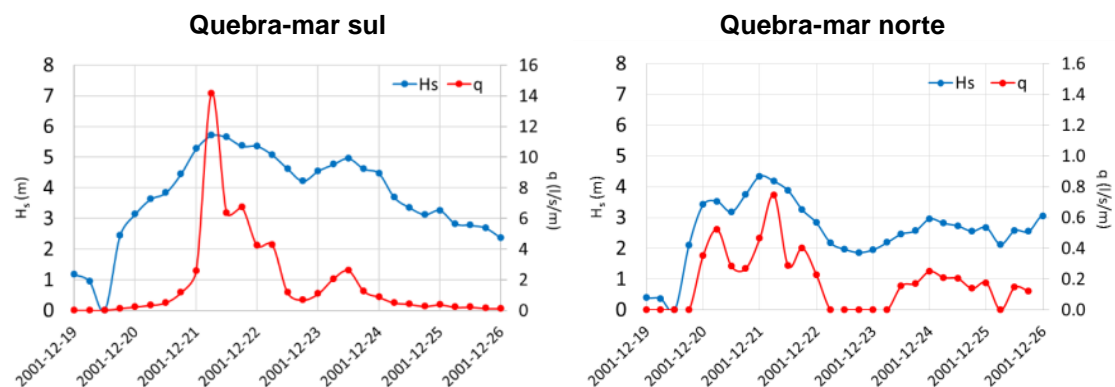
Neste dia, o quebra-mar sul do porto da Praia da Vitória foi severamente afetado por uma grande tempestade. De acordo com a APTG (2004), o quebra-mar sul foi destruído em três locais diferentes e o muro de proteção, existente na zona do Cais 12, foi severamente danificado (Figura 6).



**Figura 6.** Forte agitação marítima e galgamento no dia 21 de dezembro de 2001 na Praia da Vitória (em cima) e danos resultantes no quebra-mar sul dias depois (em baixo).

Esta foi uma das maiores tempestades a atingir a ilha Terceira durante o período de *hindcast* considerado. Situação essa verificada pelos estragos observados. Os resultados obtidos pelo modelo DREAMS do sistema HIDRALERTA indicam um pico de altura de onda significativa,  $H_s$ , de 5.7 m, e um período de pico de onda,  $T_p$ , de 12.3 s e com direção,  $\theta$ , de Este (86°) no pé do

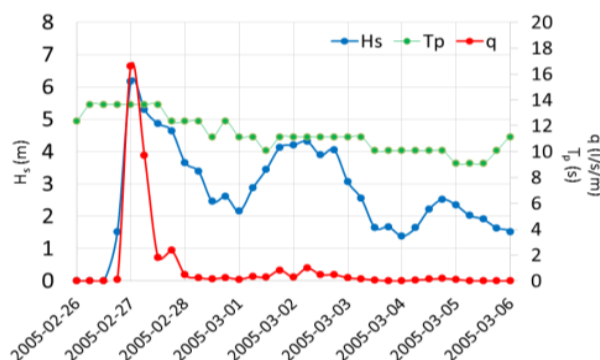
quebra-mar sul (ponto D8). O galgamento médio,  $q$ , associado a estas condições foi de 14.1 l/s/m. O resultados do quebra-mar norte mostram um pico de galgamento máximo de 0.75 l/s/m, com  $H_s = 4.2$  m,  $T_p = 12.3$  s e  $\theta = 77.5^\circ$  (ponto D9)(Figura 7). Os resultados de galgamento para o quebra-mar norte ficaram aquém do que se observou no local.



**Figura 7.** Altura significativa da onda,  $H_s$  (azul), e caudal médio,  $q$  (vermelho), na secção do quebra-mar sul (sem muro) e no quebra-mar norte entre 19 e 26 de dezembro de 2001.

## 26 e 27 de fevereiro de 2005

De acordo com os resultados do sistema, esta foi a maior tempestade durante o período de *hindcast* considerado para a Praia da Vitória. Os resultados no pé da estrutura do quebra-mar sul (D8) indicam valores muito elevados do período de pico e de altura de onda significativa com  $H_s = 6.2$  m,  $T_p = 13.6$  s e  $\theta = 85^\circ$ . O galgamento médio atingiu os 16.6 l/s/m (Figura 8).



**Figura 8.** Altura significativa da onda,  $H_s$ , período de pico,  $T_p$ , e caudal médio galgado,  $q$ , durante a tempestade de 26 e 27 de fevereiro de 2005 e dias seguintes.

A bóia BOND1 localiza-se 4 km a NE da entrada do porto da Praia da Vitória e a uma profundidade de 90 m (Figura 9).



**Figura 9.** Localização da bóia BOND1 junto ao porto da Praia da Vitória (Fonte: Google Earth).

De acordo com Esteves et al. (2009), no âmbito do projeto CLIMAAT, a boia registou valores de  $H_s$  acima de 5 m entre as 17h de 26 de fevereiro e as 12h de 27 de fevereiro, com um valor máximo de  $H_s$  de 8.4 m registado às 20h32 de 26 de fevereiro. A altura de onda máxima,  $H_{max}$ , de 15.1 m foi registada à 00h32 de 27 de fevereiro, associada a  $T_p$  de 8.6 s e a direção média de 86° (Este). Nesta tempestade observaram-se galgamentos em ambos os quebra-mares.

No entanto, como as estruturas se encontravam danificas desde a tempestade de dezembro de 2001, tal originou maiores galgamentos do que os previstos pelo sistema, o qual não tem em conta os danos acumulados ao longo da vida útil da estrutura (Figura 10).



**Figura 10.** Galgamentos no quebra-mar sul da Praia da Vitória no dia 27 de fevereiro de 2005.  
(Fotografia: Diário Insular)

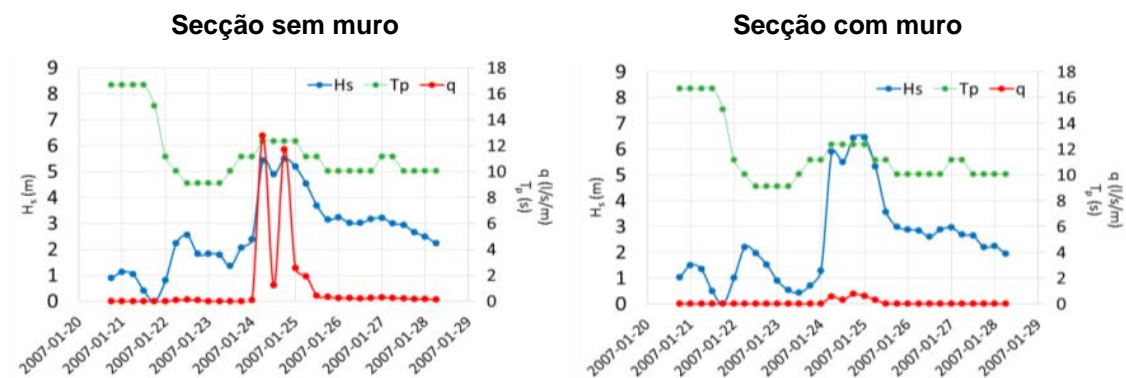
### ***24 de janeiro de 2007***

Outro temporal foi registado a 24 de janeiro de 2007, no qual se verificaram sobretudo galgamentos no quebra-mar sul. O quebra-mar foi galgado na secção com e sem muro de proteção. Na Figura 11 observa-se o muro de proteção a ser galgado e a inundação a ocorrer no Cais 12 e a atingir contentores. É também possível observar a existência de terra e pequenas pedras que foram transportadas pela massa de água. Quando ocorre galgamentos na secção com muro, é certo também a ocorrência na secção sem muro.



**Figura 11.** Galgamentos no quebra-mar sul da Praia da Vitória em 24 de janeiro de 2007

O sistema confirmou a ocorrência de galgamentos para esse dia. A Figura 12 apresenta os resultados de agitação marítima ( $H_s$  e  $T_p$ ) e galgamentos para a secção com e sem muro de proteção.



**Figura 12.** Altura significativa da onda,  $H_s$ , período de pico,  $T_p$ , e caudal médio,  $q$ , entre os dias 20 e 28 de janeiro de 2007 para as secções com e sem muro de proteção do quebra-mar sul.

Tal como se pode verificar, a ocorrência de galgamentos na secção sem muro é evidente nesse dia ( $q_{\max} = 12.8$  l/s/m). Na secção com muro, o sistema também confirmou a ocorrência de galgamentos, apesar de apresentar resultados bastante menores ( $q_{\max} = 0.6$  l/s/m). É importante notar que na secção com muro, os pequenos galgamentos, da ordem de 1 l/s/m, podem significar consequências gravosas, como a inoperacionalidade da zona próxima do muro de proteção no Cais 12.

### 31 de dezembro de 2009

Os eventos de galgamento de menores dimensões foram inicialmente excluídos do objetivo deste artigo para os dados de *hindcast*. No entanto, durante a investigação feita para obter dados e informações sobre tempestades históricas, o HIDRALERTA teve acesso a uma vídeo reportagem da RTP Açores - [http://www.rtp.pt/noticias/pais/ondulacao-provocou-estragos-no-porto-da-praia-da-vitoria\\_v307331](http://www.rtp.pt/noticias/pais/ondulacao-provocou-estragos-no-porto-da-praia-da-vitoria_v307331)) em 2 de janeiro de 2010 sobre problemas recentes de navegação e ancoragem no porto da Praia da Vitória (Figura 13).



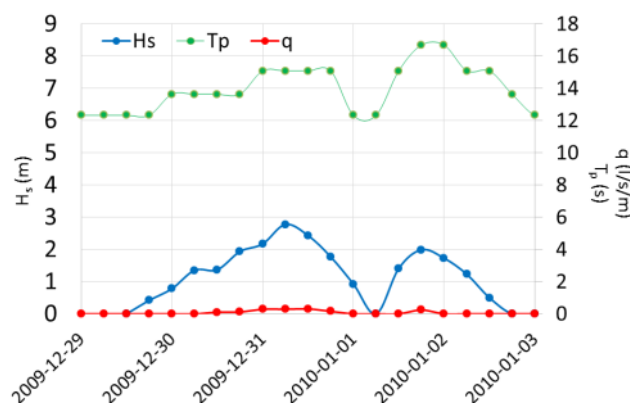
**Figura 13.** Reportagem da RTP sobre a tempestade de 31 de dezembro de 2009

No vídeo, um representante da autoridade marítima açoriana afirma que:

"Os danos são menores. Havia algumas ondas de Este e o porto está mais exposto a essa direção. Alguns barcos tiveram de se afastar do Cais porque os cabos de ancoragem começavam a partir."

Apesar de parecer evidente no vídeo, o impacto que os galgamentos tiveram na defesa frontal, com a destruição parcial do pavimento (Figura 13), a reportagem sugere que não houve galgamento relevante durante este período. Os resultados de *hindcast* para a secção do quebra-mar sul sem muro são mostrados na Figura 14, onde se verifica a ocorrência de galgamentos, mas de muito pequenas dimensões para essa secção ( $q_{\max} = 0.3$  l/s/m).

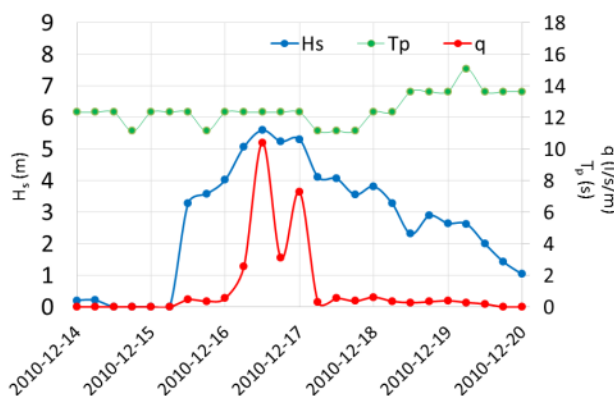




**Figura 14.** Altura significativa da onda,  $H_s$ , período de pico,  $T_p$ , e caudal médio galgado,  $q$ , entre os dias 29 de dezembro de 2009 e 2 de janeiro de 2010 para a secção do quebra-mar sul sem muro de proteção.

### 16 de dezembro de 2010

De acordo com outro vídeo da RTP Açores ([http://www.rtp.pt/acoes/economia/mar-bravo-volta-a-condicionar-operacao-no-porto-da-praia-da-vitoria-video\\_18806](http://www.rtp.pt/acoes/economia/mar-bravo-volta-a-condicionar-operacao-no-porto-da-praia-da-vitoria-video_18806)), a agitação marítima na Praia da Vitória foi responsável por problemas na navegação e ancoragem a 16 de dezembro de 2010. O jornalista afirma que: “A navegação foi afetada neste porto por volta das 7 horas da manhã devido à ocorrência de grande ondas de Este. Um conjunto de navios teve de abandonar o porto e seguir para outro porto que tivesse melhores condições.” Não existiu uma referência direta ao galgamento no vídeo. É apenas sugerido que o estado do mar é severo. Os resultados de *hindcast* são apresentados na Figura 15. O galgamento médio máximo para o quebra-mar sul (sem muro) foi atingido pelo sistema às 12h ( $q_{\max} = 10.4 \text{ l/s/m}$ ), com  $H_s = 5.6 \text{ m}$ ,  $T_p = 12.3 \text{ s}$  e  $\theta = 91.7^\circ$ .

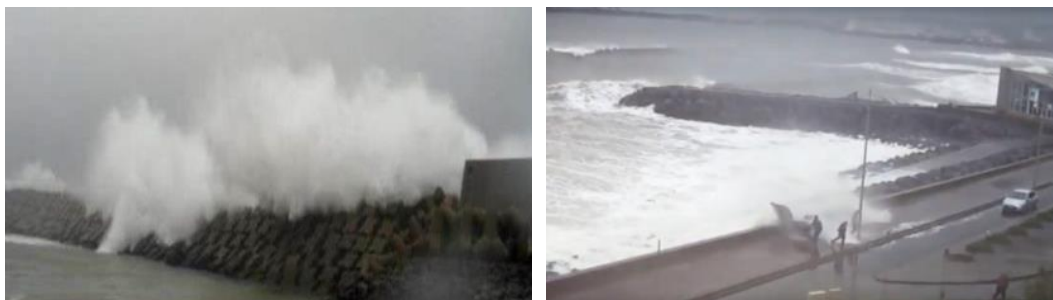


**Figura 15.** Altura significativa da onda,  $H_s$ , período de pico,  $T_p$ , e caudal médio galgado,  $q$ , entre os dias 14 e 20 de dezembro de 2010 para a secção do quebra-mar sul sem muro.

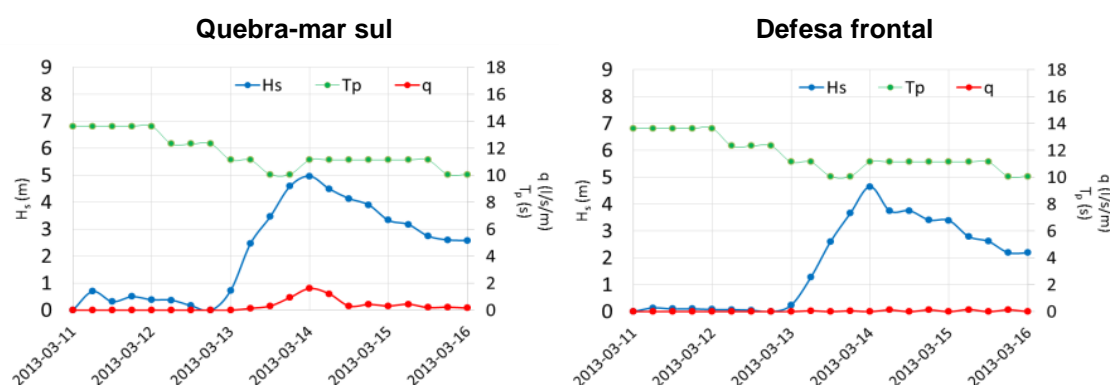
### 13 de março de 2013

A 13 de março de 2013, um forte temporal voltou a atingir a Praia da Vitória, nomeadamente o quebra-mar sul e a defesa frontal. Apesar do mau tempo, o porto continuou a operar e um dos seus funcionários, durante a operação de amarração, fraturou o pulso. Também a defesa frontal foi fustigada com galgamentos que atingiram pessoas que se encontravam junto da marginal (Figura 16).

A Figura 17 confirma a ocorrência de galgamentos no quebra-mar sul ( $q_{\max} = 0.9 \text{ l/s/m}$ ) e na defesa frontal ( $q_{\max} = 0.2 \text{ l/s/m}$ ).



**Figura 16.** Galgamentos no quebra-mar sul e na defesa frontal da Praia da Vitória durante a tempestade de 13 de março de 2013



**Figura 17.** Altura significativa da onda,  $H_s$ , período de pico,  $T_p$ , e caudal médio galgado,  $q$ , entre os dias 11 e 16 de março de 2013 para a secção do quebra-mar sul sem muro de proteção e para a secção da defesa frontal junto ao bar.

Para esta tempestade o sistema não pareceu corresponder adequadamente ao que se sucedeu no terreno. Tal como se pode observar na Tabela 1, neste evento as condições de agitação marítima encontram-se perto das condições mais gravosas previstas pelo sistema para outras tempestades. A altura significativa da onda é, no entanto, ligeiramente menor em comparação com o que foi obtido nas outras tempestades, mas aparentemente suficiente para obter galgamentos significativamente menores.

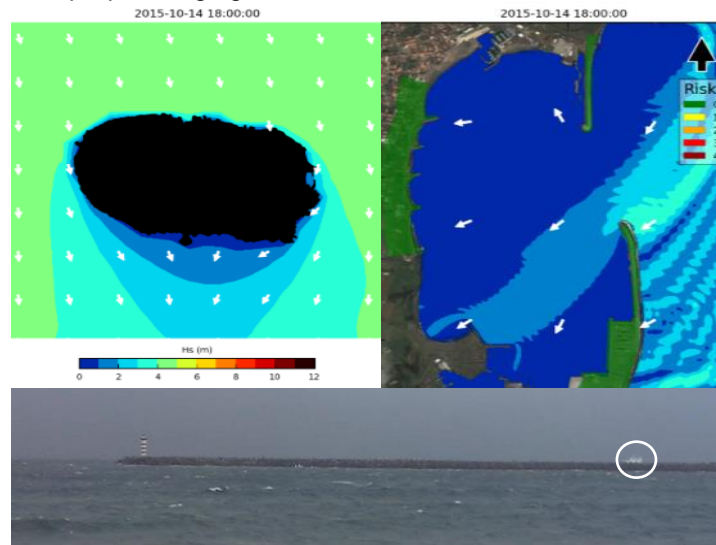
Este processo de validação com os dados de *hindcast*, permitiu, numa primeira instância, verificar em que ponto da situação se encontrava o sistema. Tendo-se verificado algumas diferenças entre os resultados do sistema e as evidências registadas durante as tempestades, houve necessidade de analisar e rever algumas parameterizações do sistema (ver secção 5).

## 4. Verificação em tempo-real da previsão

Em setembro de 2015, todos os módulos do sistema HIDRALERTA estavam devidamente interligados e o sistema estava em funcionamento para teste. Desta forma, foi possível começar a validar o sistema em tempo-real. A equipa do HIDRALERTA decidiu elaborar boletins diários de previsão da agitação marítima e galgamento, que foram enviadas para as instituições e autoridades que lidam com a gestão portuária, entre outros. O objetivo foi obter como retorno, acesso a vídeos, fotografias e relatórios que pudessem confirmar a precisão do sistema HIDRALERTA para a previsão ou para obter sugestões no que poderia ser alterado ou melhorado. Uma comunidade de observadores locais foi constituída e treinada para observar, registar e informar sobre o estado do mar, elevação e tipologia das ondas e magnitude do galgamento. Os elementos desta comunidade de observadores locais incluíram membros da Câmara Municipal da Praia da Vitória, da Proteção Civil e da Autoridade Portuária, bem como, residentes, proprietários dos restaurantes à beira-mar e surfistas. Pretendeu-se validar tanto a ocorrência de pequenos como de grandes eventos de galgamento.

### 14 de outubro de 2015

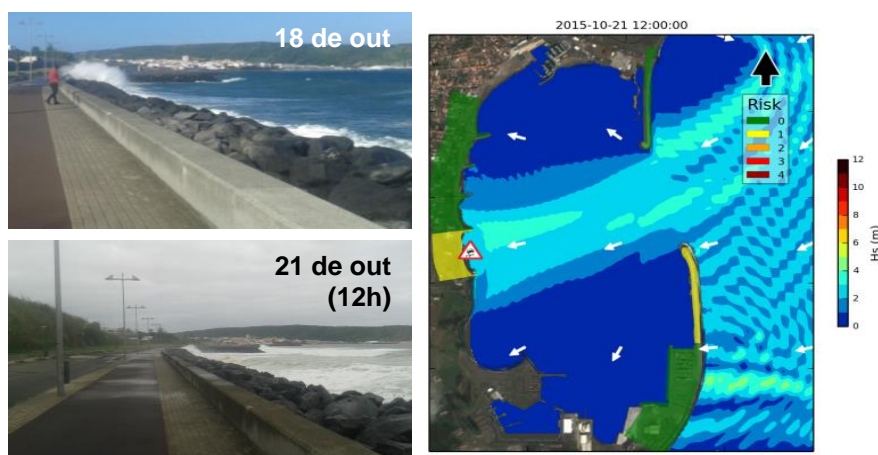
A primeira tempestade com potencial para a ocorrência de fortes galgamentos, ocorreu com ondas vindas de NO e com  $H_s$  de 5 m. O sistema não forneceu qualquer alerta de galgamento para este evento (Figura 18). Contudo, os alertas estão dependentes dos limites previamente estabelecidos, como definido por Pullen et al. (2007). Em alguns sectores, parte das atividades que ocorrem junto à costa não têm de ser suspensas até um determinado limite de galgamento. A não emissão de um alerta não é suposto ser interpretado como a não existência de qualquer galgamento, que foi o caso deste evento. O sistema indicou a ocorrência de pequenos galgamento no quebra-mar sul, que foi confirmado por observadores locais (Figura 18). Este evento foi, desta forma, uma oportunidade para testar a capacidade do sistema para prever com fiabilidade pequenos galgamentos.



**Figura 18.** Resultados do modelo SWAN na Ilha Terceira (canto superior esquerdo). Níveis de alerta do sistema HIDRALERTA (canto superior direito) e fotografia do quebra-mar sul em 14 de outubro de 2015 mostrando um galgamento de pequenas dimensões (em baixo).

### 18 a 21 de outubro de 2015

Durante vários dias, entre 18 e 21 de outubro de 2015, foram previstos pelo sistema vários galgamentos na Praia da Vitória, nomeadamente na defesa frontal (Figura 19).



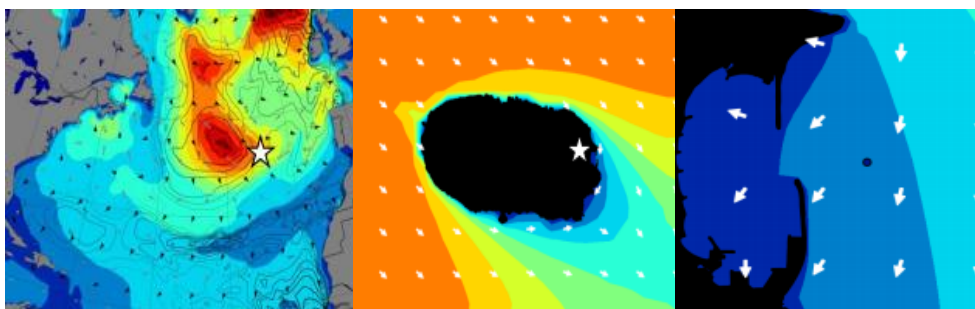
**Figura 19.** Resultados do WAM (esquerda), SWAN (centro) and DREAMS (direita) para  $H_s$  e  $\theta$  no dia 18 de outubro de 2015.

Sem a possibilidade de medir exatamente a altura da onda no interior do porto, segundo os depoimentos da comunidade local, as ondas teriam cerca de 2 metros junto à defesa frontal pelas 12h do dia 21 de outubro de 2015. Esse valor coincidiu com os resultados do sistema

para o mesmo instante. Verificou-se a ocorrência de galgamentos de pequenas dimensões no local, tendo sido acionado pela primeira vez o nível de alerta amarelo e um sinal de perigo para o tráfego junto à marginal.

### **1 de novembro de 2015**

A primeira grande tempestade a atingir os Açores durante o inverno de 2015/2016 foi a 1 de novembro. O HIDRALERTA previu ao largo um  $H_s$  de 8 m e ondas vindas de NO e  $H_s$  de 2 m na entrada do porto. Uma vez que as ondas vindas de NO precisam de uma grande refração para atingir o porto, o sistema não emitiu qualquer alerta para este evento. De facto, a ocorrência de galgamento não era esperada (Figura 20).



**Figura 20.** Resultados do WAM (esquerda), SWAN (centro) and DREAMS (direita) para  $H_s$  e  $\theta$  no dia 1 de novembro de 2015.

Contudo, neste dia foram observados eventos de galgamento na Praia da Vitória. Um vídeo e uma fotografia capturados por dois surfistas locais mostram ondas com, pelo menos, 2.5 m dentro da baía, causando galgamento significativos no setor mais a sul da defesa frontal (Figura 21).



**Figura 21.** Galgamentos na baía da Praia da Vitória a 1 de novembro de 2015.

O sistema HIDRALERTA falhou neste evento. Uma análise mais aprofundada permitiu aplicar a partir deste evento novas correções no sistema, que incluíram:

- Incluir o modelo WAM da ECMWF (WAMDI Group 1988) para a agitação marítima, como alternativa ao modelo WaveWatch III (Tolman 1989), fornecido pela NOAA/FNMOC, anteriormente utilizado;
- Redefinir as condições de fronteira da grelha do modelo DREAMS;
- Corrigir parte dos parâmetros geométricos da estrutura do ficheiro de *input* da NN\_OVERTOPPING2;
- Ajustar os limites de segurança para atividades específicas que ocorrem em cada um dos sectores.

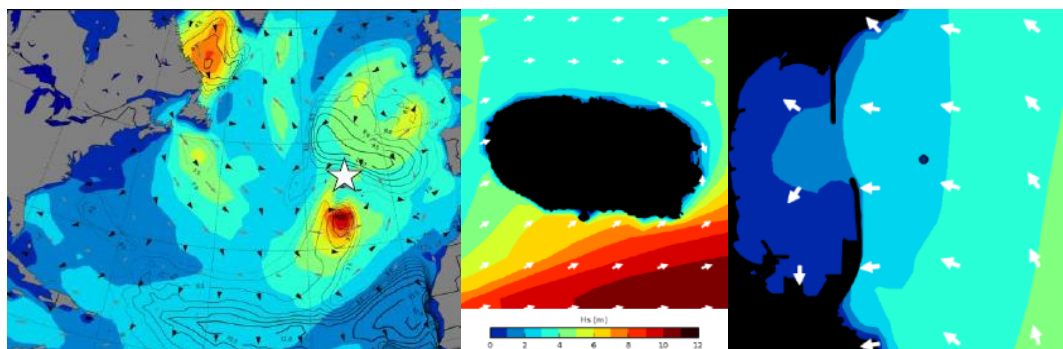
A revisão do código do sistema permitiu otimizar o mesmo em termos de funcionalidade, robustez e fiabilidade.

### **14 de dezembro de 2015**

A tempestade de 14 de dezembro de 2015 atingiu os Açores, causando danos relevantes em vários portos, principalmente nos virados a sul. A versão melhorada do sistema HIDRALERTA



emitiu um alerta com ondas ao largo com  $H_s$  de 11.2 m e vindas de SO, que resultaram em ondas de  $H_s$  de 3 m na entrada do porto e de 1 a 2 metros no seu interior (Figura 22).



**Figura 22.** Resultados do WAM (esquerda), SWAN (centro) and DREAMS (direita) para  $H_s$  e  $\theta$  no dia 14 de dezembro de 2015.

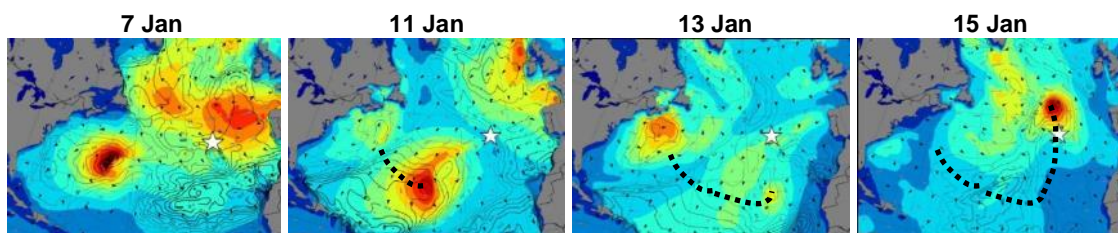
A equipa do HIDRALERTA encontrava-se no local durante este evento e testemunhou a ocorrência de ondas e galgamento significativos (Figura 23).



**Figura 23.** Estado do mar e galgamento na baía da Praia da Vitória a 14 de dezembro de 2015. A figura da esquerda e do centro foram tiradas pelas 18h30 no sector sul da defesa frontal da baía. O HIDRALERTA emitiu um alerta amarelo (galgamentos de pequenas dimensões e consequências reduzidas) pelas 18h00 (direita).

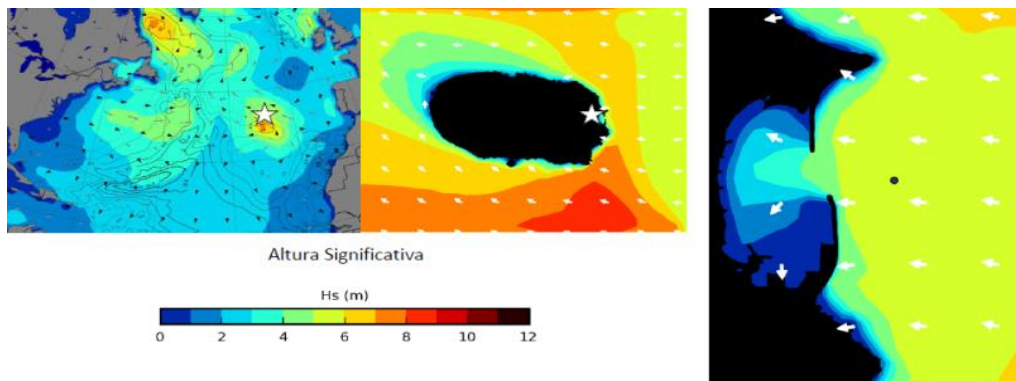
### 15 de janeiro de 2016

O Furação Alex (Categoria 1) foi o primeiro a formar-se no Atlântico Norte desde 1955 (<http://pt.magicseaweed.com/news/first-january-hurricane-in-60-years/8545/>) – passou pela ilha Terceira por volta das 12h de 15 de Janeiro de 2016. Oito dias mais cedo, a 7 de Janeiro de 2015, os resultados do sistema HIDRALERTA sugeriam a formação do que parecia ser o desenvolvimento de uma tempestade tropical entre os Açores e a Flórida (EUA). As autoridades foram imediatamente avisadas de que uma tempestade se estaria a formar. Como ilustrado na Figura 24, a tempestade seguiu um percurso incomum até atingir a posição a cerca de 2000 km a sul dos Açores, no dia 12 de Janeiro. A 13 de Janeiro, o furação começou a deslocar-se para Norte depois de enfraquecer ligeiramente nos dias anteriores. A 14 de Janeiro, a NOAA emitiu um alerta de Furação nível 1 e denominou-o de Alex ([http://www.nhc.noaa.gov/graphics\\_at1.shtml?5-daynl](http://www.nhc.noaa.gov/graphics_at1.shtml?5-daynl)).



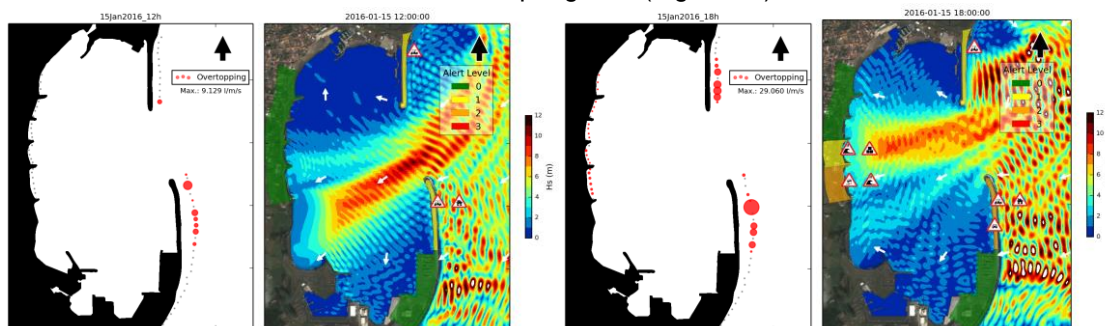
**Figura 24.** Resultados do Sistema HIDRALERTA para o modelo WAM no Atlântico Norte entre 7 e 15 de janeiro de 2016. O percurso do furação Alex.

A ocorrência de galgamento foi prevista pelo sistema e ocorreu ao longo de diversas ocasiões, mas sempre sem consequências severas, devido, principalmente, ao dispositivo de segurança montado para esta tempestade. Com um pico de agitação a 15 de Janeiro de 2016, o HIDRALERTA previu ondas com  $H_s$  de 6 m vindas de Este na entrada do porto, uma combinação bastante perigosa para a Praia da Vitória (Figura 25).



**Figura 25.** Resultados do WAM (esquerda), SWAN (centro) and DREAMS (direita) para  $H_s$  e  $\theta$  no dia 15 de janeiro de 2016.

Diferentes níveis de alerta foram emitidos ao longo das previsões em várias secções do porto. Várias atividades foram consideradas como perigosas (Figura 26).



**Figura 26.** Resultados da NN\_OVERTOPPING2 e alerta de galgamento para o dia 15 de janeiro de 2016 às 12h e 18h.

Grandes eventos de galgamento ocorreram nos quebra-mares do porto durante o dia de 15 de Janeiro de 2016 (Figura 27). Pequenos e médios galgamentos foram também reportados pelos observadores locais na defesa frontal da baía.



**Figura 27.** Estado do mar e galgamento na baía da Praia da Vitória a 15 de janeiro de 2016. As fotografias foram tiradas entre as 9h e 12h.

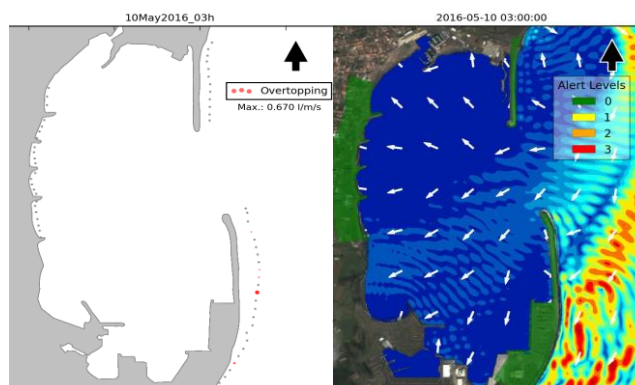
## 9 e 10 de maio de 2016

Entre 9 e 10 de maio de 2016, a câmara de videovigilância instalada numa torre do Cais 12 captou de forma automática a ocorrência de galgamentos no quebra-mar sul. Esta câmara permitiu uma nova forma de validação do sistema HIDRALERTA (Figura 28).



**Figura 28.** Imagem captada de forma automática pelo sistema de video-vigilância

O sistema HIDRALERTA previu a ocorrência de galgamentos para esta secção, mas não acionou qualquer nível de alerta (Figura 29). Como se veio a confirmar junto das autoridades, não se registou qualquer incidente e as operações portuárias decorreram dentro da normalidade (apesar de se ter verificado a ocorrência de galgamentos).



**Figura 29.** Galgamentos previstos pelo sistema para as 3h do dia 10 de maio de 2016. Sem acionamento do nível de alerta.

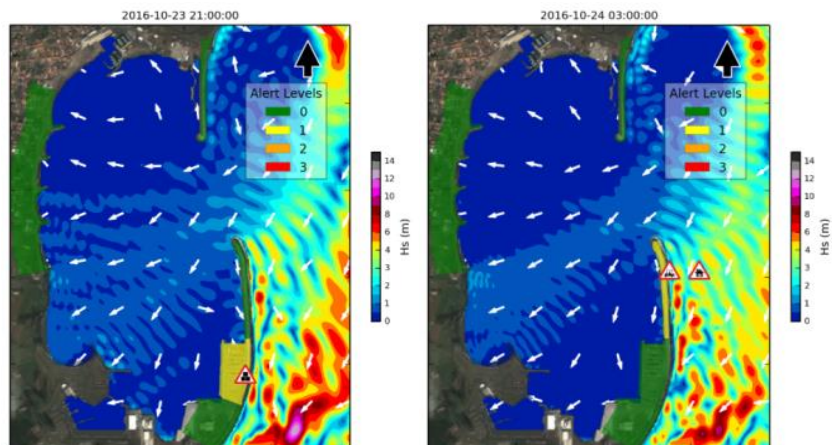
## 23 e 24 de outubro de 2016

Nestes dias o sistema previu a ocorrência de galgamentos no porto. O porto foi contactado previamente para ficar ciente da ocorrência. As previsões apontaram para ocorrências no quebra-mar sul, nas secções com e sem muro de proteção (Figura 31). As autoridades confirmaram a ocorrência de galgamentos na secção sem muro e galgamentos numa área específica da secção protegida pelo muro, onde também se encontrou um aglomerado de pedras vindas do mar, tal como se pode ver na Figura 30. Confirmou-se também a ocorrência de pequenos galgamentos na marginal, no entanto, o sistema não emitiu qualquer alerta para esta secção.



**Figura 30.** Identificação pelas autoridades das secções afetadas pelo galgamento





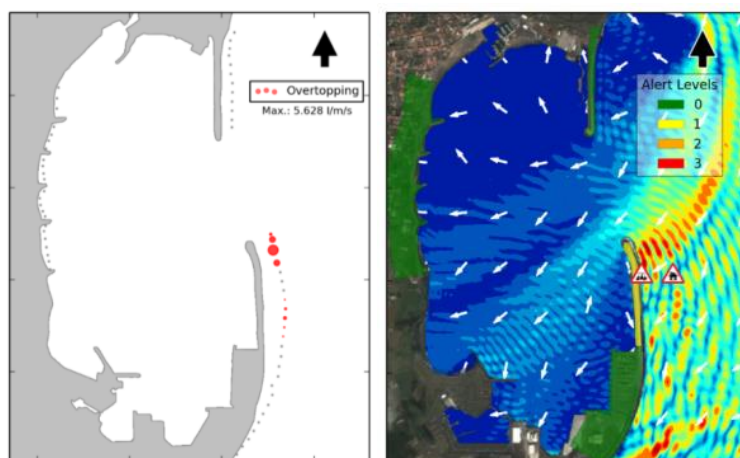
**Figura 31.** Previsões do sistema HIDRALERTA para os dias 23 e 24 de outubro

### **27 de abril de 2017**

Num dia de céu limpo, um video captado por um elemento da autoridade portuária mostrou a ocorrência de galgamentos no quebra-mar sul e o Cais 12 voltou a ser atingido por pequenos galgamentos (Figura 32). O piso ficou molhado, mas não o suficiente para obrigar à paragem das atividades portuárias. O sistema apenas conseguiu prever a ocorrência de galgamentos para uma secção do quebra-mar sul (Figura 33). Os galgamentos calculados pelo sistema indicam a ocorrência de galgamentos ao longo de todo o dia, sendo que os que apresentaram maior intensidade aconteceram por volta das 3h e das 15h.



**Figura 32.** Galgamentos no quebra-mar sul durante a tempestade de 27 de abril de 2017



**Figura 33.** Previsões do sistema Hidralerta para o dia 27 de Abril às 3h



## 5. Avaliação dos procedimentos de validação

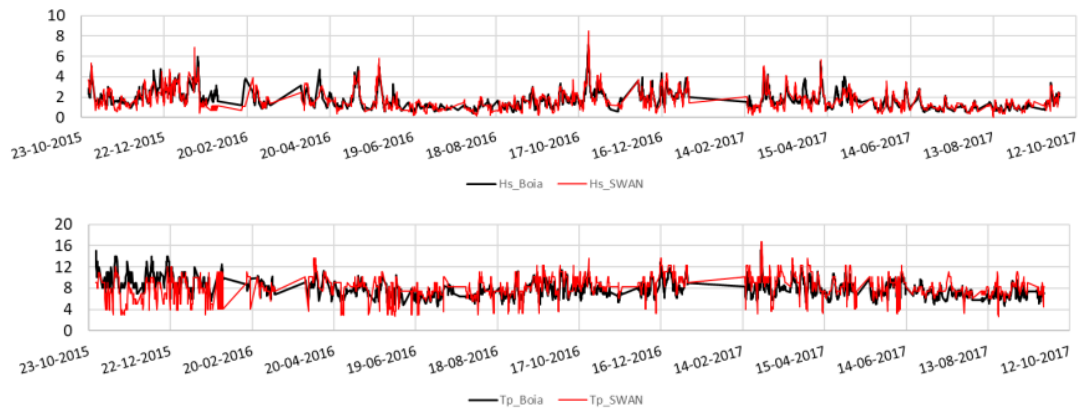
Após verificar as diferenças obtidas entre os resultados de *hindcast* e previsão e os registos que foram possíveis de obter, foi possível identificar alguns aspetos que podem justificar as diferenças obtidas em algumas situações:

- Durante o *hindcast*, os dados de *input* para o Atlântico Norte têm um intervalo de 6 horas. O pico de uma determinada ondulação pode ocorrer facilmente entre dois *outputs* do sistema HIDRALERTA.
- O *output* principal da NN\_OVERTOPPING2 é denominado como galgamento médio. A rede neural é, no entanto, capaz de fornecer outros *outputs*, nomeadamente vários quartis que resultam de um conjunto de mais de 700 redes neurais suportadas por mais de 8 000 testes em modelo físico (Coeveld et al. 2005). Por exemplo, o quartil de 97,5% (galgamento médio superado apenas por 2.5% dos *inputs* das redes neuronais) para a tempestade de 21 de dezembro de 2001 é de 47.9 l/s/m. No que diz respeito ao galgamento violento e destrutivo, é aconselhável considerar o galgamento máximo associado às ondas maiores, uma vez que serão estes que causarão maiores danos.
- O HIDRALERTA leva em consideração a geometria atual do quebra-mar sul (desde janeiro de 2008). Essa estrutura foi reconstruída após os danos de 21 de dezembro de 2001, onde se atingiu galgamentos até 14.1 l/s/m. O lado exterior do quebra-mar está agora protegido com blocos Antifer de 25 t, enquanto que anteriormente estava coberto com um revestimento de pedra de 9 a 12 toneladas. Durante as tempestades anteriores a 2008, a estrutura era menos robusta e, portanto, seria possível a ocorrência de galgamentos superiores, que podem justificar os danos ocorridos.
- Devido a restrições computacionais, a validação com dados de *hindcast* para 34 anos foi realizada para um único ponto no meio de cada secção considerada, D1 a D9 (Figura 2). **Figura 2.** Localização e imagem aérea da Praia da Vitória, Ilha Terceira, Açores. A previsão diária do sistema contempla vários pontos ao longo de cada secção e há uma variação considerável no galgamento médio previsto de um ponto para outro, como é claramente visível nas Figuras 26, 29 e 33. Uma vez que a geometria da estrutura é constante ao longo desse setor, essa variabilidade é imposta pelas irregularidades da batimetria que criam áreas contrastantes de acumulação e dissipação de energia das ondas. Assim, é expectável que, se tivessem sido analisados os outros pontos nas proximidades, os resultados poderiam ser significativamente diferentes.
- O trabalho desenvolvido no HIDRALERTA sugere que, em vez de  $H_s$ , outros parâmetros de altura da onda podem ser mais adequados para a previsão do galgamento violento e destrutivo. Por exemplo, a utilização de  $H_{1/100}$  (média das 100 ondas maiores) ou  $H_{1/10}$  (média das 10 ondas maiores) podem ser mais adequados. Um facto que apoia essa afirmação é que, durante os cerca de 200 testes em modelo físico que foram conduzidos durante o projeto HIDRALERTA para estimar o galgamento sobre uma estrutura semelhante ao quebra-mar sul, a quantidade de ondas que galgaram a estrutura foi bastante inferior a 1/3 das ondas do ensaio. Tanto  $H_{1/100}$  como  $H_{1/10}$  parecem representar melhor as condições que, na realidade, levam a graves impactos resultantes do galgamento.

## 6. Validação com a boia ondógrafo

Desde que o sistema está operacional, todos os dias é atualizado o gráfico com informação comparativa da boia ondógrafo e do sistema para o mesmo local (Lopes et al. 2016)(Figura 34). A informação disponível diz respeito aos parâmetros de agitação marítima, nomeadamente a altura significativa  $H_s$  e o período de pico  $T_p$ . A análise estatística mostra a boa correlação existente entre os dados medidos e previstos, principalmente em relação à altura significativa  $H_s$ , em que o índice de concordância (IC) se encontra perto dos 90% e o RMSE é de 0.53 m e o BIAS é de 0.38 m (Tabela 2). O período de pico  $T_p$  apresenta um índice de concordância inferior, de cerca de 60% e um RMSE e BIAS de 1.79 m e 1.34 m, respetivamente. Estes valores podem-se considerar também aceitáveis dada a grandeza dos valores do período de

pico obtidos. Durante o período analisado, foram várias as vezes que a boia se encontrou inoperacional, principalmente quando ocorreram tempestades com intensidade.



**Figura 34.** Registo da boia ondógrafo e do sistema HIDRALERTA para o mesmo local

**Tabela 2.** Análise estatística dos parametros de agitação marítima  $H_s$  e  $T_p$

Parâmetro	RMSE (m)	BIAS (m)	IC (%)
$H_s$	0.53	0.38	0.87
$T_p$	1.79	1.34	0.57

## 7. Validação com o ensaios em modelo físico

A secção do quebra-mar sul que protege o Cais 12, foi reproduzida num ensaio em modelo físico com vista à simulação das condições de agitação reais nesta secção. Estes resultados foram comparados com a ferramenta neuronal NN\_OVERTOPPING2, apesar de ainda não se encontrarem publicados, e com o modelo numérico SWASH, que se pretende adicionar ao sistema HIDRALERTA, como forma complementar de analisar o galgamento (Poseiro et al. 2017a). Em Poseiro et al. (2017a) foi realizada uma análise de sensibilidade que pretendeu identificar a influência de vários parâmetros na determinação do galgamento, nomeadamente os coeficientes de Forchheimer e a resolução horizontal da malha utilizada. Estes ensaios envolveram também a utilização de uma câmara de filmar que permitiu compreender o comportamento da onda junto à estrutura, desde o rebentamento até ao galgamento. Foi realizada a sobreposição da imagem captada no ensaio com os resultados do modelo SWASH para cada instante. Desta forma, foi possível de forma eficiente calibrar o modelo SWASH e comprovar a sua utilidade para o galgamento em estruturas porosas e com muro de proteção (Figura 35).



**Figura 35.** Imagem captada no ensaio num instante em que se registou a ocorrência de galgamento e sobreposição com os resultados do modelo SWASH para o mesmo instante

## 8. Conclusões

Esta comunicação apresenta os processos de validação implementados para validar o sistema HIDRALERTA. Os resultados obtidos por meio de eventos históricos demonstram a boa capacidade do sistema para prever a ocorrência de galgamentos na Praia da Vitória. Os vários eventos que se tentaram validar representam a maioria das tempestades que aconteceram na zona de estudo, e mais concretamente junto ao quebra-mar sul. A existência de elementos, como fotografias, vídeos e notícias, que permitiram validar a ocorrência de galgamentos noutras secções, foi também utilizada para comparar com os resultados do sistema.

Com vista à validação do sistema operacional com as previsões, a equipa do HIDRALERTA conseguiu reunir uma comunidade de observadores locais que têm ajudado a realizar o processo de validação. Esta comunidade inclui membros da Proteção Civil local e regional, membros da Câmara Municipal, meios de comunicação locais, moradores, proprietários de restaurantes e bares ao longo da costa, surfistas e outros utilizadores da zona costeira da Praia da Vitória. O feedback recebido quer durante pequenos ou grandes eventos de galgamento, mostra a capacidade do sistema para prever com considerável resolução espacial a ocorrência, magnitude e consequências do fenómeno. Esta conclusão deixa excelentes indicações sobre a fiabilidade e precisão do sistema.

Devido à sua localização geográfica, o arquipélago açoriano é muitas vezes fustigado por tempestades severas com grande potencial para causar situações perigosas relacionadas com o galgamento, com um risco económico e ambiental considerável. A confiança no sistema permite beneficiar claramente o processo de tomada de decisão, no que diz respeito à gestão costeira e portuária. Uma série de ações de mitigação e minimização de riscos podem ser mais eficientes se os resultados do HIDRALERTA forem considerados.

De forma complementar à validação realizada no terreno com fotografias e vídeos, que permitem validar principalmente os módulos II e III, a validação com a boia ondógrafo é também fundamental para garantir a boa execução do sistema, uma vez que permite verificar a consistência do sistema para prever a agitação marítima (módulo I). Situação que foi confirmada com a análise estatística realizada.

Os ensaios realizados em modelo físico são também fundamentais para analisar em detalhe o comportamento da onda sobre a estrutura e o galgamento. A comparação realizada com a rede neuronal NN\_OVERTOPPING2 (que ainda não foi publicada), atualmente utilizada pelo sistema, permitirá reforçar a fiabilidade do mesmo, bem como a comparação que já foi realizada com o modelo SWASH que permite aferir que este modelo é adequado para fornecer ao sistema HIDRALERTA novas competências para a previsão dos galgamentos.

## 9. Agradecimentos

Este trabalho é uma contribuição do projeto HIDRALERTA “Sistema de Previsão e Alerta de Inundações em Zonas Costeiras e Portuárias” (PTDC/AAC-AMB/120702/2010), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT). Este trabalho só foi possível graças ao empenho de toda a equipa do projeto e da autoridade e comunidade local que fizeram um esforço enorme para contribuir para este trabalho de validação. O autor agradece a colaboração da Câmara Municipal da Praia da Vitória, Portos dos Açores, Serviço Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores e de todos os cidadãos cujas fotografias, vídeos e relatos permitiram validar os resultados das previsões diárias do sistema. A bolsa de doutoramento de Pedro Poseiro é também financiada pela FCT (SFRH/BD/97193/2013).

## 10. Referências

- APTG. (2004). *Empreitada de 'Reabilitação e reordenamento do Porto da Praia da Vitória'*.
- Booij, N., Ris, R. C., and Holthuijsen, L. H. (1999). 'A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation'. *Journal of Geophysical Research*, 104(C4), 7649.
- Coeveld, E. M., Van Gent, M. R. A., and Pozueta, B. (2005). 'Manual neural network: NN\_Overtopping 2'. *CLASH WP8--Rep., WL Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands*.

- Esteves, R., Valente, A., Costa, M., Reis, F., and Azevedo, E. (2009). 'Dados Direccionais de Agitação Marítima nos Açores (Projecto Climaat-Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos)'. *6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Funchal, Madeira, Portugal*.
- Fortes, C. (2002). 'Nonlinear wave transformations in harbors. A finite element analysis.' IST, Lisbon.
- Fortes, C., Reis, M. T., and Poseiro, P. (2013). 'O projeto HIDRALERTA: Sistema de Previsão e Alerta de Galgamentos em Zonas Costeiras e Portuárias.' *8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, PIANC, ed., 10 e 11 de outubro de 2013, LNEC, Lisboa.
- Lopes, P., Poseiro, P., Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., Garcia, T., Azevedo, E., Rodrigues, M. C., Rodrigues, A., and Sabino, A. (2016). 'Otimização da Arquitetura Computacional do Sistema HIDRALERTA'. *13.º Congresso da Água, LNEC, LNEC*. Lisbon, Portugal, 1–13.
- Lourenço, I., Santos, J. A., Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., Garcia, T., Poseiro, P., and Craveiro, J. (2015). 'Evaluation of wave overtopping consequences for risk assessment. The case study of Praia da Vitória Harbour (Azores, Portugal)'. *SCACR 2015 - International Short Course/Conference on Applied Coastal Research*, 28 de Setembro de 2015 - 1 de Outubro de 2015. Florença, Italia.
- Mase, H. (1989). 'Random Wave Runup Height on Gentle Slope'. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(5), 649–661.
- Persson, A. (2001). *User guide to ECMWF forecast products. ECMWF*.
- Poseiro, P., Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., and Suzuki, T. (2017a). 'Simulation of Wave Overtopping of a Rubble Mound Breakwater using SWASH'. *SCACR 2017 - International Short Course/Conference on Applied Coastal Research*, 3 a 6 de outubro de 2017. Santander, Espanha, 1–13.
- Poseiro, P., Gonçalves, A. B., Reis, M. T., and Fortes, C. J. E. M. (2017b). 'Early warning systems for coastal risk assessment associated with wave overtopping and flooding'. *Journal of Waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering*, Submitted a.
- Poseiro, P., Reis, M. T., Fortes, C. J. E. M., Sabino, A., and Rodrigues, A. (2014a). 'Aplicação do Sistema de Previsão e Alerta de Inundações HIDRALERTA: Caso de Estudo da Costa da Caparica'. *3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 24 a 26 de junho de 2014.
- Poseiro, P., Sabino, A., Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., and Rodrigues, A. (2014b). 'Aplicação do Sistema HIDRALERTA de Previsão e Alerta de Inundações: Caso de Estudo da Praia da Vitória'. *12º Congresso da Água*, Lisboa, 5 a 8 de março de 2014. Centro de Congressos de Lisboa.
- Poseiro, P., Santos, J. A., Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., and Craveiro, J. (2013). 'Aplicação do processo de análise hierárquica (AHP) à análise das consequências de ocorrência de galgamentos. O caso da baía da Praia da Vitória.' *8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, 10 e 11 de outubro de 2015. LNEC, Lisboa, Portugal.
- Pullen, T., Allsop, N. W. H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H., and Van der Meer, J. (2007). *EurOtop: Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual. Kuste*.
- Sabino, A., Poseiro, P., Rodrigues, A., Reis, M. T., Reis, C. J., Reis, R., and Araújo, J. (2017). 'Coastal Risk Forecast System'. *Journal of Geographical Systems*, (April).
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., and Sallenger, A. H. (2006). 'Empirical parameterization of setup, swash, and runup'. *Coastal Engineering*, 53(7), 573–588.
- Teixeira, S. B. (2009). *Demarcação do leito e da margem das águas do mar no litoral sul do Algarve (in Portuguese)*. Faro, Portugal.
- Tolman, H. L. (1989). 'The numerical model WAVEWATCH: a third generation model for hindcasting of wind waves on tides in shelf seas'. *Communications on Hydraulic & Geotechnical Engineering - Delft University of Technology*, 89–2.
- Verhaeghe, H. (2005). 'Neural network prediction of wave overtopping at coastal structures'. *PhD Thesis. University of Gent. Civil Department. ISSN 1377-0950, PhD Thesis. Universiteit Gent, Belgium*.
- WAMDI Group, T. (1988). 'The WAM model - A third generation ocean wave prediction model'. *Journal of Physical Oceanography*.
- Zijlema, M., Stelling, G., and Smit, P. (2011). 'SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters'. *Coastal Engineering*, Elsevier B.V., 58(10), 992–1012.