

## **SISTEMA INTEGRADO PARA A PREVISÃO E ALERTA DE CHEIAS NA PARTE PORTUGUESA DE UM RIO TRANSFRONTEIRIÇO. APLICAÇÃO À ZONA RIBEIRINHA DE PONTE DE LIMA.**

**Rodrigo Maia, Javier Andrade, Mahdi Alemi & Juliana Mendes**

*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)*

### **RESUMO**

A comunicação apresenta um protótipo de um sistema de previsão e alerta precoce de cheias fluviais desenvolvido para a parte portuguesa de um rio transfronteiriço, aplicado à zona ribeirinha de Ponte de Lima - uma área de risco de inundação portuguesa, localizada a jusante da barragem do Alto Lindoso, um grande reservatório de regularização, na bacia internacional do rio Lima.

O sistema é genericamente composto pelos seguintes módulos, que são executados automaticamente, uma vez por dia, na seguinte sequência:

- i) o módulo meteorológico recolhe e manipula os dados de precipitação (dados observados para os dias anteriores e dados de previsão para os dias seguintes);
- ii) o módulo hidrológico compõe e executa um modelo semi-distribuído (HEC-HMS), adaptado por forma a incluir uma função probabilística das descargas da barragem, e que permite prever os caudais afluentes à secção fluvial de análise, correspondente à área de risco de inundação;
- iii) um último módulo, correspondente à modelação hidráulica 2D e mapeamento da área de risco de inundação, desenvolvido no software Iber+ é ativado automaticamente caso, na secção em análise, o valor do caudal máximo previsto para as 24 horas seguintes atinja os limiares de alerta de inundação estabelecidos previamente,

O protótipo desenvolvido integra dados pluviométricos e hidrométricos portugueses da rede SNIRH e dados de precipitação disponibilizados pela agência espanhola MeteoGalicia.

Cada um dos modelos do sistema desenvolvido de previsão foi calibrado independentemente para vários eventos históricos de inundação. Para verificação da performance global do sistema foram realizados testes de fiabilidade para um período contínuo de previsão, os quais mostraram que, se as previsões de precipitação utilizadas forem precisas, a probabilidade de os alertas emitidos pelo sistema estarem corretos é muito elevada.

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto RISC\_ML, contando assim com a colaboração e acompanhamento das autoridades hidrográficas competentes das partes espanhola de portuguesa da bacia do rio Lima (respetivamente, APA - ARH do Norte - Agência Portuguesa do Ambiente e CHMS - Confederación Hidrográfica del Miño-Sil).

**Palavras-chave:** cheias, previsão, alerta precoce.

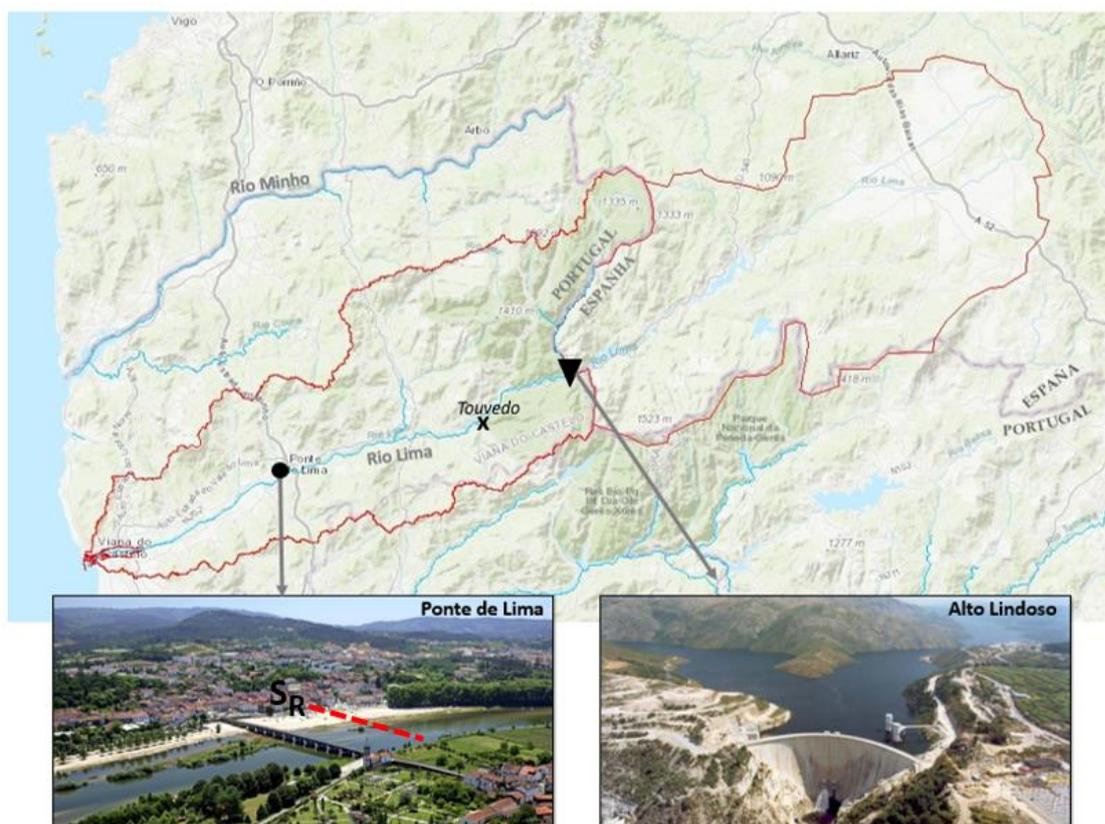
## 1. INTRODUÇÃO

O projeto RISC\_ML (RISC, 2019) tem como metas a definição de medidas conjuntas, entre Portugal e Espanha, para prevenção, preparação, previsão e uma melhor gestão dos fenómenos extremos, tais como secas e cheias, na região hidrográfica internacional do Minho-Lima, a fim de mitigar os seus efeitos. Neste contexto, e atento o sistema de alerta precoce de inundações existente e em desenvolvimento na *Confederación Hidrográfica del Miño-Sil* para a parte espanhola daquelas bacias, pretendeu-se desenvolver um sistema conjunto de previsão contínua de hidrogramas de cheias e de áreas de inundação para toda a região hidrográfica.

Nesta comunicação apresenta-se o protótipo do sistema de alerta desenvolvido para a bacia hidrográfica do rio Lima, que se baseia na execução sequencial automática de modelos desenvolvidos para previsão de inundações na zona ribeirinha da cidade de Ponte de Lima, que corresponde a uma das áreas de risco potencial de inundação definidas no Plano de Gestão de Risco de Inundação da Região Hidrográfica do Minho e Lima (RH1) (APA, 2019).

A área de estudo situa-se na parte portuguesa da bacia internacional do rio Lima, com uma área total de aproximadamente 2370 km<sup>2</sup> (figura 1).

**Figura 1: Mapa com a delimitação da bacia internacional do rio Lima (a vermelho) e a identificação dos locais mais relevantes para o estudo: a cidade de Ponte de Lima, a jusante (com identificação da secção de referência S<sub>R</sub>), e a albufeira do Alto Lindoso, a montante.**



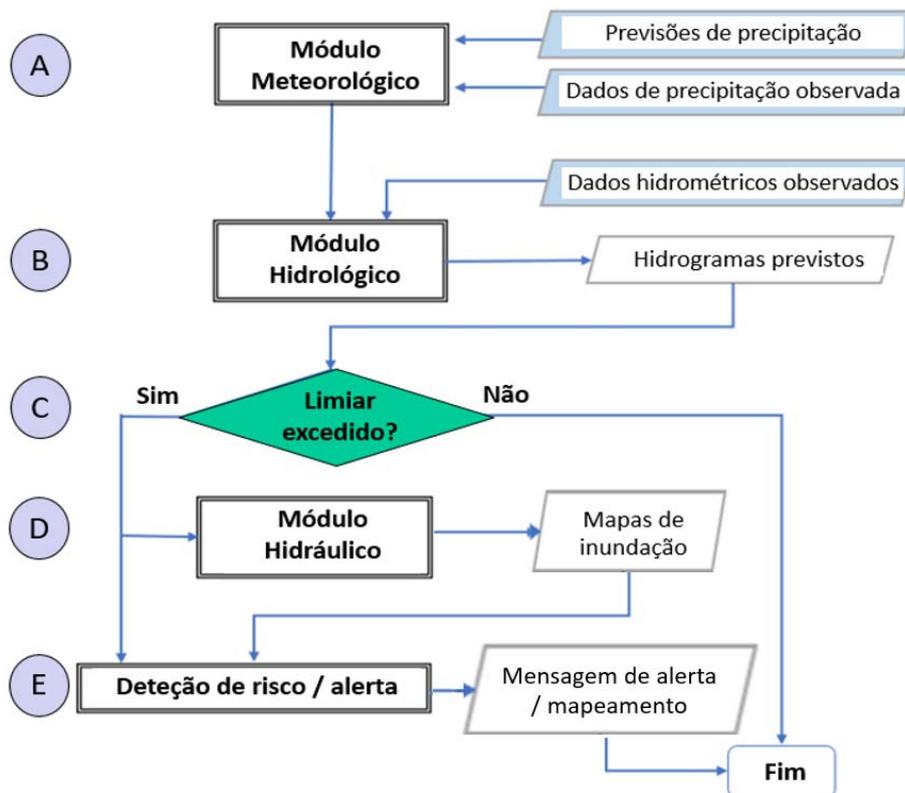
A cerca de 40 km a montante de Ponte de Lima, na secção do rio Lima que faz fronteira com os dois países, localiza-se a barragem portuguesa do Alto Lindoso, cuja albufeira é a única da bacia com capacidade de armazenamento suficiente para regularização do escoamento de modo a minimizar o efeito de inundações a jusante. A cerca de 17 km a jusante da referida barragem situa-se a barragem do Touvedo, cuja estação de monitorização hidrométrica foi essencial para calibrar o modelo hidrológico.

## 2. MÉTODOS E DADOS

Na figura 2 apresenta-se o fluxograma da metodologia geral adotada para o desenvolvimento do sistema de alerta precoce de inundação, integrando os 3 módulos constituintes com a sequência da sua operação e seus principais dados de entrada e resultados. Com base nesta estrutura, foi desenvolvido um protótipo para a bacia hidrográfica do rio Lima, com definição de limiares de alerta para a secção de Ponte de Lima, cuja sequência se descreve seguidamente:

- A. *Módulo meteorológico*: recolhe, integra e manipula os dados de precipitação (dados observados para os 4 dias anteriores e dados de previsão para 4 os dias seguintes);
- B. *Módulo Hidrológico*: executa o modelo hidrológico, que fornece hidrogramas de cheias nos pontos de controlo definidos (nomeadamente em Alto Lindoso, Touvedo e Ponte de Lima), tendo em conta o regime natural e a curva de probabilidades de descarga da barragem de Alto Lindoso, definida com base nos registos históricos;
- C. *Teste dos limiares de inundação*: compara o valor máximo do hidrograma previsto pelo modelo hidrológico em Ponte de Lima com os limiares de inundação pré-estabelecidos (Quadro 1) com base nos níveis de cheias definidos na secção de Ponte de Lima e nos correspondentes caudais, obtidos e validados através de modelação hidráulica;
- D. *Módulo Hidráulico*: no caso do caudal máximo previsto pelo modelo hidrológico atingir o limiar mínimo de cheia (pré-alerta), é executado o modelo hidráulico para a zona ribeirinha de Ponte Lima, que fornece o mapa de inundação correspondente;
- E. *Deteção de risco / alerta*: produz uma mensagem de alerta para a entidade responsável pela utilização do sistema, acompanhada dos hidrogramas previstos para as várias secções de controlo da bacia – neste caso para as secções do Alto Lindoso, Touvedo e Ponte de Lima - e do correspondente mapa de inundação previsto para a zona ribeirinha de Ponte Lima. A entidade responsável pela utilização do sistema deverá depois analisar e validar a informação fornecida pelo sistema de alerta, e caso confirme os alertas previstos, fazer a comunicação às entidades competentes.

Figura 2: Fluxograma da metodologia geral para o desenvolvimento do sistema de alerta precoce de inundações.



Quadro 1: Limiares de inundação e de alerta definidos para a secção intermédia do areal de Ponte de Lima (secção de referência do estudo: S<sub>R</sub> - ver figura 1).

Tipo de alerta	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Cota do nível de água aproximado no areal (m)	Efeito físico
Pré-alerta	300	5,0	Início da inundação do areal
Alerta	700	5,8	Metade do areal inundado
Emergência	2000	7,9	Início da inundação do arruamento marginal

Para alimentação do processamento do protótipo são utilizados os seguintes tipos de dados:

- a) dados históricos observados de precipitação em estações pluviométricas da rede de monitorização do SINIRH (SNIRH, 2019), para a parte portuguesa da bacia, e da agência espanhola MeteoGalicia (MeteoGalicia, 2019b), para a espanhola;
- b) dados de previsões de precipitação do modelo WRF, disponibilizados pela agência MeteoGalicia, com passo temporal de 1 hora e alcance de 96 horas, e com resolução espacial de 4km (MeteoGalicia, 2019a);
- c) dados observados em estações hidrométricas da rede de monitorização SNIRH (caudais, níveis hidrométricos e volumes).

O sistema desenvolvido é executado automaticamente, através de uma rotina *Python*, no início de cada dia, após a disponibilização online das previsões de precipitação. Embora o sistema integre previsões de precipitação com alcance de 96 horas, como a frequência de cálculo é diária, apenas se torna necessária a previsão de eventos e emissão de alertas correspondentes para as 24 horas seguintes.

O modelo hidrológico que integra o sistema foi desenvolvido com o software HEC-HMS, de forma semi-distribuída, tendo por base os modelos digitais do terreno (MDT) com uma resolução de 25 km, disponibilizados: i) pela APA no âmbito do projeto RISC\_ML, para a parte portuguesa da bacia e; ii) pela base de dados Copernicus (EU, 2019), para a parte espanhola. De forma a ajustar ao longo do tempo os parâmetros do modelo às características hidrológicas existentes, a modelação hidrológica é executada com as 96 horas anteriores de precipitação observada na bacia.

O modelo hidráulico do troço fluvial de Ponte de Lima integrado no sistema foi desenvolvido com o software Iber+ (bidimensional) utilizando MDT (base *LiDAR*) com resolução de 4km, disponibilizado pelo município.

Cada um dos modelos do sistema de previsão desenvolvido foi calibrado independentemente para vários eventos históricos de inundação.

Para verificação do comportamento global do sistema foram realizados testes de fiabilidade para um período contínuo de previsão de 30 dias, correspondente ao período de 1 a 30 de dezembro de 2019, em que foi seguida, quase em tempo real, a observação de cheias.

Os testes de fiabilidade consistiram em avaliar se, em cada dia, o alerta emitido pelo sistema para as próximas 24 horas, correspondeu ao nível de alerta obtido através dos caudais reais<sup>1</sup> em Ponte de Lima.

Por outro lado, para avaliar o sistema sem os fatores de incerteza associados às previsões de precipitação e às previsões das descargas da albufeira do Alto Lindoso, foi também, à

---

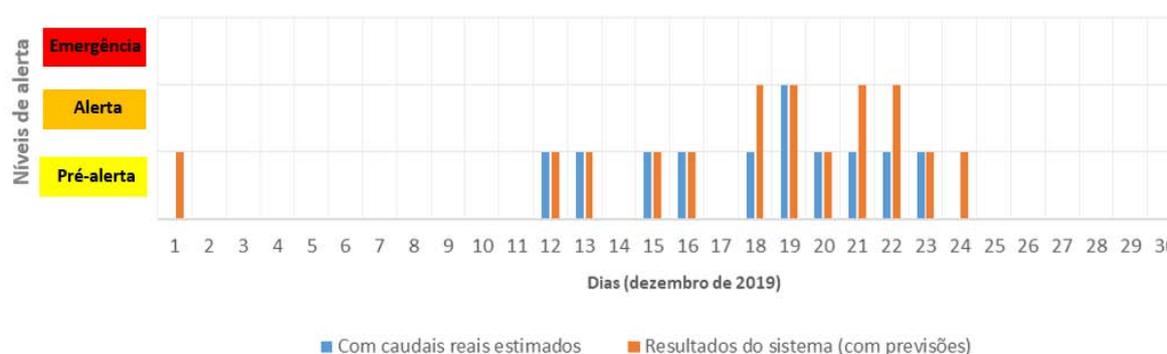
<sup>1</sup> Valores estimados com base nos registos dos níveis de água na estação hidrométrica de Ponte de Lima (São João), através de curva de vazão obtida por modelação hidráulica.

posteriori, realizada a simulação hidrológica para esse mesmo período de 30 dias com os dados observados de precipitação e as descargas reais da albufeira como entradas do modelo.

### 3. RESULTADOS

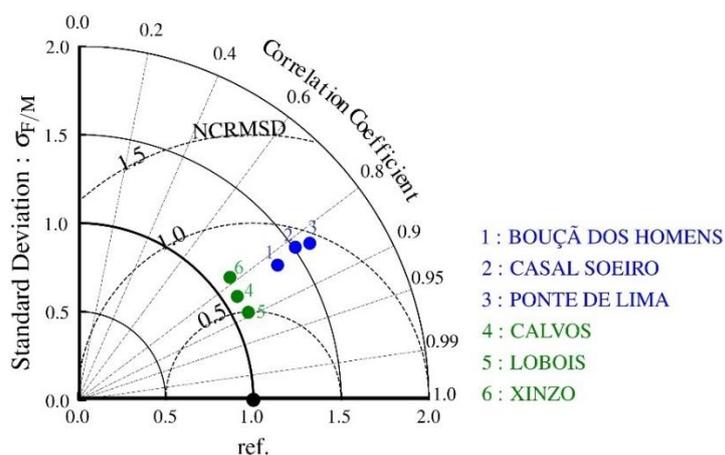
Na Figura 3 apresenta-se, para cada dia do período de 1 a 30 de dezembro de 2019, a comparação dos alertas de inundação emitidos pelo sistema de previsão desenvolvido neste estudo (conforme descrito na secção 2.) com os alertas correspondentes determinados através dos caudais reais em Ponte de Lima.

**Figura 3: Níveis de alertas de inundação emitidos pelo sistema de previsão desenvolvido (a laranja) e os correspondentes determinados através dos caudais reais em Ponte de Lima (a azul), no período de 1 a 30 de dezembro de 2019.**



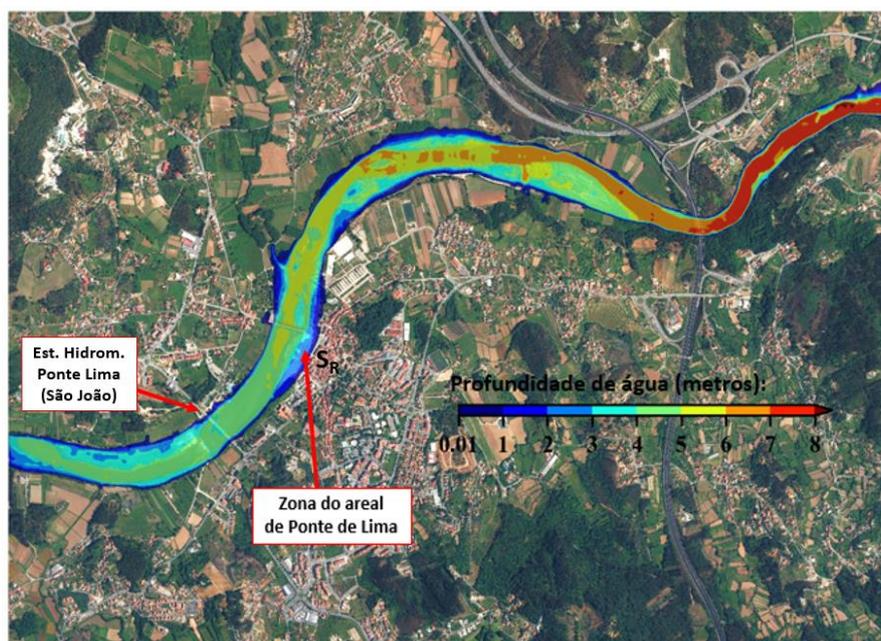
Como se pode observar na Figura 3, no período analisado, o sistema desenvolvido permitiu sempre prever e detetar as situações de cheia realmente ocorridas, tendo apenas conduzido a um falso pré-alerta em período isolado. No período de cheias (12 a 24 de dezembro), à exceção do último dia (já com os níveis de inundação a diminuírem), os dias em situação de alerta de cheia sinalizados pelos dois processos coincidiram sempre, com as situações de alerta de cheia a serem sobrestimadas pelo sistema proposto em 3 dias (em que situação real seria de pré-alerta). Este facto estará, em primeira análise, em acordo com a sobrestimação geral dos valores de precipitação obtidos pelo modelo numérico de previsão meteorológico, evidenciada pelo diagrama de Taylor da figura 4.

**Figura 4: Diagrama de Taylor comparando os valores das previsões de precipitação diárias na bacia do rio Lima e os valores observados correspondentes em 6 estações pluviométricas seleccionadas na bacia (3 na parte portuguesa da bacia, a azul, e 3 na parte espanhola, a verde), para o período de 1/10/2015 - 31/12/2019 (F corresponde aos dados de previsão e M corresponde aos dados observados; NCRMDS= *normalized centered root-mean-square difference*).**



Na figura 5 apresenta-se, como exemplo, o mapa de inundação previsto pelo sistema para as 20:00h do dia 19 de dezembro de 2019, correspondente ao caudal máximo previsto para esse dia. De acordo com essa previsão era expectável que grande parte do areal de Ponte de Lima fosse inundado, não chegando, porém, a água ao arruamento marginal adjacente. De facto, na realidade, nesse dia as notícias fizeram referências a inundações provocadas pelo rio Lima, decorrentes da depressão Elsa, sem destaque especial às áreas afetadas em Ponte de Lima, o que seria de esperar se a água tivesse atingido o referido arruamento marginal. Por outro lado, analisando os níveis de água registados na estação hidrométrica de Ponte de Lima (São João) - localizada a cerca de 600 m a jusante da secção de referência  $S_R$  (ver figura 5) - verificou-se que o valor máximo do nível de água ocorrido nesse dia correspondeu efetivamente à inundação de mais de metade do areal (correspondendo à situação de alerta – ver quadro 1).

**Figura 5: Mapa de inundação previsto pelo sistema desenvolvido para as 20:00h do dia 19/18/2019.**



Na figura 6 apresenta-se uma comparação idêntica à referenciada na Figura 3, mas em que, neste caso, os alertas de inundação emitidos pelo sistema desenvolvido foram obtidos considerando os dados observados de precipitação e as descargas reais da albufeira do Alto Lindoso como entradas do modelo hidrológico integrado. Como referido anteriormente, esta comparação teve como objetivo avaliar o sistema sem os fatores de incerteza associados às previsões de precipitação e das descargas da referida albufeira.

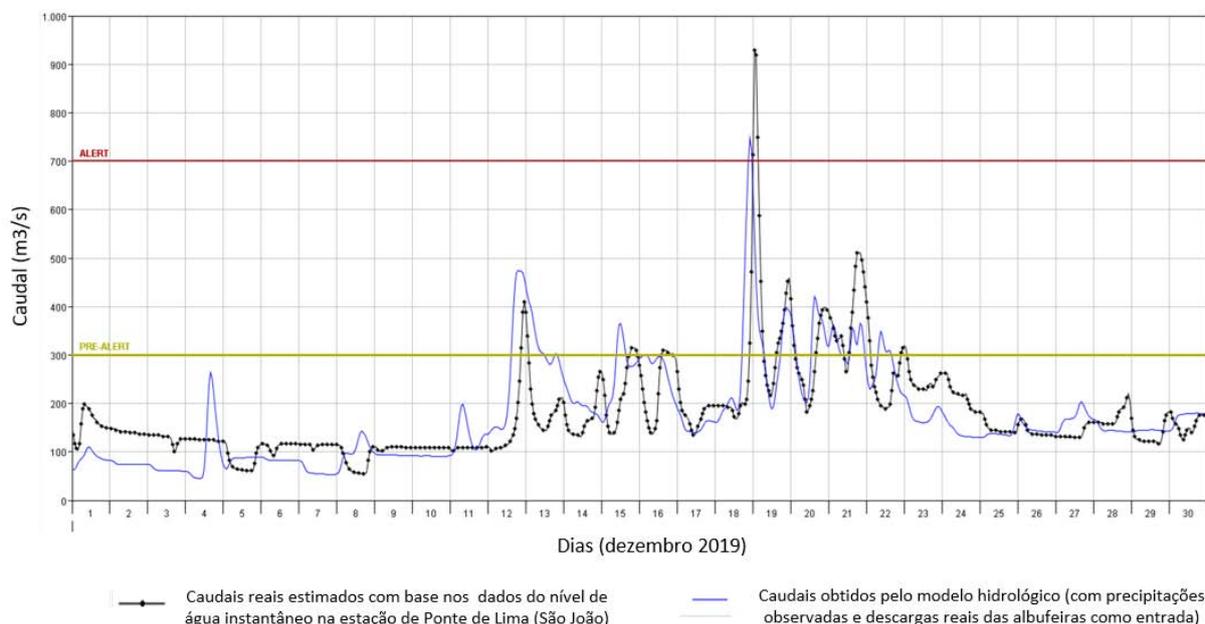
**Figura 6: Níveis de alertas de inundação determinados pelo sistema de previsão desenvolvido com os dados observados de precipitação e as descargas reais da albufeira como entradas do modelo hidrológico integrado (a amarelo), e os correspondentes determinados através dos caudais reais em Ponte de Lima (a azul), no período de 1 a 30 de dezembro de 2019.**



Da análise da figura 6 verifica-se que, nesse caso, o sistema apenas não sinalizou o último dia do período de situações reais de pré-alerta de cheia e a situação de nível de alerta foi antecipada um dia pelo sistema.

Como se pode constatar através da figura 7, que exhibe os caudais de base utilizados para a determinação dos níveis de alerta apresentados na figura 6, a antecipação da situação de alerta dada pelo sistema no dia 18 deveu-se a um pequeno desfasamento temporal (cerca de 2 horas) no pico do hidrograma de cheia obtido pelo modelo hidrológico. Não obstante, a figura 7 mostra que o modelo hidrológico integrado no sistema apresentou resultados bastante satisfatórios para o período analisado, o que é também confirmado pelo valor de 0,35 do coeficiente de Nash-Sutcliffe obtido para este período de simulação.

**Figura 7: Caudais obtidos pelo modelo hidrológico integrado no sistema com os dados observados de precipitação e as descargas reais das albufeiras como entradas (a azul), e caudais reais em Ponte de Lima (a preto), no período de 1 a 30 de dezembro de 2019.**



#### 4. CONCLUSÕES

No estudo apresentado foi desenvolvido um protótipo do sistema de previsão e alerta de inundações para a bacia hidrográfica do rio Lima, com definição de limiares de alerta para a secção de Ponte de Lima. Genericamente, o sistema de previsão consiste na execução sequencial automática (i) de um modelo hidrológico da bacia do rio Lima, que integra dados observados de precipitação nos dias anteriores, previsões de precipitação de alta resolução para os dias seguintes e previsões de descargas da albufeira do Alto Lindoso, e (ii) de um modelo de simulação hidráulica aplicado à zona ribeirinha de Ponte de Lima, que é executado no caso dos caudais previstos pelo modelo hidrológico nesse troço atingirem os limiares de inundação pré-estabelecidos.

Nesta comunicação mostrou-se que, de uma forma geral, o sistema é útil e eficiente na deteção de situações de risco de inundação, tanto na emissão atempada de alertas como na delimitação das áreas de inundação. Isto deve-se essencialmente ao bom desempenho dos modelos (hidrológico e hidráulico) integrados no sistema, que demonstraram resultados bastante satisfatórios para o período analisado. No entanto, dada a limitada extensão do período analisado, para validação mais rigorosa do sistema, será de alargar o período de análise a uma série de vários anos e com situações de cheia.

Os testes de fiabilidade realizados mostraram que, se as previsões de precipitação utilizadas forem relativamente precisas, a probabilidade dos alertas emitidos pelo sistema serem corretos e adequados é bastante elevada.

Dado o âmbito em que foi desenvolvido este trabalho, integrado projeto RISC\_ML, contando com a colaboração, acompanhamento e validação das autoridades hidrográficas competentes das partes espanhola e portuguesa da bacia do rio Lima (respetivamente, APA - ARH do Norte - Agência Portuguesa do Ambiente e CHMS - Confederación Hidrográfica del Miño-Sil), o protótipo desenvolvido revela potencial para ser estendido (e/ou adequado) de forma a integrar um sistema conjunto de previsão de cheias para toda a bacia hidrográfica internacional.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APA (2019): “Plano de Gestão de Riscos de Inundações. Avaliação preliminar do risco de inundações. Região Hidrográfica do Minho e Lima – RH1”, [https://apambiente.pt/zdata/Políticas/Aqua/PlaneamentoGestao/PGRI/2022-2027/APRI\\_ParticipacaoPublica/1\\_Fase/Relatorios/PGRI\\_2\\_APRI\\_RH1\\_Final.pdf](https://apambiente.pt/zdata/Políticas/Aqua/PlaneamentoGestao/PGRI/2022-2027/APRI_ParticipacaoPublica/1_Fase/Relatorios/PGRI_2_APRI_RH1_Final.pdf). Consultado em novembro de 2019.

EU (2019): Copernicus – Land Monitoring Service, <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem>. Consultado em setembro de 2019

SNIRH, (2019): Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. Dados de base – monitorização, <https://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=2&idItem=1>. Consultado em novembro 2019.

Meteogalicia, (2019)a: *Meteogalicia - Modelos numéricos - Servidor Thredds* [http://mandeo.meteogalicia.es/thredds/catalog/modelos/WRF\\_HIST/d03/catalog.html](http://mandeo.meteogalicia.es/thredds/catalog/modelos/WRF_HIST/d03/catalog.html). Consultado em novembro 2019.

Meteogalicia, (2019)b: *Meteogalicia - Observación - Rede meteorológica*, [https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacions/estacions.action?request\\_locale=gl](https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacions/estacions.action?request_locale=gl). Consultado em novembro 2019.

RISC\_ML (2019): *Prevenção de Riscos de Inundações e Secas na bacia internacional do Minho-Lima*. <http://risc-ml.eu>. Consultado em novembro de 2019.