

Modelação hidráulica de redes de drenagem: experiência na Águas e Energia do Porto

Paula Brandão^a, Joana Brandão^a

^a Águas e Energia do Porto, rua Barão de Nova Sintra, 285, Porto, Portugal

RESUMO

As redes de drenagem, embora essenciais, passam frequentemente despercebidas à população. Na cidade do Porto, cuja rede tem origens que remontam ao século XIV, foi implementado, no final do século XIX, um sistema de drenagem separativo autónomo para águas residuais domésticas, que, em 2014, apresentava uma taxa de cobertura de 98,5%. Sensivelmente um século após essa adoção, a Águas e Energia do Porto (AEdP) iniciou a modernização da gestão das infraestruturas, com a migração do cadastro das redes de abastecimento de água (AA) e de águas residuais domésticas (ARD) para uma plataforma de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Já no século XXI, a atuação da empresa foi ampliada à gestão das águas pluviais (AP), apoiada nas linhas de água, e à monitorização da qualidade das praias. Mais recentemente, integrou também a vertente energética, consolidando uma abordagem integrada e sustentável do ciclo urbano da água.

A modelação das redes de drenagem, iniciada em 2024, representa um novo marco neste percurso de modernização. Esta ferramenta permite compreender com maior rigor os fenómenos de escoamento, reforçar a fiabilidade dos dados, simular cenários para otimizar a gestão, apoiar a expansão da rede em consonância com os planos da cidade, avaliar o desempenho das infraestruturas e antecipar os impactos de alterações nas bacias de drenagem.

Constitui ainda um instrumento estratégico de apoio à gestão de ativos, facilitando a tomada de decisões a diferentes níveis – estratégico, tático e operacional – e contribuindo para uma resposta mais eficaz aos desafios do quotidiano.

Este artigo apresenta o trabalho desenvolvido pela AEdP na área da modelação hidráulica das redes de drenagem, evidenciando os desafios enfrentados e os benefícios alcançados com a sua aplicação.

Palavras-Chave: Modelação, Drenagem, SWMM, Ativos, Planeamento

doi: 10.22181/aer.2025.0302

* Autor para correspondência
E-mail: paula.brandao@aguasdopporto.pt

Hydraulic modelling of drainage networks: experience of Águas e Energia do Porto

Paula Brandão^a, Joana Brandão^a

^a Águas e Energia do Porto, rua Barão de Nova Sintra, 285, Porto, Portugal

ABSTRACT

Drainage networks, although essential, often go unnoticed by the public. In the city of Porto, where the drainage system dates to the 14th century, a separate and autonomous system for domestic wastewater was adopted in the late 19th century. By 2014, this system had achieved a coverage rate of 98.5%.

A century after its adoption, Águas e Energia do Porto (AEdP) began modernising infrastructure management by migrating the records of the water supply (WS) and domestic wastewater (DWW) networks to a Geographic Information System (GIS) platform.

In the 21st century, the company expanded its scope to include stormwater (SW) management, supported by natural watercourses, as well as bathing water quality monitoring. More recently, it has also integrated the energy component, consolidating an integrated and sustainable approach to the urban water cycle.

The hydraulic modelling of drainage networks, initiated in 2024, represents a major milestone in this modernisation process. This tool enables a more accurate understanding of flow dynamics, enhances data reliability, allows for scenario simulations to optimise management, supports network expansion in line with urban planning, assesses infrastructure performance, and anticipates the impacts of changes in drainage catchments.

It also serves as a strategic tool for asset management, supporting decision-making at strategic, tactical, and operational levels, and contributing to a more effective response to day-to-day challenges.

This article presents the work conducted by AEdP in the field of hydraulic modelling of drainage networks, highlighting the challenges faced and the benefits achieved through its implementation.

Keywords: Modelling, Drainage, SWMM, Assets, Planning

doi: 10.22181/aer.2025.0302

* Corresponding author
E-mail: paula.brandao@aguasdporto.pt

1 Introdução

A gestão eficiente das redes de drenagem urbana é fundamental para assegurar a qualidade de vida e a segurança das populações. A Águas e Energia do Porto (AEdP) gere cerca de 1 312 km de redes do tipo separativo, distribuídas entre águas residuais domésticas (ARD) e águas pluviais (AP).

A rede de ARD é constituída por 571 km de coletores, 12 tanques Shone (TS), 30 ejectores Shone (EJ), 21 estações elevatórias (EE) e duas Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) – Freixo e Sobreiras. Já a rede de AP integra cerca de 656 km de coletores, 9 EE e 20 561 órgãos de recolha (sumidouros, sarjetas e grelhas), aos quais se somam 15 ribeiras e 4 rios, com uma extensão total de 85 km.

A necessidade de modernizar os processos de gestão foi identificada em 2023 e concretizada no início de 2024, com o objetivo de reforçar a eficiência e a resiliência do sistema, face à crescente complexidade urbana e aos impactos das alterações climáticas.

Com o apoio do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), foi definida uma estratégia multidisciplinar, baseada na modelação hidráulica computacional e na capacitação técnica interna. O software selecionado foi o SWMM (Storm Water Management Model), amplamente utilizado a nível internacional e de acesso gratuito, que permite simular o comportamento hidráulico da rede em diferentes cenários (Rossman, 2010; Rossman, 2015; U.S. EPA, 2024).

A modelação tornou-se um instrumento central no apoio à decisão, permitindo otimizar a operação, planejar a expansão da rede e antecipar riscos de inundações e alterações no uso do solo.

2 Metodologia

Foram desenvolvidos dois modelos hidráulicos distintos, para as redes de ARD e de AP, ajustados às suas especificidades. Ambos incluíram caracterização de infraestruturas, identificação de pontos críticos, correção de incongruências, simulação de cenários e calibração preliminar.

O modelo de ARD considerou volumes faturados e rejeitados por troço (coletores em grés), padrões de consumo, projeções populacionais e acionamento dos órgãos da rede, com base em dimensionamento convencional. Foram integrados EJ, TS e EE. As medições de caudal à entrada da ETAR, na área de influência da zona modelada, permitiram validar a representação da rede, estimar parâmetros hidráulicos e apoiar a calibração.

O modelo de AP centrou-se nas bacias de drenagem, considerando área, declive, cobertura do solo e geometrias de coletores (seções retangulares em alvenaria e circulares em betão). Incluiu dados de precipitação (IPMA), níveis do mar e interação com ribeiras e o oceano Atlântico, incluindo o efeito das marés nos extravasamentos. A parametrização revelou coerência com os registos históricos de inundações, reforçando a fiabilidade das previsões.

3 Caso de Estudo

A morfologia da cidade do Porto favorece o escoamento gravítico, originando bacias autónomas cuja drenagem se dirige ao rio Douro ou ao Oceano Atlântico. Incidindo na frente marítima (Figura 1), o estudo passou de três bacias (duas ARD e uma AP) para seis, implantadas em zonas de elevada solicitação hidráulica, com elevada urbanização, impermeabilização e picos sazonais de afluência.

Modelaram-se quatro bacias de ARD do subsistema Oeste, afluentes à ETAR de Sobreiras - O9 e O11, a cota baixa, suportadas por dois EJ, e O10 e O12, a cotas mais elevadas, convergentes para dois TS -, e duas bacias de AP (Ervilheira e Atlântico-Molhe), com descarga direta ao mar.

Estas bacias totalizam 3,2% da área ARD e 1,7% da área AP do Município.



Figura 1. Redes de Drenagem do Município do Porto e Bacias a modelar (ARD – vermelho; AP – roxo; Ribeiras - verde)

Os EJ e TS encontram-se ilustrados nas figuras seguintes: o EJ (*Figura 2*), eleva as águas residuais por ar comprimido, e o TS (*Figura 3*) funciona por diferença de nível e sifonagem. Alguns TS foram convertidos em câmaras de transição (CT), mantendo apenas a função de regularização de nível. Estes dispositivos integram a rede em alta, ligada por intercetores em pressão que conduzem os caudais às ETAR do Freixo e de Sobreiras, excetuando o subsistema Norte (inclui a bacia do Hospital de S. João), que drena gravitacionalmente para a ETAR de Sobreiras.



Figura 2. Ejectores Shone (EJ)



Figura 3. Tanque Shone (TS)

Em 2023, o subsistema Oeste registou um volume médio de água faturada de 85 L/s e um caudal afluente à ETAR de 110 L/s. A avaliação baseou-se na comparação entre caudais simulados e medidos à entrada da ETAR, adotando-se um coeficiente de afluência de 0,90, definido empiricamente com base em referências setoriais, dada a ausência de medições contínuas na rede em baixa. A análise incluiu a verificação da coerência dos caudais nos nós, padrões horários, afluências indevidas (AI) e registos operacionais das EE, EJ e zonas de medição da rede de AA.

A modelação da rede de ARD incluiu 410 troços da rede em baixa e a rede em alta, abrangendo o Intercetor Atlântico (com cerca de 8 km em ferro fundido dúctil, operando sob pressão), ramais e órgãos de transição.

As bacias de AP totalizam 73 hectares (ha), com 1 300 m de frente marítima. A área inclui 17 ha de edificado, 3 ha de logradouros, 10 ha de eixos viários e 1,5 ha de espaços verdes, sendo o restante território com potencial de urbanização. Foram definidas 421 sub-bacias, agregadas em 236 bacias de drenagem, com 2,6% de declive médio e 84% de impermeabilização.

3.1 Discussão dos Resultados

A modelação exigiu tratamento e validação rigorosa da informação disponível, com vista a garantir a consistência dos dados e a fiabilidade da representação hidráulica. Foram eliminadas redundâncias (dados duplicados ou sobrepostos) e corrigidas incongruências em coletores e nós.

3.1.1 Modelo da rede ARD

Os dados disponíveis para as bacias Oeste 9 a 12 apresentaram qualidade suficiente, com traçados e perfis longitudinais coerentes com escoamento gravítico. No entanto, registaram-se lacunas altimétricas e descontinuidades, decorrentes da associação incorreta de geometrias em SIG (e.g., ramais em vez de coletores principais), o que comprometeu a continuidade hidráulica.

A ausência de medições locais de caudal dificultou a calibração. Para mitigar esta limitação, foi incluída a rede em alta, utilizando os dados da ETAR como referência para parametrização.

Foram simulados quatro cenários:

- **Situação atual (2023)**, refletindo as condições hidráulicas atuais;
- **Cenário de projeto (2023) e projeção futura (2070)**, considerando o crescimento populacional e as afluências indevidas (AI), estimadas segundo o DR n.º 23/95, para um diâmetro médio de 200 mm;
- **Nova urbanização na Av. Nun'Álvares**, avaliada para os horizontes de 2023 e 2070 com diferentes previsões de caudal;
- **Estação Elevatória de AP – DIP Ervilheira**, concebida para o desvio do caudal da Ribeira da Ervilheira para a rede de ARD, durante a época balnear.

Os padrões horários de consumo foram ajustados por órgão do sistema (EJ, EE), com base em registos da ETAR e dados da rede de AA em períodos de estiagem.

As simulações realizadas em SWMM analisaram velocidades e relações h/D. Verificaram-se troços com velocidades reduzidas, favoráveis à deposição e risco de obstrução, exigindo manutenção preventiva.

A Figura 4 apresenta a capacidade de escoamento (h/D) na situação atual (2023) e cenários 2023 e 2070, com codificação por classe de desempenho hidráulico (Link Max Capacity): ● $h/D < 0,5$ – risco de deposição de sedimentos; ● $0,5 \leq h/D < 0,8$ – regime operacional adequado; ● $0,8 \leq h/D < 1,0$ – próximo ao limite de capacidade; ● $h/D \geq 1,0$ – sobrecarga e risco de inundação.

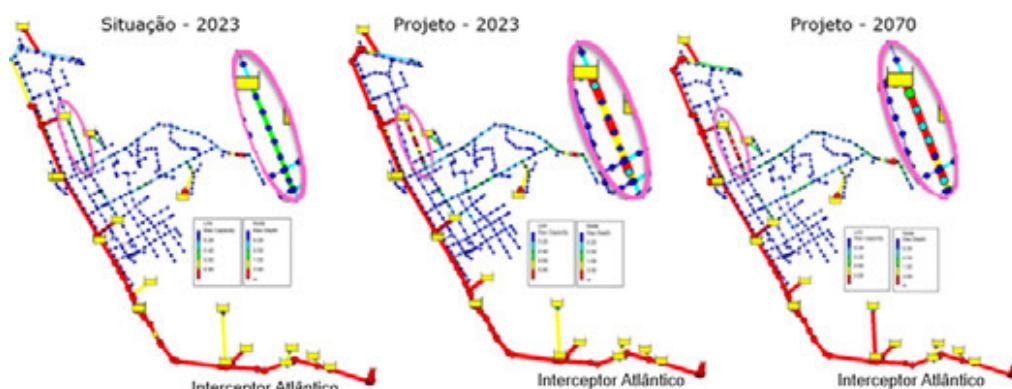


Figura 4. Capacidade hidráulica (h/D) e profundidade máxima simulada na situação atual 2023 e cenários de 2023 e 2070. Destaque - Intercetor Atlântico e coletor afluente ao TS do Funchal

A comparação entre os cenários de 2023 e 2070 evidencia troços gravíticos da rede em baixa com valores de h/D próximos ou superiores ao admissível, sinalizando risco crescente de sobrecarga e necessidade de intervenção. Destaca-se, em particular, o ramo afluente ao TS do Funchal, localizado na Rua Marechal Saldanha. A maior extensão em sobrecarga verifica-se no Intercetor Atlântico, que acompanha a frente marítima e fluvial até à ETAR de Sobreiras. Esta infraestrutura foi projetada para operar sob pressão, com diâmetros entre ø500 e ø700 mm em ferro fundido dúctil integral, equipada com ventosas e descargas para otimização do desempenho hidráulico.

A Figura 5 compara a situação hidráulica atual (2023) com o impacto previsto da urbanização Avenida Nun'Álvares Pereira, que se desenvolve entre a Avenida da Boavista e a Praça do Império. A análise baseia-se no cenário de projeto para 2023 e evidencia alterações nos caudais afluentes aos tanques Shone do Funchal, Padrão e Diu. Os caudais foram estimados com base no plano de pormenor e serão ajustados futuramente com o dimensionamento das redes prediais associadas.

A criação de novos eixos viários no âmbito da urbanização permite reformular a rede de drenagem, viabilizando por exemplo, a eliminação de uma EE e dois EJ na rede em baixa.

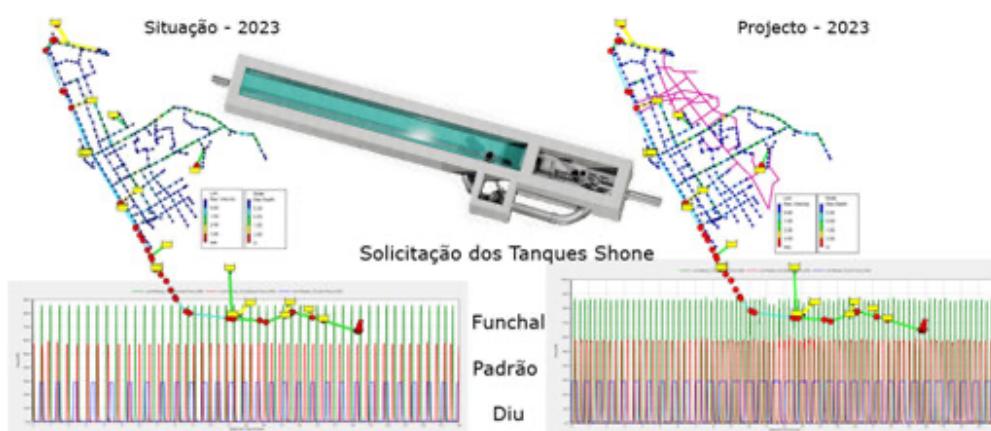


Figura 5. Comparação entre a situação atual (2023) e o cenário de urbanização da Av. Nun'Álvares Pereira, avaliando o impacto nos caudais afluentes aos TS do Funchal, Padrão e Diu

3.1.2 Modelo da rede AP e de linha de Água Natural

A modelação das bacias de AP afluentes à Ribeira da Ervilheira foi condicionada pela fraca qualidade dos dados cadastrais, com descontinuidades, ausência de cotas e baixa caracterização física, reflexo da sua integração tardia na gestão da AEdP (desde 2006).

Para melhorar o modelo, procederam-se a verificações adicionais e à revisão dos traçados com base na topografia. A caracterização de troços a céu aberto e zonas de alagamento exige ainda levantamentos de campo específicos.

O caudal da nascente da Ribeira da Ervilheira foi estimado com base nos acionamentos do sistema elevatório (DIP) instalado na foz da linha de água. A análise considerou diferentes condições hidrológicas, incluindo estiagem, precipitação intensa e operação sazonal (época balnear).

Entre 2022 e 2024, foram modelados seis eventos reais, com e sem precipitação, para caracterizar o comportamento da bacia em diferentes regimes hidrológicos. Para esses cenários, a calibração foi apoiada na introdução de um caudal de base atribuído à nascente no modelo SWMM, definido na secção [INFLOWS] como série temporal variável. Esta abordagem permitiu representar a variabilidade sazonal do escoamento de base.

A ausência de dados pluviométricos com resolução inferior a 5 minutos constituiu uma limitação à modelação. Para mitigar este constrangimento, recorreu-se a uma estação da

plataforma Weather Underground, cuja série temporal, com resolução de 5 minutos, se revelou compatível com os requisitos da modelação urbana. A consistência verificada com os dados do IPMA validou a sua aplicação ao local de estudo.

Foram analisados os seguintes cenários:

- Eventos com e sem precipitação, registados entre 2022 e 2024 (exemplo ilustrado no Gráfico 1.);
- Precipitações de projeto com períodos de retorno de 5, 10 e 20 anos (T05, T10, T20), com duração de 15 minutos.

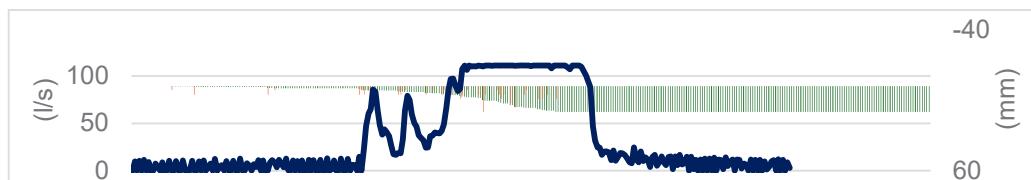


Gráfico 1. Evento P2 (13 e 14/09/2022) – Caudal (L/s) (azul) e Precipitação (mm) (verde)

A modelação hidráulica permitiu estimar os valores máximos de inundação e de velocidade, com base em simulações para cenários reais e de projeto. Os resultados, ilustrados na Figura 6, foram sobrepostos ao Ortofotomap, à rede modelada, ao perfil hidráulico da Ribeira da Ervilheira e à planta com os registos de inundações reportados pela Proteção Civil, proporcionando uma leitura integrada dos pontos críticos da bacia e da sua relação com a topografia local.

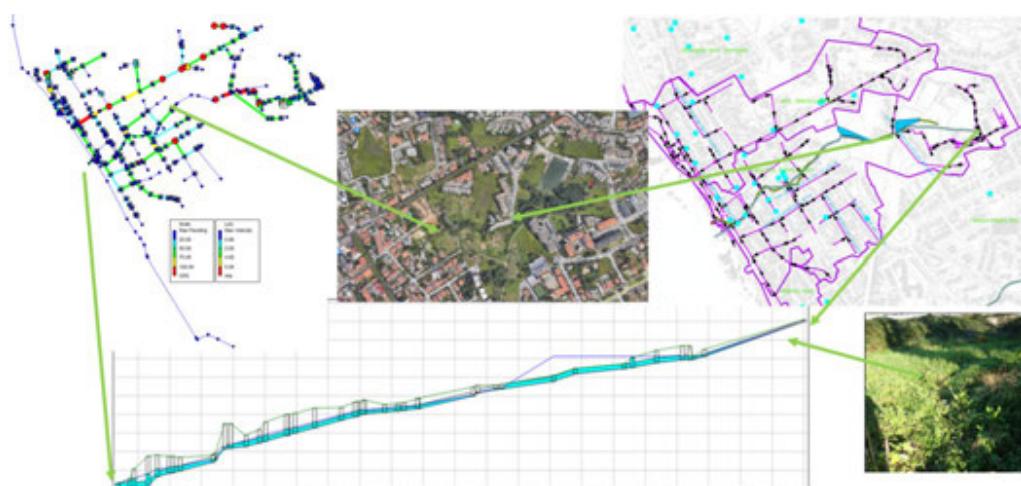


Figura 6. Modelação da rede e da linha de água da Ribeira da Ervilheira, com análise espacial de registos de inundaçao urbana da Proteção Civil. Parâmetros - h/max, v/max

O perfil hidráulico da Ribeira da Ervilheira (Figura 6) evidencia extravasamentos, escoamento em carga e influência das marés (Instituto Hidrográfico, Porto de Leixões, 2020_2025). Esta foi simulada por nó de saída (*outfalls*) com condições-limite variáveis, associadas a curvas de maré ajustadas ao desfasamento face ao porto de Leixões. Esta configuração permitiu avaliar o impacto das oscilações do nível do mar na descarga da rede, simulando refluxo, extravasamento e pressurização em zonas de cota baixa. A elevação piezométrica induzida pela maré é visível no canto inferior esquerdo do perfil.

Os resultados da modelação, apresentados nas Figuras 6 e 7, representam a inundação máxima e a velocidade máxima, de acordo com as seguintes escalas de cores:

- Nó – Inundação Máxima (m^3/s) - ● Azul-escuro: $\leq 25 m^3/s$, ● Azul-claro: $\leq 50 m^3/s$, ● Verde: $\leq 75 m^3/s$, ● Amarelo: $\leq 100 m^3/s$ e ● Vermelho: $> 100 m^3/s$

- Troço – Velocidade Máxima (m/s) - Azul-escuro: $\leq 0,90$ m/s, Azul-claro: $\leq 2,00$ m/s, Verde: $\leq 4,00$ m/s, Amarelo: $\leq 5,00$ m/s e Vermelho: $> 5,00$ m/s

Face às limitações do modelo atual, torna-se essencial reforçar a medição dos caudais escoados na rede, melhorar a parametrização do modelo e aprofundar a análise da capacidade hidráulica do sistema. A simulação com precipitações de projeto permitiu, nesta fase, fazer esta avaliação.

Para antecipar os impactos das alterações climáticas (Figura 7), foram realizadas simulações com curvas IDF (Intensidade-Duração-Frequência) para T20 (15 minutos), permitindo a identificação de pontos críticos e o desenvolvimento de medidas de adaptação para a rede de AP.

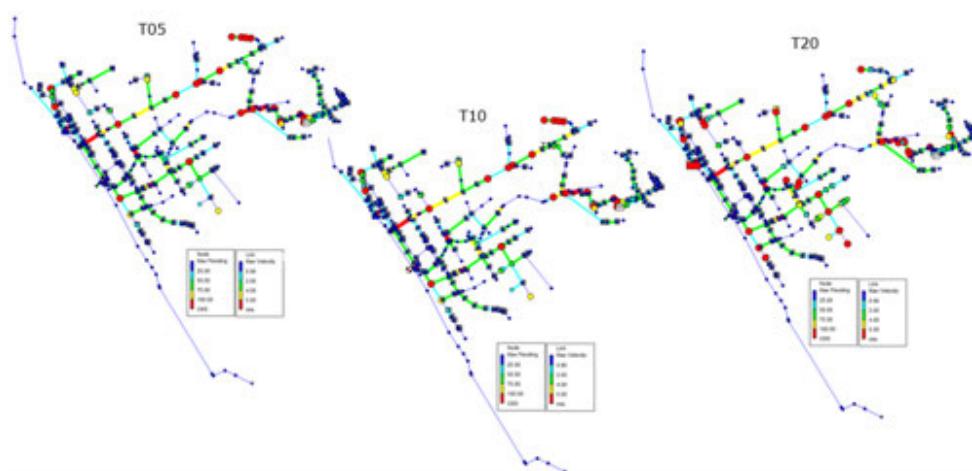


Figura 7. Capacidade hidráulica da rede - Simulação T05, T10 e T20 (intervalos de 5 e 15 minutos) – máx flooding (m^3/s) e máx velocity (0,9 a 5 m/s)

As simulações com os dados de janeiro e de outubro de 2023 confirmaram a ocorrência de inundações em áreas historicamente vulneráveis, como a Rua do Crasto e a rua Mestre Afonso Domingues, em consonância com os registos de inundações fornecidos pela Proteção Civil do Porto (1974-presente).

4 Considerações Finais

O estudo incidiu na modelação hidráulica de seis bacias da rede de drenagem da frente marítima do Porto, contribuindo para consolidar competências internas e estruturar esta abordagem na AEdP. A modelação da rede de ARD beneficiou da qualidade dos dados disponíveis, permitindo uma parametrização eficiente. Já na rede de AP, a escassez de medições de caudal e precipitação exigiu ajustes adicionais e reforçou a necessidade de expandir a rede de monitorização.

A aplicação do software SWMM permitiu simulações detalhadas, identificando estrangulamentos, zonas críticas, impactos de novas urbanizações e a capacidade de escoamento do sistema, apoiando o planeamento de intervenções.

Apesar de não constituir o foco do presente artigo, salienta-se a conclusão da modelação integral da rede de ARD em 2024 e a sua extensão prevista à rede de AP em zonas com UOPG em 2025. Está igualmente em desenvolvimento um modelo preditivo com recurso a Machine Learning, apoiado em dados operacionais e campanhas de varejamento. Paralelamente, decorre o reforço da rede de monitorização, preparando a transição para uma gestão em tempo real e resposta a eventos extremos.

Esta abordagem integrada, suportada por tecnologias de apoio à decisão, promove uma gestão mais inteligente, eficaz e sustentável da rede de drenagem urbana.

Referências

- Rossman L. A. (2010), *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*, US Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- Rossman, L.A. (2015), *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- US EPA (2024), <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (consultada a 2024/07/05).
- Instituto Hidrográfico, Tabela de Marés - Porto de Leixões 2020_2025, <https://leixoes.apdl.pt/tabela-de-mares/>, <https://leixoes.apdl.pt/en/tabela-de-mares/>, <https://www.hidrografico.pt/m.mare>.
- Proteção Civil do Porto, (1974–presente). Registo de ocorrências de inundações urbanas no Porto [compilação de várias fontes]. Porto: CMP. Consulta contínua (várias datas).