

# Modelação hidráulica e de qualidade da água dos sistemas de drenagem em meios urbanos

*Hydraulic and water quality modelling of urban drainage systems*

Luís Filipe de Oliveira Girão<sup>1</sup>, Nuno Eduardo da Cruz Simões<sup>2</sup>,  
José Alfeu Almeida de Sá Marques<sup>2</sup>, João Paulo Correia Leitão<sup>3</sup>, Rui Daniel Pina<sup>4</sup>

## RESUMO

As inundações urbanas estão se tornando cada vez mais frequentes, de tal forma que a União Europeia publicou a Diretiva 2007/60/CE no sentido de mitigar as consequências relacionadas com este fenómeno e de impor limites à concentração de poluentes nas águas pluviais. O objetivo deste artigo foi apresentar uma modelação dos sistemas de drenagem em situação de inundações, baseada no *software* da *United States Environmental Protection Agency* (EPA), *Storm Water Management Model* (SWMM), em que o estudo de caso é analisar um sistema de drenagem urbana unitário, inserido na Zona Central de Coimbra, em Portugal. Recorrendo à metodologia *Automatic Overland Flow Delineation* (AOFD) para a geração de uma rede de drenagem superficial e implementando-a no SWMM, obteve-se um modelo de drenagem dual, que permite a análise do escoamento em situação de inundações, incluindo o controle de escoamento entre a superfície e a rede de coletores e a modelação da qualidade da água à superfície. Este modelo permite quantificar a carga poluente à superfície, relativamente ao parâmetro de sólidos suspensos totais, para um evento de precipitação extrema.

**Palavras-chave:** inundações urbanas; drenagem dual; qualidade de água.

## ABSTRACT

Urban floods are becoming more frequent. Thus, the European Union published the Directive 2007/60/CE to mitigate costs related with this phenomenon and to impose limits on the concentration of pollutants in pluvial water. The purpose of this study was to present the modelling of drainage systems in flood situations, based on the software of the United States Environmental Protection Agency (EPA), the Storm Water Management Model (SWMM), in which the study case is to analyze a unitary urban drainage system of Zona Central catchment in Coimbra, Portugal. By using the Automatic Overland Flow Delineation (AOFD) methodology for the generation of a superficial drainage network and implementing it in the SWMM, it was obtained a dual drainage model that allows the flow analysis in flood conditions, including flow control between the surface and collectors network and also modeling of water quality at the surface. This model allows quantifying the pollution load at the surface, relatively to the parameter of total suspended solids, for any extreme rainfall event.

**Keywords:** urban floods; dual drainage; quality of water.

## INTRODUÇÃO

A utilização da água por parte das populações implica a produção de águas residuais que contêm elevadas quantidades de matéria orgânica, bem como matérias poluentes nocivas à saúde pública. Estas águas devem ser conduzidas e tratadas numa estação de tratamento para, posteriormente, serem devolvidas ao meio receptor. Por outro lado, a precipitação origina escoamentos superficiais que devem ser devidamente controlados e conduzidos, caso contrário, poderão originar inundações com consequências graves para as populações. Adicionalmente,

existe uma relação efetiva entre o crescimento populacional e a incidência de inundações em meios urbanos (FILHO & AMARAL, 2013). Uma inundação urbana ocorre quando as águas da chuva, do mar e dos cursos d'água atingem cidades, nomeadamente, arruamentos, passeios, zonas habitacionais e comerciais (SÁ MARQUES *et al.*, 2013). Nesse sentido, é essencial a existência de uma rede de drenagem para salvaguardar a segurança e o bem-estar da população.

As inundações ocorridas nos últimos anos em zonas habitadas instigaram o desenvolvimento de diversos trabalhos de investigação, os quais

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra - Coimbra, Portugal.

<sup>2</sup>MARE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra - Coimbra, Portugal.

<sup>3</sup>Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology - Dübendorf, Switzerland.

<sup>4</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London - London, UK.

**Endereço para correspondência:** Nuno Eduardo da Cruz Simões - MARE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra - Rua Luís Reis Santos, 3.030/788 - Coimbra, Portugal - E-mail: nunocs@dec.uc.pt

**Recebido:** 18/03/16 - **Aceito:** 24/06/16 - **Reg. ABES:** 161318

conduziram a um aperfeiçoamento dos modelos de drenagem urbana existentes (DJORDJEVIĆ *et al.*, 1999; HSU *et al.*, 2000; DJORDJEVIĆ *et al.*, 2005; MAKSIMOVIĆ *et al.*, 2009; SIMÕES, 2012; BAZIN *et al.*, 2013; DJORDJEVIĆ *et al.*, 2013). Dessa forma, desenvolveu-se o conceito de drenagem dual, em que o escoamento superficial é simulado por meio de um sistema constituído por canais abertos e bacias (sistema principal), que, por sua vez, está ligado ao sistema de coletores (sistema secundário) (PRICE & VOJINOVIĆ, 2011). Na Figura 1 é apresentada uma representação esquemática do conceito de drenagem dual, na qual se podem observar as interações entre o sistema superficial e o de coletores.

A interação entre a rede de drenagem superficial e a de coletores foi inicialmente estudada por Djordjević *et al.* (1999). No estudo referido, desenvolveu-se o conceito de drenagem dual, que é definido pela integração de um sistema de drenagem superficial, o qual inclui a superfície urbana, com o modelo de drenagem da rede de coletores. A rede superficial foi estabelecida com base em sistemas de informação geográfica (SIG) utilizando o modelo digital do terreno (MDT), e a interação com a rede de coletores foi simulada recorrendo-se a ligações nas caixas de visita.

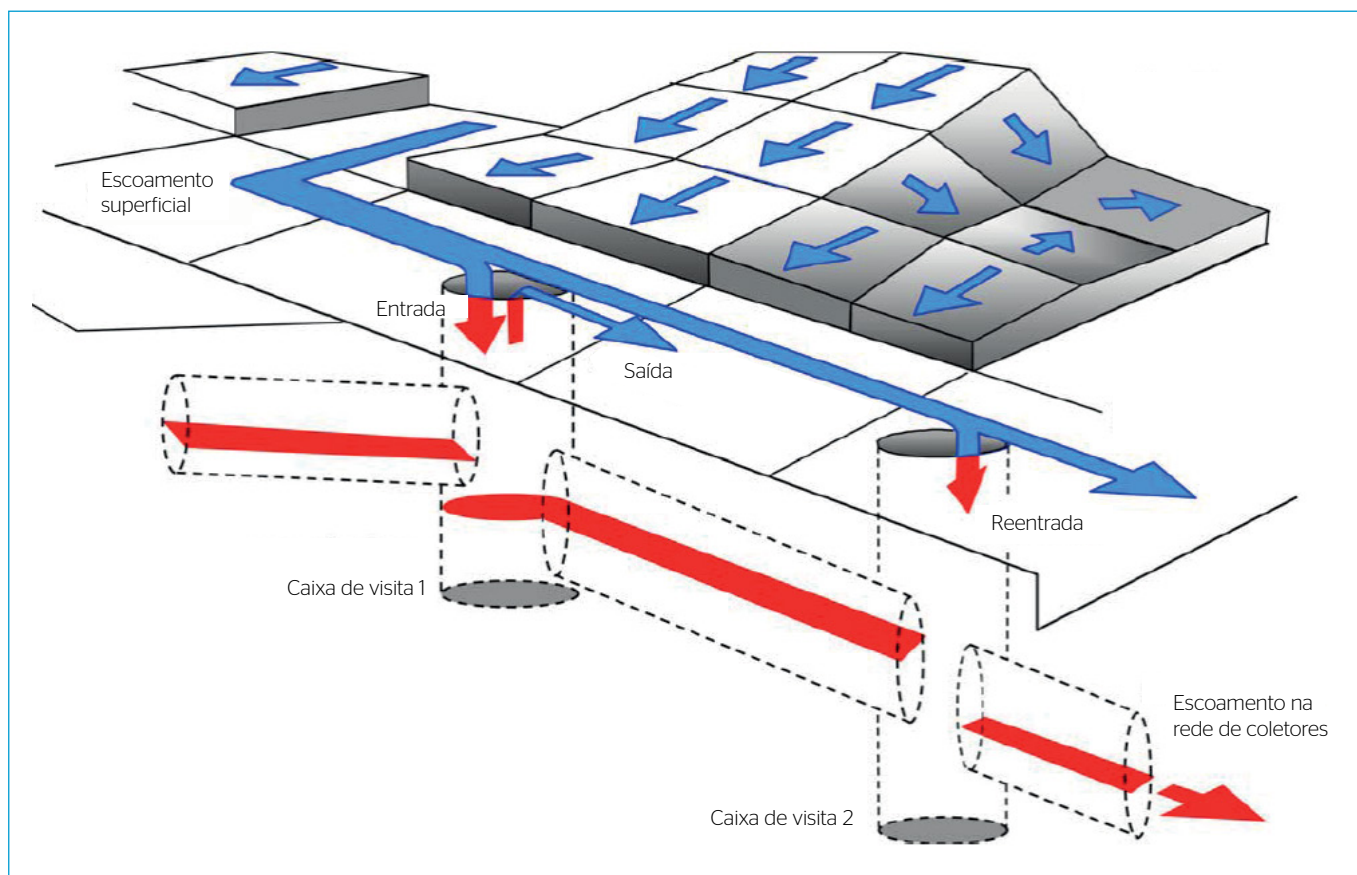
Djordjević *et al.* (2005) apresentaram um modelo 1D/1D por meio do *software* SIPSON para simular uma rede de drenagem dual, que incluía a rede de escoamento superficial e aquela em coletores, ligadas

entre si através de nós que são pontos de entrada da água. No modelo apresentado por Djordjević *et al.* (2005), o caudal que entra ou sai dos nós foi simulado recorrendo-se a descarregadores e orifícios.

Por sua vez, Maksimović *et al.* (2009) desenvolveram uma metodologia que permite gerar automaticamente as redes superficiais, recorrendo-se a um MDT – delineação automática do escoamento superficial (AOFD – *Automatic Overland Flow Delineation*). Esta rede superficial é composta por canais (*links*) que representam os caminhos preferenciais da água à superfície e por nós que indicam as depressões no terreno ou os pontos de acumulação da água.

Simões *et al.* (2010) e Simões (2012), empregando o método de AOFD e utilizando o *software* Infoworks CS, da Innowyze, apresentou uma simplificação dos modelos 1D/1D, permitindo alcançar-se uma significativa redução do tempo computacional de simulação do modelo e mantendo-se uma boa confiabilidade dos resultados. Complementarmente, o mesmo autor relatou uma combinação da simulação 1D/1D e 1D/2D num mesmo modelo (híbrido), evidenciando as suas vantagens.

Os estudos mais recentes realizados neste âmbito incidiram sobre as análises numérica e experimental do comportamento do escoamento que ocorre entre a superfície e a rede de coletores, entre os quais se destacam os trabalhos dos seguintes autores: Bazin *et al.* (2013) e Djordjević *et al.* (2013).



**Figura 1** - Representação esquemática do conceito de drenagem dual (adaptado de Smith, 2006).

No âmbito da qualidade da água, Fan *et al.* (2013) introduziram um modelo desenvolvido para simular os impactos da descarga de efluentes em bacias hidrográficas da ordem de várias dezenas de quilômetros quadrados, em situações de escassez de dados.

Quando se pretende avaliar o comportamento das redes de drenagem face a eventos extremos, o conceito de drenagem dual apresenta uma importância crucial, uma vez que ambos os sistemas interagem entre si, existindo, por vezes, o movimento (ascendente e/ou descendente) de grandes quantidades de água (LEITÃO *et al.*, 2012).

Atualmente, existem duas abordagens principais relativamente aos modelos de drenagem dual, sendo que ambas utilizam um modelo unidimensional para a rede de coletores. A abordagem 1D/1D representa a superfície por meio de um modelo unidimensional, enquanto a 1D/2D indica-a por um bidimensional (SÁ MARQUES *et al.*, 2013). Num modelo 1D/1D, a superfície é modelada por meio de um conjunto de bacias e nós conectados por ligações, em que os nós representam as junções de canais, os cruzamentos ou as depressões no terreno e as ligações são essencialmente para canais abertos (SIMÕES, 2012). Esses também apresentam um esforço computacional menor, traduzido num tempo de execução de uma simulação de um evento bem inferior. Contudo, os seus resultados apenas serão aceitáveis quando for pequena a incerteza com relação aos caminhos superficiais que o escoamento percorrerá.

Por sua vez, nos modelos 1D/2D, a superfície é dividida em pequenos elementos individuais, nos quais cada um desses elementos contém diversas informações, tais como: a cota do terreno, o tipo de cobertura, as propriedades do solo e o coeficiente de rugosidade (LEITÃO, 2009). Uma vez que esses modelos são mais complexos, pois representam de forma mais detalhada a realidade, o tempo de execução de cada simulação é mais longo, o que os torna pesados e, portanto, consumidores de tempo de esforço do cálculo. Quando se pretende simular eventos extremos, em zonas onde existe escoamento multidirecional, tais modelos constituem uma melhor opção. A escolha entre utilizar um modelo 1D/1D ou 1D/2D (dependendo do caso em estudo e dos parâmetros do modelo) determina a qualidade dos resultados e o tempo computacional necessário para obtê-los (LEANDRO *et al.*, 2009).

Para que a capacidade hidráulica das infraestruturas dispostas a jusante não seja excedida (como uma estação de tratamento de água residual), existem dispositivos denominados descarregadores de tempestade (DT), nos quais é liberada parte do caudal afluente que será conduzida até o meio hídrico. Esse dispositivo tem particular importância nos sistemas de drenagem unitários, em que as águas residuais escoam conjuntamente com as pluviais numa única rede. De fato, verifica-se que existem muitos centros urbanos antigos drenados por sistemas unitários, tanto na Europa como nos Estados Unidos. Nesses casos, as descargas efetuadas pelos DT podem ter graves efeitos no meio

receptor quando não são executadas de acordo com as condições do meio, tal como referem Gasperi *et al.* (2012).

Ainda que a legislação portuguesa, pelo Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais (RGSPDADAR), imponha que os novos sistemas de drenagem criados devam ser separativos (água residual e pluvial escoam em redes distintas), vários daqueles existentes nas cidades são unitários. O aumento de eventos extremos resulta em elevação do número de descargas dos DT, colocando em risco a qualidade das águas e dos habitats onde essas descargas ocorrem (RGSPDADAR, 1995). Com vista à gestão e proteção dos recursos hídricos, a União Europeia adotou, em 2000, a Diretiva-Quadro Água (DQA), que estabelece um quadro para o desenvolvimento de políticas integradas de gestão da água pelos órgãos comunitários e pelas administrações nacionais e regionais dos Estados Membros. Dessa forma, pretende-se garantir o bom estado ecológico da água, subterrânea ou superficial, em toda a Europa, impondo-se limites à concentração de poluentes na água. Nesse sentido, este estudo apresentou uma nova metodologia que permite avaliar a qualidade da água superficial, com vista ao cumprimento das exigências legais em termos de qualidade da água definidas na DQA. Portanto, este trabalho apresenta os seguintes objetivos:

- Simular o comportamento de um sistema de drenagem, utilizando-se um modelo de drenagem dual 1D/1D no *software Storm Water Management Model (SWMM)*, com controle de caudal entre o sistema à superfície e a rede de coletores.
- Desenvolver uma metodologia para avaliar a concentração do poluente de sólidos suspensos totais (SST) num sistema unitário, não só na rede de coletores, mas também à superfície, devido à ocorrência de inundações. Neste modelo, considerou-se o parâmetro físico de SST para aferir a qualidade da água, por estar associado a um fenômeno de transporte, sem a necessidade de ajustar parâmetros, que foi utilizado por diversos autores (TEMPRANO *et al.*, 2006; CAMBEZ *et al.*, 2008; LIU *et al.*, 2011). No entanto, a metodologia poderá ser aplicada a outros indicadores de qualidade da água. Esta análise é de extrema importância devido aos danos diretos provocados pelas inundações, mas, essencialmente, por se tratar de uma questão de saúde pública.

## METODOLOGIA

Com este estudo, pretendeu-se desenvolver uma forma de modelar uma rede de drenagem dual com controle de caudal entre a superfície e o sistema de coletores e quantificar o parâmetro de qualidade dos SST. Para concretizar tais objetivos, utilizou-se o *software SWMM*, desenvolvido pela *Environmental Protection Agency (EPA)*. As razões que justificam a escolha deste *software* são o fato de ser *open source* e *freeware*, bem como ser frequentemente recomendado para avaliar o

comportamento e impacto dos DT na qualidade da água (BURTON & PITT, 2002; TEMPRANO *et al.*, 2006; BORRIS *et al.*, 2012; THÉRIAULT & DUCHESNE, 2012).

A Figura 2 ressalta a necessidade do controle de caudal entre os dois sistemas contemplados no conceito de drenagem dual: o sistema superficial e o de coletores. O movimento descendente do caudal ocorre quando a carga hidráulica que se verifica na caixa de visita é inferior ao nível do solo. Quando a carga hidráulica na caixa de visita se encontra entre o nível do solo e o da água à superfície, a água continua a escoar para o sistema de coletores. Por sua vez, o movimento ascendente da água é provocado pela entrada em carga da rede de coletores.

O SWMM permite modelar tais fenômenos recorrendo-se a elementos específicos, nomeadamente, descarregadores e orifícios. O movimento descendente do escoamento é simulado por meio de um elemento *outlet* ao qual está associada uma tabela relacionando altura de água e caudal que entra nos coletores (Figuras 2A e B). Por outro lado, o movimento ascendente do escoamento, provocado pela entrada em carga da rede de coletores, é simulado por um orifício (Figura 2C). Neste caso, o controle de caudal é realizado por meio do elemento *outlet* disponível no SWMM, que usa a equação do tipo  $Q=Ah^B$ , em que  $Q$  é o caudal;  $h$  é a carga hidráulica e A e B são os parâmetros que podem ser calibrados. No caso de  $B=0,5$ , esta equivale à equação de um orifício. Como normalmente se consideram os sumidouros e os ramais de ligação de forma simplificada, é possível calibrar o caudal que entra ou sai em cada caixa de visita. O limite para a capacidade da entrada de água nos coletores definiu-se como 50 L/s, baseado em experiências feitas pela empresa que gere o sistema de drenagem (PINA *et al.*, 2010).

A aplicabilidade da metodologia será demonstrada por meio de um caso de estudo simplificado. Posteriormente, aplica-se a metodologia a um caso de estudo real, em Coimbra, Portugal.

### Avaliação da metodologia com um modelo simplificado

Na Figura 3 é apresentado um esquema do modelo simplificado 1D/1D implementado no SWMM, no qual os caminhos superficiais apresentam uma secção trapezoidal e os coletores possuem uma circular com diâmetro de 0,5 m, conectados a montante e a jusante de cada caixa de visita, respetivamente. Ainda na Figura 3, o polígono representa uma bacia de drenagem com uma área de 5 ha. Os pontos representam os nós e as linhas, os caminhos superficiais (parte superior) e os coletores (parte inferior). Entre cada nó existe uma caixa de visita.

A Figura 3 mostra os resultados de uma simulação com chuva constante, quando o sistema se encontra em regime permanente. Pela análise da Figura 3, verifica-se que existe um movimento ascendente e descendente do escoamento, consoante ao caudal que aflui à rede, o que corresponde ao comportamento real de uma rede de drenagem dual. Após os coletores ficarem cheios, nota-se, na primeira caixa de visita, um movimento ascendente do escoamento. Nas caixas de visita seguintes, verifica-se o movimento descendente, cujo valor calibrado depende da altura de água na rua, devido ao fato de a rede de coletores apresentar novamente capacidade de vazão.

### Modelo simplificado hidráulico para a qualidade da água

A Figura 4 representa os resultados de uma simulação com chuva constante, quando o sistema se encontra em regime permanente, em que se simula também a qualidade da água.

Em tal exemplo, existe a bacia 1, que escoar para a rede de coletores com uma concentração de poluente de 100 mg SST/L, e a 2, a qual escoar para o caminho superficial com uma concentração de poluente de 10 mg SST/L. Ambas as bacias apresentam a mesma área, divergindo-se apenas na concentração de poluente acumulado. Em função da entrada em carga da rede de coletores na primeira caixa de visita, nota-se que ocorre o movimento ascendente do escoamento até à superfície (271 L/s), provocando um aumento da concentração de poluente

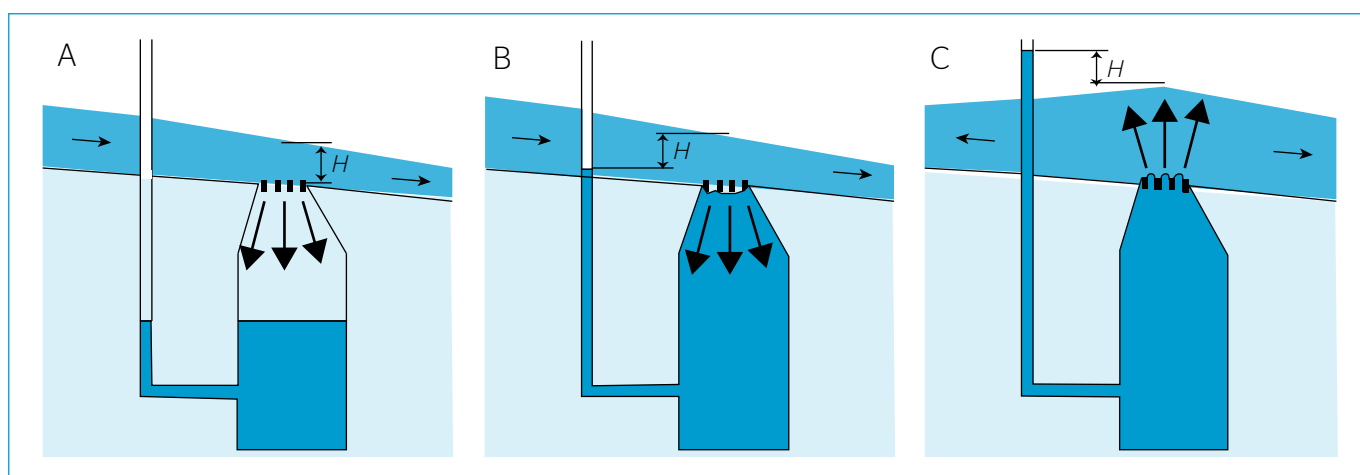


Figura 2 - Casos básicos do controle de caudal (adaptado de Djordjević *et al.*, 2005).

à superfície (25 mg SST/L). Por outro lado, quando a rede de coletores recupera a capacidade de vazão, ocorre o movimento descendente do escoamento, provocando uma diminuição da concentração de poluente na rede de coletores.

## APLICAÇÃO EM UM CASO REAL (COIMBRA, PORTUGAL)

### Área de estudo

A cidade de Coimbra tem média dimensão, em que várias inundações urbanas de origem pluvial têm sido observadas nos anos recentes, nomeadamente, em 9 de junho de 2006, 21 de setembro

de 2008 e 24 de dezembro de 2013 (Figura 5). A zona central é normalmente a mais afetada, portanto será analisada neste estudo. Esta zona inclui a Praça 8 de Maio, que se situa junto à Câmara Municipal e à Igreja de Santa Cruz. A bacia hidrográfica apresenta uma área total de cerca de 1,5 km<sup>2</sup>, que pode ser dividida em três regiões com características distintas (SÁ MARQUES *et al.*, 2013):

- a “baixa”, que apresenta cotas topográficas reduzidas, majoritariamente ocupada por comércio e serviços, com 0,4 km<sup>2</sup> e sistema de drenagem unitário;
- a “alta”, que possui relevo acentuado e grandes declives, altamente urbanizada e com uma área de aproximadamente 0,2 km<sup>2</sup>;
- a área restante, que também é altamente urbanizada, com uma área de 0,9 km<sup>2</sup>, na qual são gerados os principais problemas de inundações.

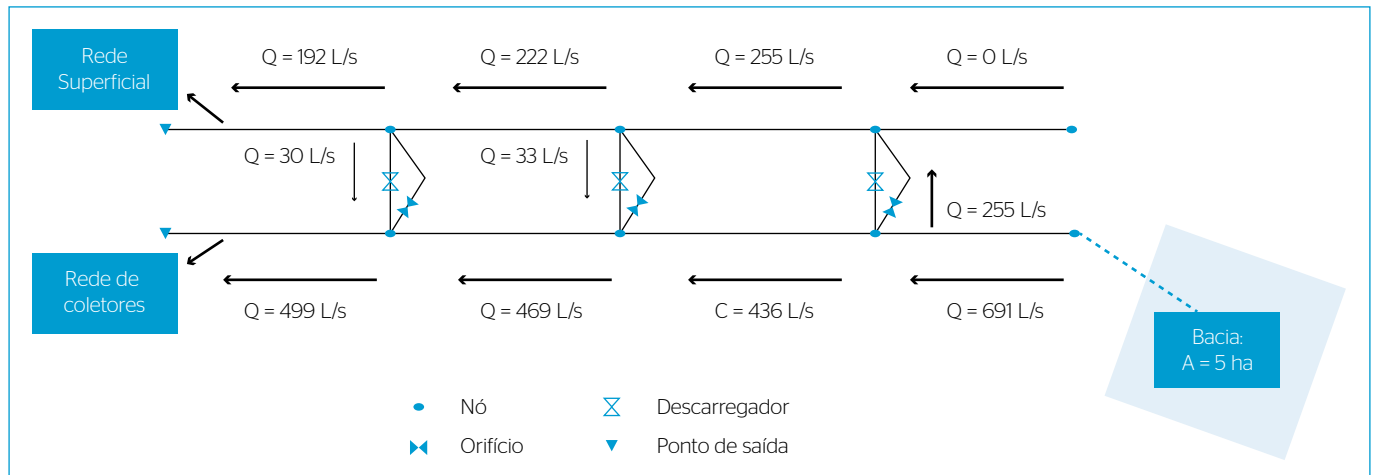


Figura 3 - Esquema do modelo simplificado 1D/1D implementado no Storm Water Management Model.

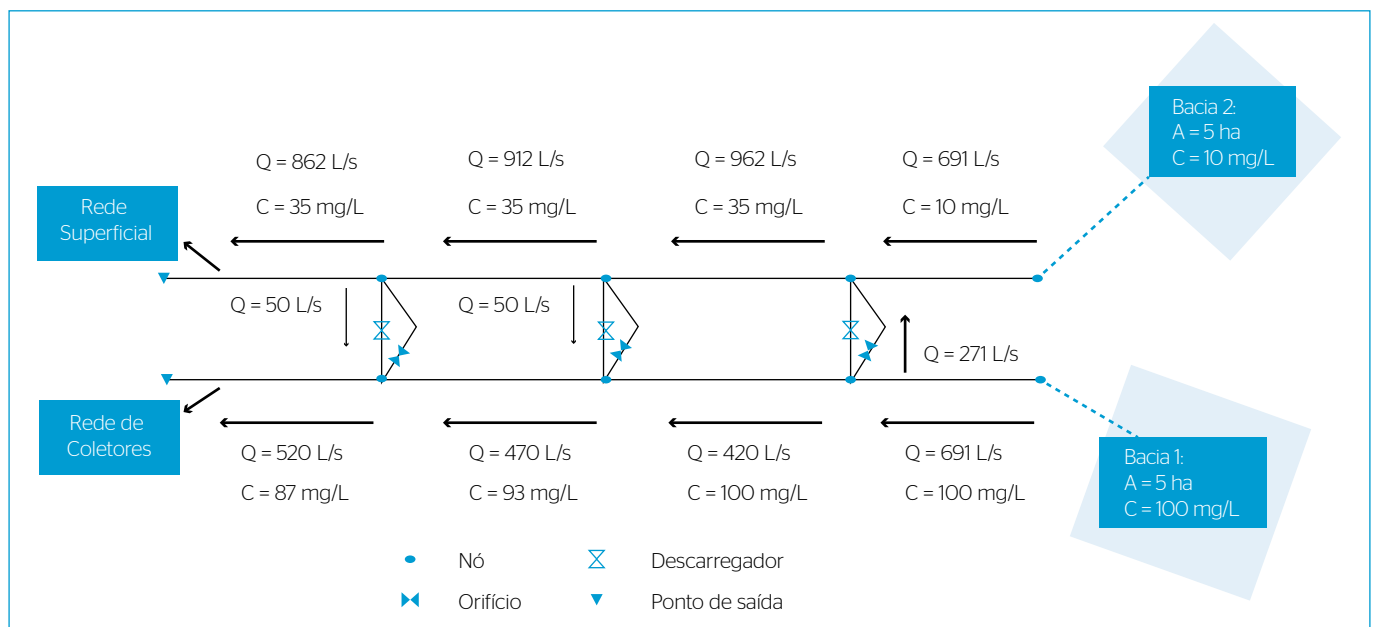
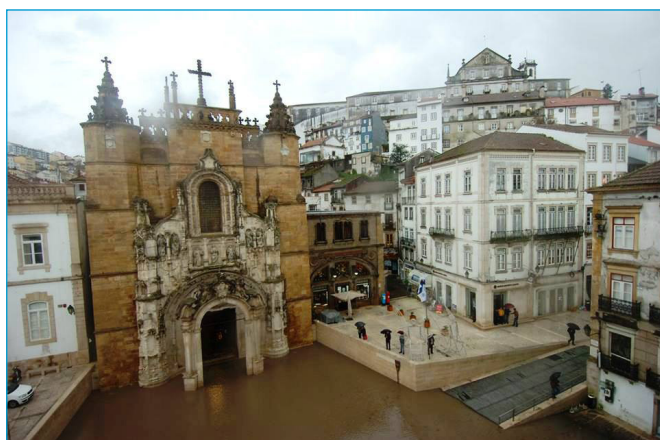


Figura 4 - Esquema do modelo simplificado 1D/1D com qualidade da água implementado no Storm Water Management Model.

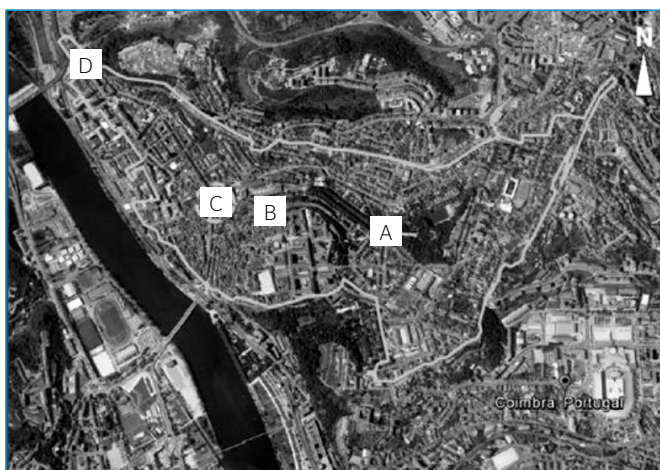
Para possibilitar uma avaliação adequada do comportamento da rede, definiram-se vários pontos de controle para efetuar a leitura dos resultados, a saber (Figura 6): Praça da República; Mercado Municipal; Praça 8 de Maio, que é o local crítico da zona em estudo e onde frequentemente se verificam inundações; Casa do Sal, onde se situa a estação elevatória e o DT.

Os principais constituintes da rede em estudo são coletores, caixas de visita, descarregadores, uma estação elevatória e um tanque de armazenamento. Os coletores apresentam uma secção circular, diâmetros compreendidos entre 200 e 1.550 mm e extensão de 34,8 km, 29 km dos quais unitários, e apenas 1,2 km são exclusivamente para águas pluviais. O tempo de concentração da bacia é estimado em 45 minutos (SÁ MARQUES *et al.*, 2013).

O processo de construção da rede de drenagem dual, criada por Simões (2012) e utilizada neste estudo, envolveu determinadas etapas. Na fase inicial, utilizou-se a metodologia de AOFD, desenvolvida por



**Figura 5** - Inundação urbana na Igreja de Santa Cruz (Praça 8 de Maio, em Coimbra), em 24 de dezembro de 2013 (AMARO, 2013).



**Figura 6** - Localização dos pontos de leitura dos resultados (adaptado de Google, 2015).

Maksimović *et al.* (2009), que permitiu gerar automaticamente o desenho da rede de escoamento superficial, com base no MDT. Posteriormente, ao conjugar a rede de coletores e a de escoamento superficial, obteve-se a rede de drenagem dual (SIMÕES, 2012). Perante eventos extremos, observa-se, regularmente, água superficial na bacia da zona central de Coimbra, mesmo quando a rede de coletores ainda não entrou em carga. Este fenómeno é maioritariamente devido ao fato de a zona ser bastante inclinada, o que impossibilita que uma quantidade razoável de água entre nos coletores.

## Construção do modelo

Para efetuar a modelagem da qualidade da água, foi necessário levar em consideração a contribuição de duas fontes poluentes: a água residual doméstica e a pluvial (e consequente lixiviação). Os SST existem tipicamente na água residual doméstica, e a sua concentração é normalmente elevada. As descargas com elevada quantidade de SST provocam um decréscimo da quantidade de oxigênio dissolvido (OD). Por outro lado, impedem a penetração de luz na água, inibindo a realização da fotossíntese. Quando se depositam, vão formar uma camada anaeróbica no leito, diminuindo a biodiversidade. Neste estudo, consideraram-se os valores típicos da concentração de SST para cada tipo de água, segundo Metcalf *et al.* (2003).

Foi efetuada uma estimativa da concentração de SST na água residual doméstica com base nos consumos associados a cada nó da rede (disponibilizados pela empresa responsável pela gestão do sistema de drenagem da cidade de Coimbra, AC, Águas de Coimbra, E.E.M.), considerando um fator de afluência de 85% e utilizando o conceito de população equivalente – PE (SÁ MARQUES & SOUSA, 2008). Este baseia-se na quantificação do número de habitantes de um aglomerado urbano necessário para originar a mesma carga de poluição gerada em qualquer outra fonte. Em termos do volume de água, uma PE corresponde a 0,2 m<sup>3</sup>/d, podendo existir outras definições de PE. No caso do parâmetro dos SST, uma PE corresponde a 90 g de SST/d. Dessa forma, obteve-se uma estimativa do número de habitantes associados a cada nó. Desse modo, resultou-se em uma PE de aproximadamente 8.000 habitantes na zona central. Posteriormente, utilizando o conceito de PE relativo ao parâmetro dos SST, obteve-se a concentração de carga poluente em cada nó, correspondente a 450 g/L. Esse valor foi considerado no modelo e constituiu uma simplificação, que foi obtida com base nos dados disponibilizados pela entidade gestora do sistema de abastecimento e drenagem de água (Águas de Coimbra).

Será descrita, a seguir, a metodologia utilizada para incluir a carga poluente proveniente de água pluvial no modelo. Começando por definir o parâmetro, considerou-se uma concentração de 1 mg de SST/L existente na água da chuva, que atinge os 100 mg de SST/L quando atinge o solo e se processa o escoamento superficial (METCALF *et al.*, 2003). Em seguida, consideraram-se dois tipos de uso do solo (residencial

e comercial), tendo sido atribuídas as percentagens de 50,0% a cada um na bacia, dadas as características da zona em estudo. Os diferentes tipos de uso do solo vão gerar poluentes com taxas diferentes, bem como limites máximos diferentes. Em cada um, é necessário definir a acumulação e a lixiviação dos poluentes.

A função de acumulação selecionada caracteriza a acumulação de SST durante o período seco antecedente à chuva. A taxa de acumulação tende a diminuir com o tempo; no entanto, a escolha da função a considerar nunca é óbvia, mesmo quando existam dados disponíveis. Neste estudo, utilizou-se uma função exponencial para descrever a acumulação, uma vez que consiste na função mais frequentemente adotada para descrever a acumulação de sólidos (TEMPRANO *et al.*, 2006; CAMBEZ *et al.*, 2008; MANNINA & VIVIANI, 2010; MARCHIS *et al.*, 2012).

Liu *et al.* (2011) estudaram a variabilidade dos parâmetros de acumulação de poluentes em diferentes tipos de uso do solo (residencial, comercial e industrial). Assim, numa área urbana com características semelhantes à zona analisada, estudou-se o comportamento relativo à acumulação de poluentes em várias ruas com diferentes tipos de uso do solo, incluindo medições em campo. Dessa forma, foi possível obter valores típicos dos parâmetros de acumulação de poluentes consoante ao tipo de uso do solo em estudo. Neste trabalho, foram utilizados os resultados obtidos por Liu *et al.* (2011) para acumulação do parâmetro de SST, nomeadamente, para solos dos tipos residencial e comercial.

Relativamente à lixiviação dos SST, utilizou-se o método de concentração média do evento, o qual é frequentemente empregado nos estudos existentes, principalmente quando não existem medições efetuadas em campo (TEMPRANO *et al.*, 2006; BORRIS *et al.*, 2012; THÉRIAULT & DUCHESNE, 2012). Nesse sentido, considerou-se uma concentração média do evento de 100 mg de SST/L (METCALF *et al.*, 2003).

De forma a iniciar a simulação com alguma carga poluente acumulada, assumiu-se que decorreram cinco dias de tempo seco antecedentes à simulação. Portanto, o programa utilizou este intervalo para considerar uma carga inicial de poluente em cada bacia.

Recorrendo ao *software* QGIS Desktop, associaram-se os valores de caudal afluente aos nós da rede (Figura 7). Foi aplicado um diagrama de carga diária e mensal, que reproduz a variação de caudal afluente à rede ao longo do dia e consoante ao mês (SÁ MARQUES & SOUSA, 2008). Relativamente ao caudal de infiltração, considerou-se o critério proposto pelo RGSPDADAR, ou seja, correspondendo a 100% do caudal médio anual.

A Estação Elevatória de Águas Residuais (EEAR), localizada na Casa do Sal, também foi considerada neste modelo, tendo sido utilizados os dados cedidos por Águas de Coimbra para este ponto. O reservatório modelado apresenta uma secção retangular, com volume de 400 m<sup>3</sup> e altura de 2 m, e a bomba possui uma altura de elevação de 6,5 m e um caudal de 0,143 m<sup>3</sup>/s. Baseando-se nas características reais do reservatório, definiu-se no modelo que a bomba inicia o seu funcionamento

quando a altura de água no reservatório atinge 1,81 m e para de bombear quando a altura de água no reservatório desce até 0,5 m.

O DT localizado na Casa do Sal (objeto *weir*, no SWMM) é transversal, apresenta uma secção retangular e possui altura de 0,7 m e largura de 3,5 m. Admitiu-se um coeficiente de descarga de 1,84, tal como recomendado no manual do SWMM relativamente aos DT transversais retangulares.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados que serão apresentados se referem às zonas de controle definidas anteriormente e foram obtidos considerando: precipitação (evento com um período de retorno de 100 anos e duração de 2h15min.); período de simulação de 2h30min.; cinco dias de tempo seco antecedentes; equações (modelo/método) da onda dinâmica e passo de tempo de 0,1 segundo.

Na Figura 8, encontram-se o caudal e a concentração de SST registrados no coletor da Praça da República. Numa fase inicial, ela aumenta exponencialmente devido ao fenómeno de *first flush*, que resulta do arraste de poluentes acumulados durante o período seco. Posteriormente, verifica-se um decaimento progressivo da concentração de SST, que resulta do arraste do poluente a jusante daquela secção.

Os resultados que se encontram na Figura 9 são relativos ao coletor que se encontra na zona do Mercado Municipal. É possível observar um comportamento semelhante ao registrado no coletor da Praça da República relativamente à concentração de SST, sendo que o caudal escoado no coletor do Mercado Municipal é superior.

Ao analisar a Figura 10, é possível verificar que, perante este evento de precipitação, existe a acumulação de água superficial na Praça 8 de Maio. Por outro lado, a concentração de poluente na superfície atinge um valor máximo reduzido, que corresponde a cerca de 7 mg de SST/L.

Relativamente ao caudal que é descarregado pelo DT na Casa do Sal (Figura 11), nota-se que, após o início da contribuição de águas

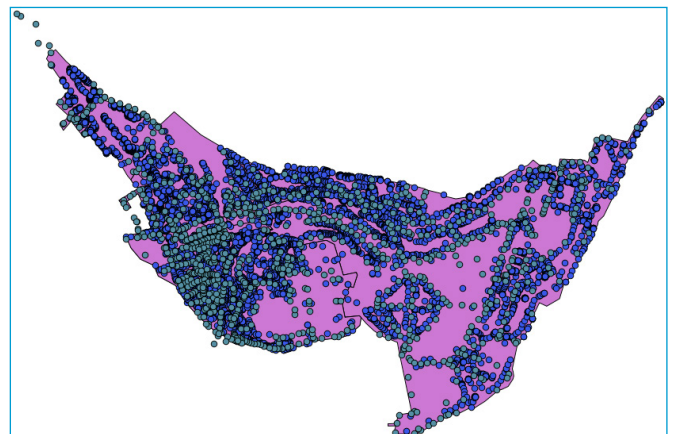
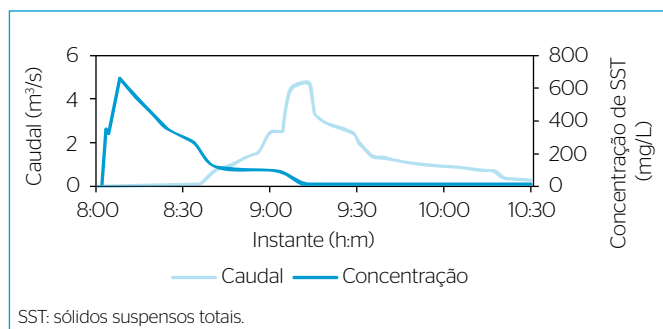
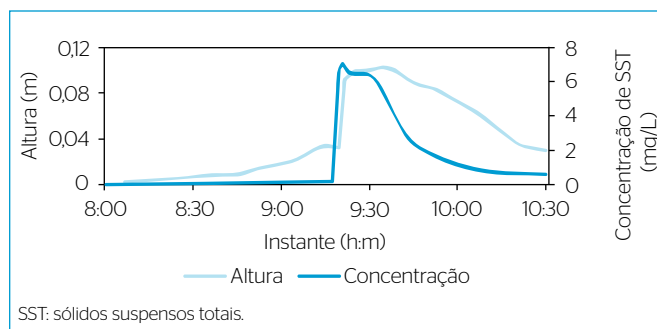


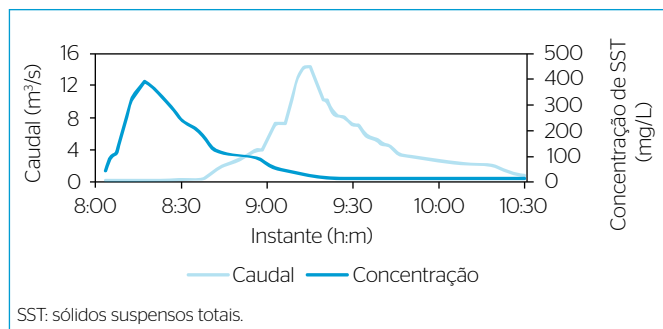
Figura 7 - Representação da rede de drenagem no *software* QGIS Desktop.



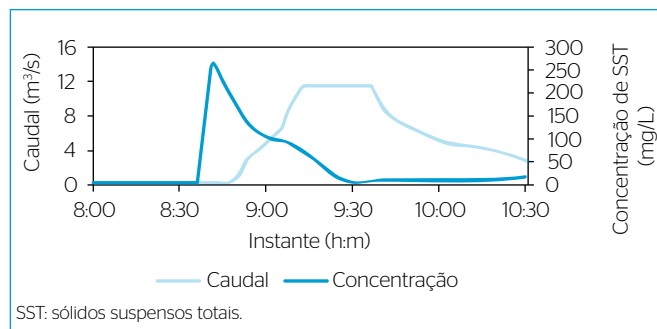
**Figura 8** - Caudal e concentração de sólidos suspensos totais registrada no coletor do local A (Praça da República).



**Figura 10** - Altura de água e concentração de sólidos suspensos totais registrada à superfície no local C (Praça 8 de Maio).



**Figura 9** - Caudal e concentração de sólidos suspensos totais registrada no coletor do local B (Mercado Municipal).



**Figura 11** - Caudal e concentração de sólidos suspensos totais no caudal descarregado pelo descarregador de tempestade no local D (Casa do Sal).

pluviais (8h45min.), mesmo com a contribuição da elevada carga poluente proveniente das águas residuais domésticas, o caudal que é descarregado pelo DT apresenta uma concentração de SST reduzida, em função do elevado fator de diluição imposto pelas águas pluviais. Dessa forma, numa fase inicial da chuva, o valor máximo obtido é de 250 mg de SST/L, devido ao fenômeno de *first flush*. No entanto, este pico inicial de concentração dos SST está associado a um caudal muito reduzido, o que induz um efeito desprezável no meio receptor. Posteriormente, a concentração de SST se estabiliza, apresentando um valor de 100 mg de SST/L. Levando em consideração o valor limite de emissão (VLE) atribuído à descarga de águas residuais tratadas (60 mg de SST/L), o valor da concentração de SST do caudal descarregado não é muito elevado (já que a água descarregada num DT não é tratada). Tal fato deve-se ao alto fator de diluição por causa da contribuição das águas pluviais.

## CONCLUSÕES

Perante as exigências legais, torna-se evidente a importância de avaliar o comportamento de uma rede de drenagem urbana em face de eventos extremos, sob o ponto de vista hidráulico e de qualidade da água. Desse modo, neste estudo, utilizou-se um conceito inovador de drenagem dual, com controle de caudal entre a rede superficial

e a de coletores e com avaliação da qualidade da água, recorrendo-se ao *software* SWMM. Nestas circunstâncias excepcionais, torna-se crucial a avaliação da qualidade da água que é liberada nas descargas à superfície, as quais resultam pelos coletores se encontrarem cheios. Neste documento, apresentou-se uma descrição detalhada da metodologia utilizada e da sua aplicação, analisando-se o sistema de drenagem unitário da zona central de Coimbra. Este modelo considerou o poluente de SST, por ser frequentemente utilizado para aferir sobre a qualidade da água e por ter sido analisado nos estudos promovidos por diversos autores (TEMPRANO *et al.*, 2006; CAMBEZ *et al.*, 2008; LIU *et al.*, 2011).

Tal como era esperado, o modelo mostra a ocorrência do fenômeno de *first flush*, que resulta do arraste inicial de poluentes acumulados durante o período seco, o que provoca um pico no início da evolução da concentração de SST. Levando em consideração o VLE atribuído à descarga de águas residuais tratadas (60 mg de SST/L), o valor da concentração de SST do caudal descarregado não tratado não é muito elevado (100 mg de SST/L). Tal fato deve-se ao elevado fator de diluição em função da contribuição de águas pluviais associadas a um evento de precipitação com um período de retorno de 100 anos. Dessa forma, pode-se concluir que, nas circunstâncias estudadas, a carga poluente descarregada pelo DT pode ter um reduzido impacto ambiental no meio receptor.



O objetivo principal deste estudo foi propor uma metodologia para a simulação dos fenômenos complexos de drenagem urbana quer em termos hidráulicos, quer em termos de qualidade da água recorrendo ao SWMM. A metodologia desenvolvida possibilita o surgimento de novas análises no âmbito da modelação avançada dos sistemas de drenagem, principalmente, na análise da qualidade da água, recorrendo a um *software open source e freeware*. O tipo de simulação proposta poderá permitir melhorar a operação dos sistemas de drenagem existentes por meio da análise de diferentes cenários, bem como encontrar técnicas e práticas de dimensionamento de

sistemas futuros mais adequadas aos meios urbanos onde se inserem, que são alvo de evolução e transformação constantes. Nesse sentido, esta ferramenta permite avaliar o impacto ambiental de descargas que ocorrem em situações extremas, com vista ao cumprimento das recomendações legais. É importante citar que os fenômenos de acumulação e lixiviação de poluentes em sistemas de drenagem unitários são influenciados por diversas variáveis que ainda são difíceis de prever e medir, principalmente em fenômenos de cheias urbanas de curta duração, o que dificulta uma completa validação do modelo em termos de qualidade da água.

## REFERÊNCIAS

- AMARO, P. (2013) *Mau tempo em Coimbra causa inundações*. ForumCoimbra.com. Disponível em: <<http://www.forumcoimbra.com/forum/viewtopic.php?f=31&t=17456>>. Acesso em: 10 dez. 2013.
- BAZIN, P.H.; NAKAGAWA, H.; KAWAIKE, K.; PAQUIER, A.; MIGNOT, E. (2013) *Modeling flow exchanges between a street and an underground drainage pipe during urban floods*. Lyon, France: Novatech 2013: Group de Recherche Rhone-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (GRAIE).
- BORRIS, M.; VIKLANDER, M.; GUSTAFSSON, A.M.; MARSALEK, J. (2012) Using urban runoff simulations for addressing climate change impacts on urban runoff quality in a Swedish town. *9th International Conference on Urban Drainage Modelling*, Belgrade.
- BURTON, G.A. & PITT, J.R.E. (2002) *Storm water effects handbook: a toolbox for watershed managers, scientists and engineers*. Florida: Lewis Publishers.
- CAMBEZ, M.J.; PINHO, J.; DAVID, L.M. (2008) Using SWMM 5 in the continuous modelling of storm water hydraulics and quality. *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK.
- DJORDJEVIĆ, S.; SAUL, A.J.; TABOR, G.R.; BLANKSBY, J.; GALAMBOS, I.; SABTU, N.; SAILOR, G. (2013) Experimental and numerical investigation of interactions between above and below ground drainage systems. *Water Science and Technology*, v. 67, n. 3, p. 535-542.
- DJORDJEVIĆ, S.; PRODANOVIC, D.; MAKSIMOVIĆ, C.; IVETIC, M.; SAVIC, D. (2005) SIPSON - Simulation of interaction between pipe flow and surface overland flow in networks. *Water Science and Technology*, v. 52, n. 5, p. 275-283.
- DJORDJEVIĆ, S.; PRODANOVIC, D.; MAKSIMOVIĆ, C. (1999) An approach to simulation of dual drainage. *Water Science and Technology*, v. 39, n. 9, p. 95-103.
- FAN, F.M.; COLLISCHONN, W.; RIGO, D. (2013) Modelo analítico de qualidade da água acoplado com Sistema de Informação Geográfica para simulação de lançamentos com duração variada. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 4, p. 359-370.
- FILHO, F.C.M.M.; AMARAL, D.B. (2013) Histórico da expansão urbana e ocorrência de inundações na cidade de Cuiabá-MT. *Revista Sociedade e Natureza*, Uberlândia, v. 26, n. 1, p. 159-170.
- GASPERI, J.; ZGHEIB, S.; CLADIÈRE, M.; ROCHER, V.; MOILLERON, R.; CHEBBO, G. (2012) Priority pollutants in urban storm water: part 2 e case of combined sewers. *Water Research*, v. 46, p. 6693-6703.
- GOOGLE. (2015) *Google Earth*. Disponível em: <<http://www.google.com/earth/>>. Acesso em: 12 jan. 2015.
- HSU, M.H.; CHEN, S.H.; CHANG, T.J. (2000) Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer. *Journal of Hydrology*, v. 234, n. 1-2, p. 21-37.
- LEANDRO, J.; CHEN, A.S.; DJORDJEVIĆ, S.; SAVIC, D.A. (2009) Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (sewer/surface) hydraulic models for urban flood simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 135, n. 6, p. 495-504.
- LEITÃO, J.P.; ALMEIDA, M.C.; SIMÕES, N.E.; MARTINS, A. (2012) Methodology for qualitative urban flooding risk assessment. *9th International Conference on Urban Drainage Modelling*, Belgrado.
- LEITÃO, J.P.C. (2009) *Enhancement of digital elevation models and overland flow path delineation methods for advanced urban flood modelling*. Tese de Doutorado - Department of Civil and Environmental Engineering - Imperial College, Londres. 365p.
- LIU, A.; EGODAWATTA, P.; GOONETILLEKE, A. (2011) Variability of input parameters related to pollutants build-up in stormwater quality modelling. *34th IAHR World Congress*, Brisbane.
- MAKSIMOVIĆ, C.; PRODANOVIC, D.; BOONYA-AROONNET, S.; LEITÃO, J.P.; DJORDJEVIĆ, S.; ALLITT, R. (2009) Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding. *Journal of Hydraulic Research*, v. 47, n. 4, p. 512-523.

- MANNINA, G. & VIVIANI, G. (2010) An urban drainage stormwater quality model: model development and uncertainty quantification. *Journal of Hydrology*, v. 381, n. 3-4, p. 248-265.
- MARCHIS, M.D.; FRENI, G.; NAPOLI, E. (2012) Modelling of *E. coli* distribution in coastal areas subjected to combined sewer overflows. *9th International Conference on Urban Drainage Modelling*, Belgrade.
- METCALF, E.; TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F.L.; STENSEL, H.D. (2003) *Wastewater engineering: treatment and reuse*. New York: McGraw-Hill.
- PINA, R.D.; OLIVEIRA SOUSA, J.; SANTOS TEMIDO, J.; SÁ MARQUES, A. (2010) O novo paradigma de gestão dos sistemas de drenagem da cidade de coimbra - Causas das inundações na Praça 8 de Maio, em Coimbra, e propostas de intervenção. *10º Congresso da Água*, Alvor, Portugal.
- PRICE, R.K. & VOJINOVIC, Z. (2011) *Urban hydroinformatics*. London: IWA Publishing.
- SÁ MARQUES, A.; LIMA, J.P.D.; SOUSA, J.; SIMÕES, N.E.; PINA, R. (2013) *Hidrologia Urbana - Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais Urbanas*. Lisboa: ERSAR e Universidade de Coimbra.
- RGSPDADAR. (1995) *Decreto regulamentar 23/95 de 23 de agosto*. Regulamento geral dos sistemas públicos e prediais de distribuição de águas e de drenagem de águas residuais. Lisboa, Portugal.
- SÁ MARQUES, A. & SOUSA, J. (2008) *Hidráulica urbana: sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.
- SIMÕES, N.E. (2012) *Urban pluvial flood forecasting*. Tese de Doutoramento - Department of Civil Engineering, Imperial College, Londres. 172p.
- SMITH, M.B. (2006) Comment on 'Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems'. *Journal of Hydrology*, v. 317, n. 3-4, p.355-363.
- TEMPRANO, J.; ARANGO, Ó.; CAGIAO, J.; SUÁREZ, J.; TEJERO, I. (2006) Stormwater quality calibration by SWMM: a case study in Northern Spain. *Water SA*, v. 32, n. 1, p. 55-64.
- THÉRIAULT, A. & DUCHESNE, S. (2012) Urban water quality modelling: quantifying the fecal coliform load in the Beauport River. *9th International Conference on Urban Drainage Modelling*, Belgrade.