

MODELAÇÃO MATEMÁTICA DE UM SISTEMA DE DRENAGEM URBANA COM O SWMM

Maria João CAMBEZ⁽¹⁾; João PINHO⁽²⁾; Luís Mesquita DAVID⁽³⁾

RESUMO

Recentemente foi lançada a versão 5.0 do SWMM para o MS Windows. O programa é gratuito e dispõe de um ambiente simples e integrado para edição de dados, corrida de simulações e visualização de resultados, tornando-se acessível a entidades gestoras de menor dimensão, universidades e estudantes. A perspectiva de constituir uma ferramenta comum a diversas entidades na gestão de sistemas de drenagem urbana poderá igualmente promover a sua utilização, à semelhança do que aconteceu com o programa EPANET para os sistemas de abastecimento de água. Para além de permitir a simulação por eventos de precipitação, comum à generalidade dos modelos hidrodinâmicos disponíveis no mercado, o SWMM também permite simulações contínuas utilizando séries históricas de precipitação. Neste artigo descreve-se a modelação com o SWMM5 de uma área urbana, para a qual se dispõem de séries de dados de monitorização hidráulica e alguns dados de qualidade da água. Descreve-se a construção e calibração do modelo hidráulico e compara-se a descrição hidrológica das bacias com a do modelo hidrológico A do programa MOUSE. Apresenta-se um estudo e uma reflexão crítica sobre a modelação da qualidade da água. A modelação contínua com uma série histórica de precipitações permitiu comparar os benefícios de diferentes cenários na redução dos volumes de águas residuais descarregados em tempo chuvoso, embora se tenham verificado algumas limitações na utilização de séries extensas de dados.

PALAVRAS-CHAVE

Drenagem urbana, modelação matemática, calibração e verificação hidráulica, qualidade da água, modelação contínua

⁽¹⁾ Licenciada em Engenharia Biológica, Bolseiro FCT no LNEC (DHA NES), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

⁽²⁾ Engenheiro Civil, Bolseiro FCT no LNEC (DHA NES), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

⁽³⁾ Investigador Auxiliar, LNEC (DHA/NES), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, ldavid@lnec.pt



1 - INTRODUÇÃO

A utilização de modelos matemáticos de drenagem urbana é comum na investigação e na reabilitação ou exploração dos sistemas mais complexos. Na Europa, os programas mais utilizados são o MOUSE e o InfoWorks. No entanto, os custos associados à aquisição de software, licenças anuais de utilização e formação de pessoal têm limitado a utilização generalizada deste tipo de programas.

Recentemente foi lançada a versão 5.0 do SWMM (Storm Water Management Model, desenvolvido pela U.S.EPA) para o sistema Windows da Microsoft. O programa é gratuito e de fácil utilização, tornando-se acessível a entidades gestoras de menor dimensão, consultores, universidades e estudantes. A perspectiva de constituir uma ferramenta comum a diversas entidades na gestão de sistemas de drenagem urbana poderá igualmente promover a sua utilização, à semelhança do que aconteceu com o programa EPANET para os sistemas de abastecimento de água. Para além de permitir a simulação por eventos de precipitação, comum à generalidade dos modelos hidrodinâmicos disponíveis no mercado, o SWMM também permite simulações contínuas utilizando séries históricas de precipitação.

Neste artigo descreve-se a aplicação do SWMM na modelação de uma área urbana com 110 ha, a qual é dividida em quatro bacias com diferentes características. Dispõem-se de dados de monitorização da precipitação e dos caudais nas diferentes bacias, necessários para a calibração e verificação do modelo, e de alguns registos de qualidade da água em condições de tempo seco e chuvoso, que foram utilizados para estudar o modelo de qualidade da água. Procedeu-se ao estudo das potencialidades e limitações da modelação contínua com o SWMM utilizando a série digitalizada de precipitações da estação climatológica do Instituto Geofísico Infante Dom Luiz, com 19 anos (de 1973 a 1991, inclusive).

2 - METODOLOGIA

2.1 - Descrição geral do SWMM

O SWMM é um modelo distribuído e dinâmico completo, desenvolvido desde a década de 1970 e ao longo dos anos 80, para a simulação de sistemas de drenagem urbana. A versão 5.0, de 2005, corresponde a uma reestruturação completa do programa, tendo em vista a sua conversão para o ambiente Windows e a criação de um ambiente simples e integrado para edição e introdução de dados, corrida de simulações hidrológicas, hidráulicas e de qualidade da água, e visualização de resultados. Conceptualmente, está dividido em diversos blocos, designadamente: o bloco atmosférico, que engloba a precipitação e a deposição de poluentes na superfície terrestre; o bloco do escoamento superficial, caracterizado pelas sub-bacias; o bloco da água subterrânea, que recebe a infiltração do bloco superficial e permite transferir parte da água para o bloco de transporte; e o bloco de transporte, que engloba a infra-estrutura de drenagem e os dispositivos de armazenamento, regulação e tratamento. Nem todos estes blocos têm de estar incluídos numa aplicação específica do SWMM (Rossman, 2007).



Processos Hidrológicos

As sub-bacias podem ser divididas em áreas impermeáveis e permeáveis. Nas áreas impermeáveis as perdas hidrológicas são apenas atribuídas à retenção superficial, enquanto que nas áreas permeáveis também é possível modelar a infiltração, através dos modelos de Horton, de Green-Ampt ou do SCS. Em ambos os tipos de área, o escoamento superficial é propagado pela equação de Manning. O SWMM permite a descrição de outras características e processos na área de estudo, para aplicações mais específicas, designadamente as relacionadas com o escoamento subsuperficial, as águas subterrâneas nos aquíferos e a queda de neve e degelo.

Propagação de escoamento

A propagação do escoamento em canais e colectores é modelada pelas equações de conservação de massa e de quantidade de movimento (equações de Saint-Venant), para escoamentos variáveis gradualmente variados. É dada ao utilizador a decisão do nível de simplificação das equações a utilizar, designadamente entre: o modelo de reservatório, o modelo cinemático; e o modelo dinâmico completo.

Qualidade da água

As cargas poluentes do escoamento superficial podem ser modeladas através de concentrações médias de eventos ou de equações de acumulação e de arrastamento de poluentes. Para a acumulação estão disponíveis equações de potência, de saturação e exponencial. Para o arrastamento têm-se taxas de erosão e funções exponenciais. O programa permite considerar os efeitos de diferentes ocupações do solo em cada sub-bacia, de lavagens dos pavimentos e de contribuições externas, em tempo seco e chuvoso.

2.2 - Descrição da bacia

A área de estudo localiza-se na Cidade de Odivelas e foi aprofundadamente estudada em trabalhos anteriores (David e Matos, 2000; David, 2002). A área modelada compreende (Figura 1):

- um colector interceptor (interceptor de Caneças), que serve um conjunto de bacias separativas com uma área total de 80 ha; devido ao funcionamento deficiente da rede de colectores a montante, durante a ocorrência de precipitações o interceptor entra em carga e descarrega para a Ribeira de Odivelas;
- uma bacia unitária com 22 ha (B1), em que, a meio do percurso, o colector principal recebe o colector interceptor anteriormente referido e, a jusante, existe um pequeno tanque de armazenamento com 70 m³ de capacidade;
- duas sub-bacias unitárias com 5 ha cada (B2-A e B2-B), que descarregam para o mesmo colector de descarga para o rio (B2-O).



Dispõem-se de registos da precipitação e do caudal monitorizados durante um período chuvoso de 3 meses, compreendendo 24 eventos de precipitação. Dispõem-se igualmente de dados de caracterização da qualidade da água, em tempo seco e chuvoso, para as cinco secções de monitorização nos colectores. As características das secções de monitorização e das bacias a montante encontram-se descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Secções de monitorização e respectivas bacias de drenagem

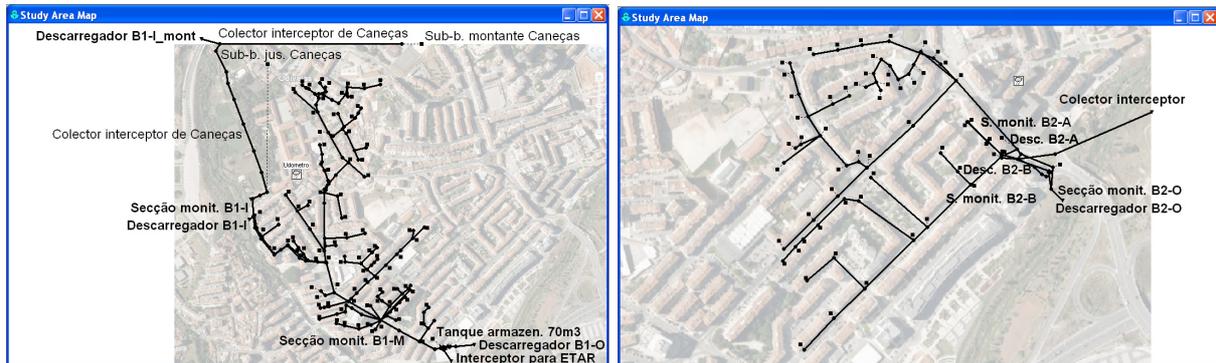
B1-I	Secção de monitorização: a jusante do colector interceptor de Caneças, que serve uma área estimada em 80 ha; devido ao funcionamento deficiente dos sistemas separativos a montante, o interceptor entra em carga durante a ocorrência de precipitações e descarrega para a Ribeira através de descarregadores de tempestade. Interceptor com comprimento de 2800 m, diâmetros de 300 e 400 mm e declive médio de 4%. Caudal médio diário de tempo seco: 84 l/s, incluindo caudal de infiltração.
B1-M	Secção de monitorização: a jusante da bacia unitária B1, cujo colector unitário principal recebe o caudal do interceptor B1-I. Área da bacia unitária: 22 ha. Área impermeável associada: 15 ha. Colectores unitários com secções circulares, ovóides e rectangulares, de 200 a 1000 mm, e comprimento total de 5400 m. Declive médio do terreno: 3.1%. Declive médio dos colectores: 3.1%. Caudal médio diário de tempo seco: 108 l/s (84 l/s do interceptor + 24 l/s).
B2-A	Secção de monitorização: a jusante da sub-bacia unitária B2 A. Área da sub bacia: 5,5 ha. Área impermeável: 5,0 ha. Colectores com diâmetros de 300, 400 e 500 mm, totalizando 1220 m. Declive médio do terreno: 4.9%. Declive médio dos colectores: 4.1%. Caudal de tempo seco: 16 a 20 l/s, incluindo caudal de infiltração.
B2-B	Secção de monitorização: a jusante da sub-bacia unitária B2 B. Área da sub bacia: 4.3 ha. Área impermeável: 4.0 ha. Colectores com diâmetros de 300 mm, em que apenas o de jusante é de 450 mm, com comprimento total de 870 m. Declive médio do terreno: 2.1%. Declive médio dos colectores: 2.1%. Caudal médio diário de tempo seco: 7 l/s.
B2-O	Secção de monitorização: colector de descarga da bacia unitária B2 para a ribeira (a jusante dos descarregadores de tempestade de B2-A e B2-B). Área da bacia: 10 ha. Área impermeável: 9.3 ha. Colectores com diâmetros de 300 a 800 mm, totalizando 2540 m. Declive médio do terreno: 3,6%. Declive médio dos colectores: 3.0%. Caudal médio diário de tempo seco: 23 a 27 l/s, incluindo a infiltração.

2.3 - Construção do modelo

A Figura 1 ilustra os mapas da área de estudo no SWMM, para os dois modelos construídos: a bacia unitária B1, juntamente com o sistema pseudo-separativo de Caneças; e a bacia unitária B2 (incluindo as sub-bacias B2-A e B2-B). Conforme se pode observar na Figura 1, no ambiente de trabalho do SWMM colocaram-se



fotografias do *Google Earth* como imagens de fundo e assinalaram-se as secções de monitorização e os colectores e dispositivos principais.



Sistema pseudo-separativo e bacia unitária B1

Bacia unitária B2 (sub-bacias B2-A e B2-B)

Figura 1 - Mapas da área de estudo do SWMM

As bacias unitárias B1, B2-A e B2-B foram modeladas em pormenor através de, respectivamente, 86, 34 e 17 sub-bacias. A bacia pseudo-separativa servida pelo interceptor de Caneças foi representada de uma forma mais conceptual por apenas duas sub-bacias dispostas em série, devido à falta de informação acerca das ligações indevidas e acerca dos dispositivos de descarga para a ribeira existentes a montante. A largura das bacias foi considerada igual à raiz quadrada da área, excepto para as duas bacias do sistema pseudo-separativo, que são consideravelmente alongadas.

A área impermeável de cada bacia foi inicialmente definida com base na análise feita à ocupação do terreno. Os pavimentos, os telhados e parte dos logradouros foram considerados impermeáveis. No entanto, esta representação teve de ser alterada devido a dificuldades encontradas durante a fase de calibração do modelo, conforme se explica na secção seguinte.

Para cada bacia de drenagem, determinaram-se os padrões médios diários dos hidrogramas de tempo seco, tanto para os dias de semana como para os de fim-de-semana, os quais foram introduzidos no modelo.

2.4 - Calibração e verificação do modelo hidráulico

Os modelos foram calibrados para 4 eventos de precipitação seleccionados e foram verificados inicialmente para 4 eventos e, posteriormente, para os restantes 16 eventos monitorizados durante a campanha de 3 meses. Foram obtidos resultados bastante satisfatórios para as bacias B1, B2-A e B2-B. No entanto, no caso do sistema pseudo-separativo (secção B1-I), observaram-se diferenças de resultados em alguns eventos de precipitação, atribuíveis à falta de informação acerca das ligações indevidas e acerca das descargas de tempestade existentes a montante. De facto, todos os descarregadores existentes no sistema de drenagem a montante foram conceptualmente representados por uma única estrutura de descarga, localizada a jusante da sub-bacia de Caneças (descarga B1-I_mont, no mapa do

lado esquerdo da Figura 1). Assim, o modelo conceptual do sistema pseudo-separativo de Caneças teve de ser recalibrado com base em 2 eventos de precipitação críticos.

Tal como foi referido na secção de construção do modelo, a área impermeável de cada sub-bacia foi inicialmente estimada a partir do estudo da ocupação do terreno. No entanto, os caudais originados pelas diversas áreas impermeáveis levavam a caudais a jusante superiores aos monitorizados, não sendo possível efectuar as reduções necessárias apenas com base na retenção superficial, que é a única perda que o SWMM considera para as áreas impermeáveis. A solução encontrada foi multiplicar todas as áreas impermeáveis por um coeficiente de redução hidrológica, tal faz o modelo hidrológico A do programa MOUSE (do *Danish Hydraulic Institute - DHI*).

Assim, a calibração consistiu fundamentalmente em ajustar os valores das áreas impermeáveis contribuintes, através da multiplicação por coeficientes de redução volumétrica constantes para cada secção de calibração. Acresce que, apesar de se dispor de medições para um período chuvoso com 3 meses, não era fácil nem se revelou necessário calibrar os parâmetros de infiltração das áreas permeáveis. Assim, pelo princípio da parcimónia dos parâmetros, a contribuição das áreas permeáveis para o escoamento foi considerada nula (através da atribuição de elevadas taxas de infiltração na equação de Horton). Esta solução apresenta o inconveniente de não preservar no modelo as áreas impermeáveis efectivamente medidas nem os valores dos coeficientes de redução hidrológica utilizados, mas unicamente o seu produto. As áreas impermeáveis dos modelos calibrados correspondem a 70% da área total para as sub-bacias B2-A e B2-B, a 60% para a bacia B1 e 30% para a bacia B1-I.

Conforme foi descrito anteriormente, a bacia unitária B1 recebe o caudal do interceptor de Caneças, o qual foi monitorizado na secção B1-I. Assim, a série de caudais medidos nesta secção foi utilizada como condição de fronteira para a calibração da bacia B1 a jusante. Atendendo ao reduzido tempo de concentração da bacia, interessava manter esta série de 3 meses com um intervalo de discretização temporal de 2 minutos. O SWMM não permitiu a importação da série através de um único ficheiro com a totalidade dos 3 meses de dados – o programa enviava uma mensagem de falta de memória (“*out of memory*”) – o que obrigou à divisão da série e das simulações em 3 períodos mensais. Este constrangimento é significativamente atenuado para o caso da importação de séries de precipitação, dado que o programa permite a remoção dos valores nulos da série correspondentes aos instantes de tempo seco (foram importados para o SWMM dados de 5 anos da série de precipitações de Lisboa, discretizados em intervalos de 10 minutos). Por outro lado, em alternativa à importação de séries de precipitação para o modelo, o SWMM também permite efectuar simulações utilizando dados de precipitação armazenados em ficheiros externos.

O SWMM permite a visualização conjunta dos resultados das simulações com os das medições, facilitando a comparação de resultados, tal como se ilustra na Figura



2. No entanto, esta opção não possibilita a visualização de períodos com duração inferior a 1 dia. Alternativamente, os resultados podem ser exportados ou copiados para ficheiros externos, possibilitando o seu tratamento e análise por outros programas. O tratamento em folhas de EXCEL permite ter gráficos e cálculos predefinidos para os diferentes eventos e para as diversas secções de calibração, facilitando e reduzindo significativamente o tempo de análise dos resultados de uma sucessão de simulações. Favorece igualmente o acrescento ou a redução de um valor fixo aos caudais simulados, permitindo ajustar o caudal de base às flutuações observadas de dia para dia, o que facilita a calibração dos eventos com menores intensidades de precipitação. A Figura 3 ilustra a calibração hidráulica e o ajuste das concentrações de sólidos suspensos totais (SST) para uma sucessão de pequenos eventos de precipitação, na secção B1-I (sistema pseudo-separativo), e para um evento intenso, na secção de descarga do sistema unitário B-O.

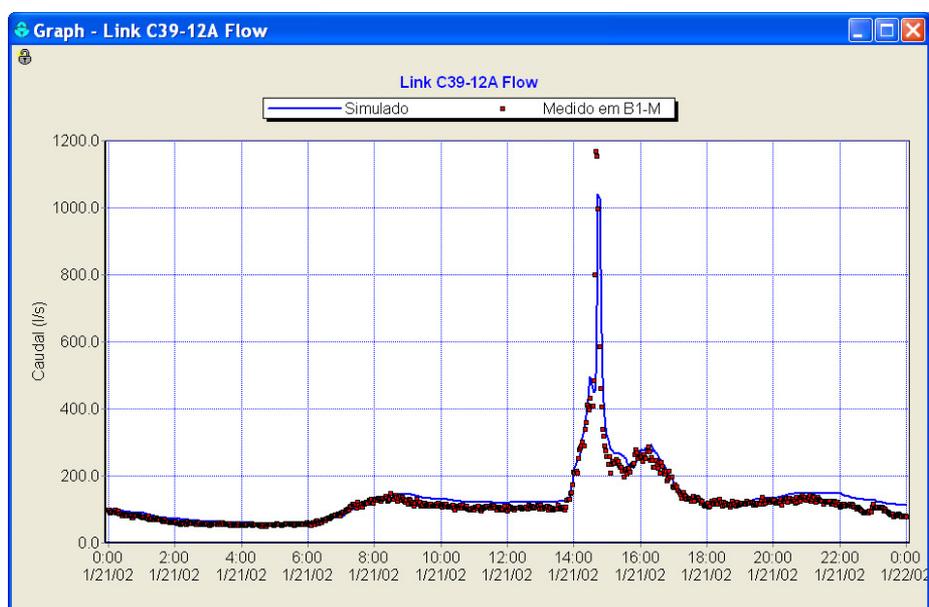


Figura 2 - Resultado da verificação do modelo na secção B1-M para um evento

2.5 - Ajuste dos coeficientes de qualidade da água

Procurou-se ajustar os coeficientes das equações de deposição e de arrastamento às medições de SST obtidas nas diferentes secções de medição, designadamente para 3 eventos de precipitação sucessivos, nas secções B1-I, B1-M, B2-A e B2-B, e para 2 eventos de precipitação na secção de descarga B2-O.

A equação de acumulação exponencial é dada por $B = C_1 \cdot (1 - e^{-C_2 \cdot t})$, em que: B é a quantidade de poluente acumulada por unidade de área (Kg/ha); C_1 é o máximo de acumulação (kg/ha); C_2 é a taxa de acumulação (1/dias); e t é o tempo (dias). A equação exponencial de arrastamento é dada por $W = C_3 \cdot q^{C_4} \cdot B$, em que: W é a quantidade de poluente arrastada por unidade de área (kg/(hora.ha)); q

é o caudal de escoamento superficial por unidade de área (mm/hora); C_3 é o coeficiente de arrastamento; e C_4 é um expoente.

Introduziram-se no SWMM padrões das concentrações de SST em tempo seco, determinados com base nos valores horários amostrados durante dois dias nas secções B1-I, B1-M, B2-A e B2-B.

As primeiras simulações foram efectuadas utilizando os valores de referência do SWMM para os coeficientes das equações de deposição e de arrastamento e, posteriormente, valores de literatura (Zhangand e Hamlett, 2006), mas os resultados das simulações apresentavam fluxos de cargas poluentes significativamente inferiores aos medidos. Após uma análise de sensibilidade aos coeficientes, estes foram ajustados iterativamente ao longo de uma série de simulações para os eventos medidos. Assumiram-se valores uniformes dos coeficientes de calibração em todas as sub-bacias de cada secção de monitorização. Para algumas secções de calibração, foram encontradas mais do que uma combinação de coeficientes que se ajustavam aos resultados de medidos. O ajuste deu-se por concluído quando se obtiveram resultados satisfatórios utilizando três coeficientes de calibração idênticos em todas as bacias, e apenas um coeficiente a variar de bacia para bacia, conforme indicado no Quadro 2.

A Figura 3 apresenta a comparação entre resultados simulados e os medidos nas secções de monitorização B1-I e B2-O. Em ambos os casos, as concentrações de SST em tempo de chuva excedem significativamente as concentrações médias e máximas de SST em tempo seco, o que mostra a importância dos processos de acumulação, arrastamento e transporte de poluentes. No entanto, apesar dos resultados de simulação obtidos, o número de eventos disponível não é suficiente para a calibração dos 4 coeficientes empíricos do modelo de SST de cada bacia. A incerteza associada ao modelo de qualidade da água é assim significativamente elevada.

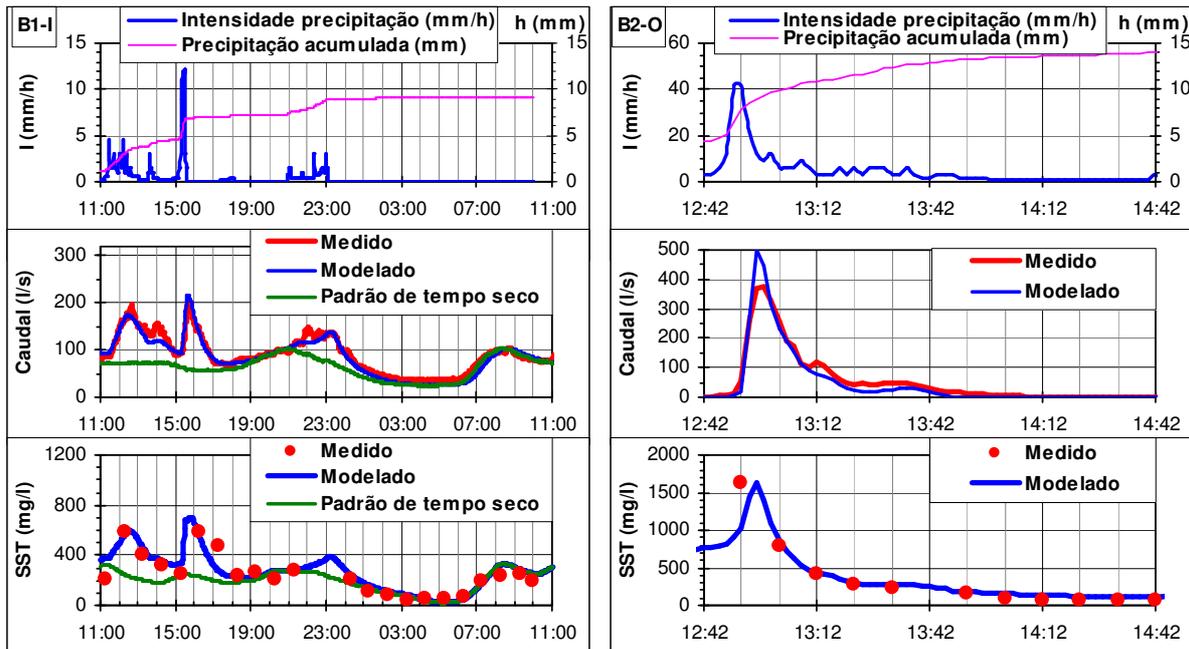


Figura 3 - Resultados da calibração hidráulica e de ajuste do modelo de SST nas secções B1-I (sistema pseudo-separativo) e B2-O (sistema unitário)

Quadro 2 - Valores obtidos para os coeficientes empíricos de modelação de SST

	Equação de acumulação		Equação de arrastamento	
	C_1	C_2	C_3	C_4
B1-I	132	0.08	0.13	1.26
B1-M	160	0.08	0.13	1.26
B2-A	80	0.08	0.13	1.26
B2-B	65	0.08	0.13	1.26
B2-O	450	0.08	0.13	1.26

3 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDRÁULICO ATRAVÉS DA MODELAÇÃO EVENTO-A-EVENTO

Os resultados das simulações podem ser visualizados no SWMM ou exportados na forma de relatórios, tabelas, hidrogramas, perfis longitudinais e outros gráficos. Os resultados podem ser fornecidos por variável (altura de água, caudal, volume armazenado, caudal de inundação, carga poluente, etc.) ou por objecto, nomeadamente, por nó (câmara de visita ou estrutura de armazenamento), por ligação (colector, orifício, bomba, etc.), por bacia de drenagem ou para a totalidade do sistema.

A Figura 4 ilustra a visualização de alguns resultados no ambiente de trabalho do SWMM5. A simulação foi efectuada utilizando um hietograma de projecto com período de retorno de 10 anos e duração do caudal máximo de 10 minutos (a duração da ponta do hietograma de projecto corresponde aproximadamente ao tempo de concentração da bacia). Na Figura pode-se observar:

- a planta da rede, com indicação do desempenho do sistema por cores;



- o hidrograma no colector de descarga para o rio; e
- um perfil longitudinal de um trecho seleccionado, com indicação da linha de energia, de entrada em carga de colectores e de extravasamento na câmara de visita de montante do trecho.

Na planta, às cores dos colectores e dos nós foi atribuído o seguinte significado:

- colectores a verde: caudal inferior a 40% da capacidade de vazão do colector;
- colectores a azul: caudal entre 40% e 60% da capacidade de vazão do colector;
- colectores a rosa: caudal entre 60% e 80% da capacidade de vazão do colector;
- colectores a vermelho: caudal superior a 80% da capacidade do colector;
- nós a verde: não inundados;
- nós a azul, rosa e vermelho correspondem a graus crescentes de inundação.

Os resultados das simulações indicaram que a bacia B1 apresenta um desempenho hidráulico adequado para as precipitações com períodos de retorno de 2 e 5 anos. Para o período de retorno de 10 anos, passam a ocorrer inundações devido a estrangulamentos localizados na rede de colectores.

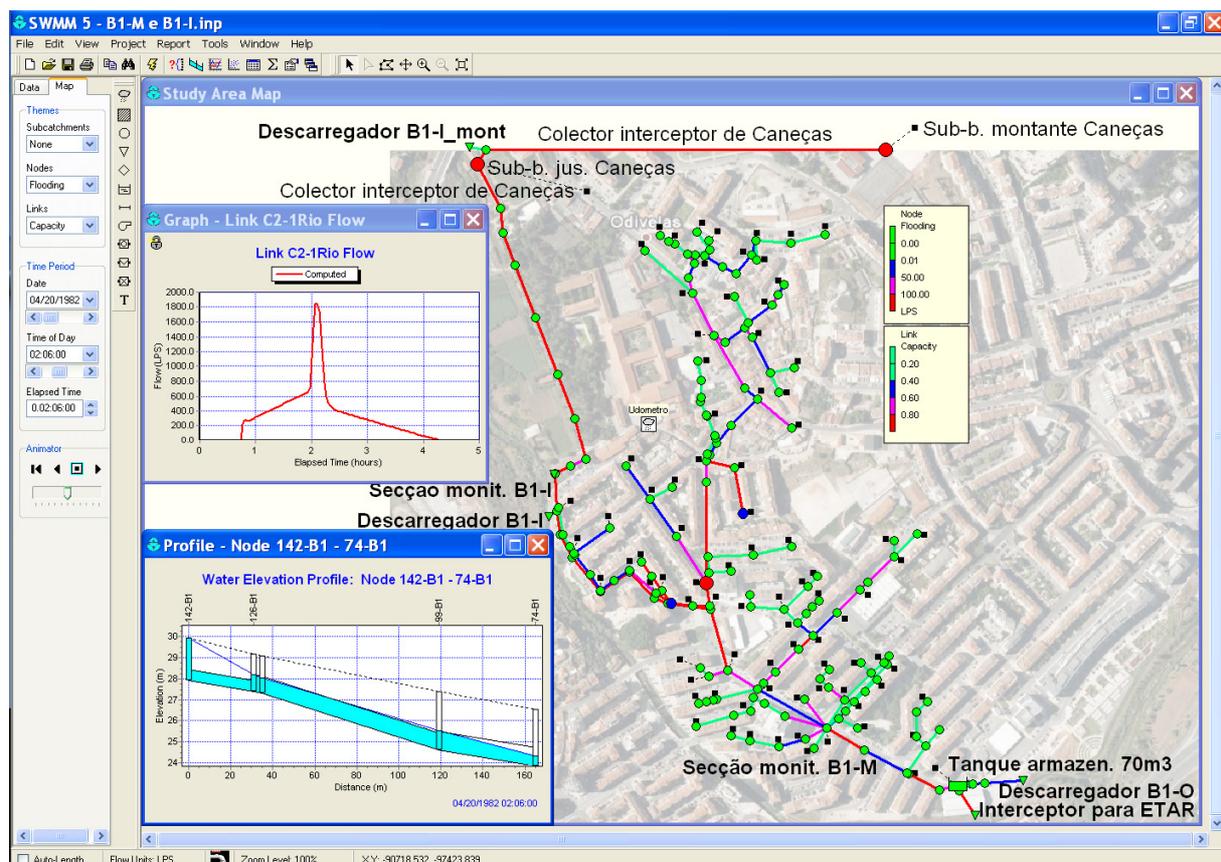


Figura 4 - Resultados para um hidrograma de projecto com período de retorno de 10 anos e caudal máximo de 10 minutos



4 - MODELAÇÃO CONTÍNUA PARA AVALIAÇÃO DAS DESCARGAS EM TEMPO DE CHUVA

Foram efectuadas simulações contínuas com o objectivo de avaliar os potenciais benefícios do reservatório localizado a jusante da bacia B1, com 70 m³ de capacidade, na redução de descargas em tempo de chuva para o meio receptor. Utilizando um computador com processador AMD 2.0GHz e 2GB de memória RAM, o modelo da bacia unitária B1 (incluindo o sistema pseudo-separativo de Caneças) demorou 16 horas a simular um período de 5 anos, com a série digitalizada de Lisboa (discretizada em intervalos de 10 minutos). Devido ao elevado tempo de cálculo e tendo em consideração o objectivo deste trabalho, as simulações contínuas apresentadas nesta secção foram efectuadas apenas para o período de 5 anos compreendido entre 1977 e 1982, que inclui os anos de precipitação média e máxima do período disponível de 19 anos.

Para além do tipo de resultados descrito na secção anterior, o SWMM5 também fornece estatísticas (médias, máximos, totais acumulados, durações e tempos entre eventos), histogramas e análises de frequência de variáveis, para períodos anuais, mensais, diários ou entre eventos, de maior utilidade no caso da modelação contínua. A Figura 5 ilustra algumas estatísticas seleccionadas relativamente ao caudal no nó de descarga para a ribeira B1-O. As estatísticas anuais do SWMM são calculadas com base no ano civil, enquanto que os dados introduzidos neste exemplo tiveram por base o ano hidrológico (com início a 1 de Outubro).

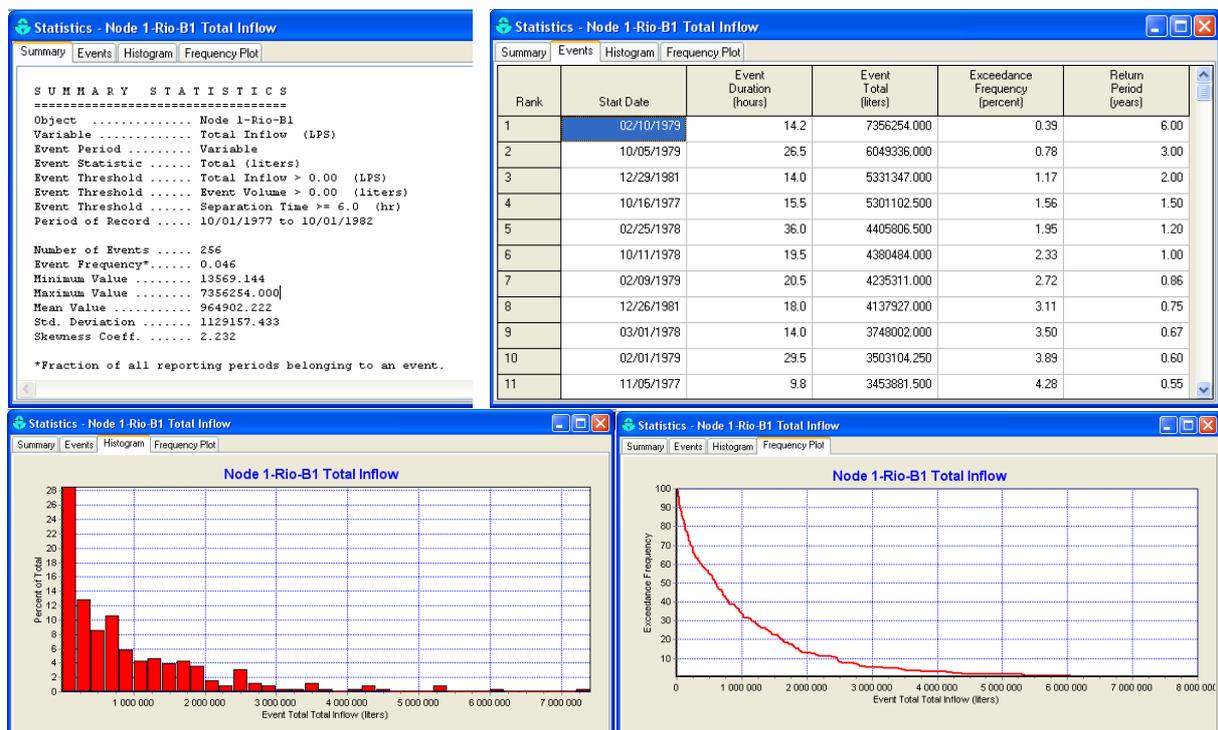


Figura 5 - Exemplo de resultados estatísticos do modelo: descargas em B1-O

De forma a avaliar os potenciais benefícios do tanque de armazenamento existente, com 70 m³, foram efectuadas simulações para a situação actual e para uma



situação sem armazenamento. Para as duas simulações, os caudais descarregados por cada um dos colectores de descarga da bacia B1 (B1-O, B1-I e B1-I_mont) foram exportados para ficheiros externos, tendo sido analisados em conjunto numa folha de cálculo de Excel. A Figura 6 compara o volume total descarregado pelos três colectores de descarga para os dois cenários simulados. Os resultados são apresentados para cada um dos cinco anos hidrológicos simulados e para a média anual. Também estão indicados os volumes de inundação ocorrida em cada ano e em média. Na estrutura de descarga B1-O, limitou-se o caudal que se admite passar para a ETAR ao valor de 220 l/s, correspondente ao dobro do caudal médio de tempo seco.

Os resultados apresentados na Figura 6 mostram que o tanque de armazenamento existente, com 70 m³, leva à redução de cerca de 16% dos volumes descarregados pela estrutura B1-O (entre 14% e 20%, dependendo do ano), correspondendo aproximadamente a 8% do volume total descarregado pela bacia (entre 7% e 11%).

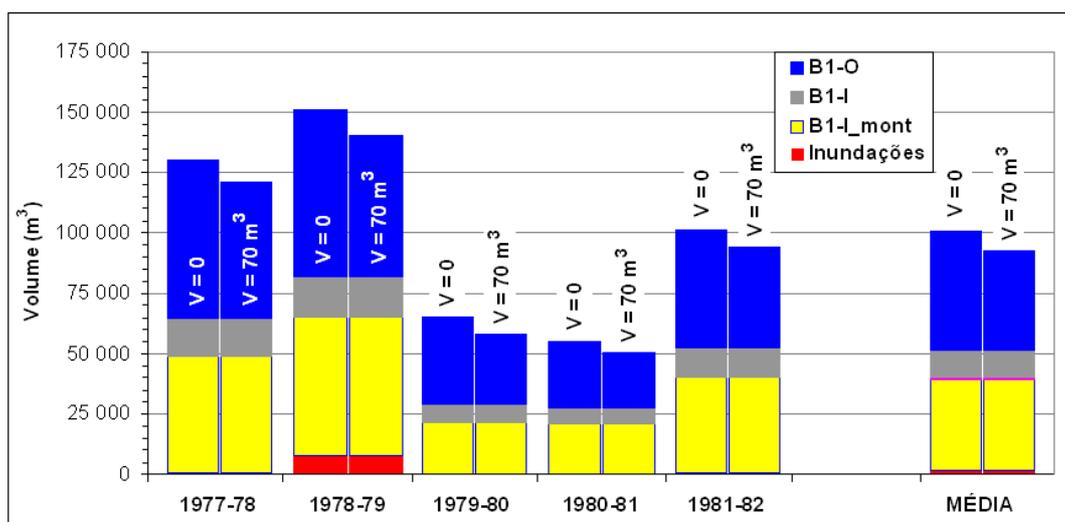


Figura 6 – Volumes anuais de descarga nos três colectores de descarga, para a situação actual e para o cenário sem o tanque de armazenamento

Foram efectuadas novas simulações admitindo a hipotética construção de tanques de armazenamento a montante de cada um dos três nós de descarga (B1-O, B1-I e B1-I_mont). Considerou-se a simulação dos dois seguintes cenários de armazenamento:

- 70 m³ em B1-O; 30 m³ em B1-I; e 160 m³ em B1-I_mont, totalizando 260 m³;
- 140 m³ em B1-O; 60 m³ em B1-I; e 320 m³ em B1-I_mont, totalizando 520 m³.



Nos descarregadores localizados a montante dos tanques de armazenamento, foram considerados dois cenários para os caudais admissíveis para jusante, com destino à ETAR:

- caudais de duas vezes o caudal de tempo seco ($Q_{ETAR} = 2.Q_{ts}$), resultando 220 l/s em B1-O, 165 l/s em B1-I e 140 l/s em B1-I_mont;
- caudais de quatro vezes o caudal de tempo seco ($Q_{ETAR} = 4.Q_{ts}$), resultando 440 l/s em B1-O, 230 l/s em B1-I e 280 l/s em B1-I_mont.

A Figura 7 apresenta a média anual dos volumes descarregados para os quatro cenários referidos anteriormente e também para os seguintes dois cenários:

- sem capacidade de armazenamento e com o caudal com destino à ETAR controlado unicamente em B1-O (como actualmente) para um valor máximo de duas vezes o caudal médio de tempo seco (220 l/s);
- sem capacidade de armazenamento e com o caudal com destino à ETAR controlado unicamente em B1-O para um valor máximo de quatro vezes o caudal médio de tempo seco (440 l/s).

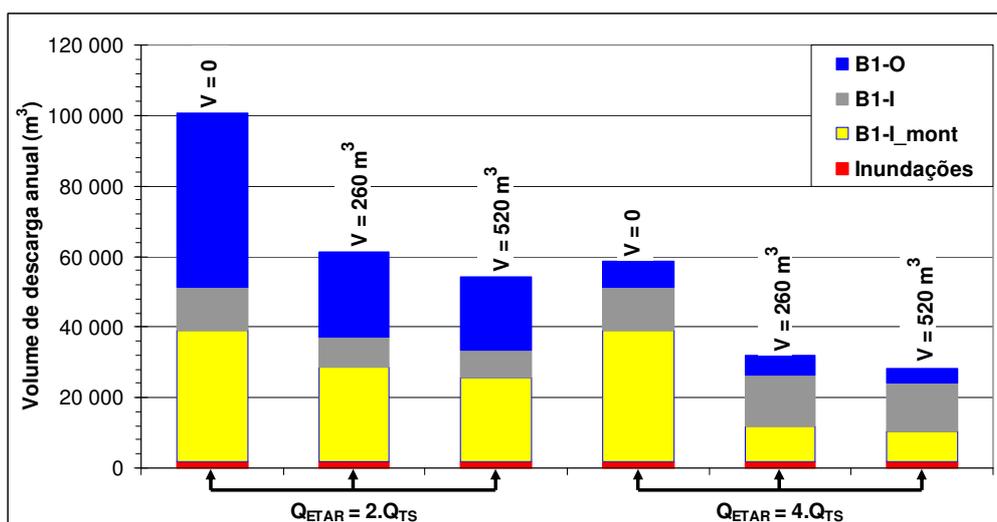


Figura 7 - Volumes de descarga médios anuais para os seis cenários simulados

Os resultados da Figura 7 mostram que os volumes descarregados para os cenários que totalizam uma capacidade de armazenamento de 260 m³ são significativamente inferiores aos descarregados para os cenários sem armazenamento, em ambas as situações do caudal limite com destino à ETAR. As reduções foram de 39% e de 46%, respectivamente para $Q_{ETAR} = 2.Q_{ts}$ e para $Q_{ETAR} = 4.Q_{ts}$. No entanto, para os cenários com o dobro da capacidade de armazenamento ($V = 520 m^3$), as reduções adicionais são de apenas 7%.

Ao aumentar os limites do caudal com destino à ETAR de 2 para 4 vezes o caudal médio de tempo seco, os volumes descarregados são reduzidos em 41% face ao cenário sem armazenamento, e em 48% para os dois cenários de armazenamento simulados ($V = 260 m^3$ e $V = 520 m^3$).



Foi efectuada uma análise semelhante de comparação dos SST descarregados para os seis cenários simulados, tendo-se obtido resultados muito idênticos aos apresentados para os volumes de água descarregada. Conclui-se que, para além do aumento das dificuldades, do tempo de cálculo e das incertezas associadas ao modelo da qualidade da água, a sua utilização pouco acrescentou à análise, pelo menos no âmbito do presente estudo.

5 - CONCLUSÕES

Recentemente foi lançada a versão 5.0 do SWMM, para o sistema Windows da Microsoft, gratuita e de fácil acesso para entidades gestoras de menor dimensão, consultores, universidades e estudantes. A perspectiva de constituir uma ferramenta comum a diversas entidades na gestão de sistemas de drenagem urbana poderá igualmente promover a sua utilização, à semelhança do que aconteceu com o programa EPANET para os sistemas de abastecimento de água.

Para além de permitir a simulação por eventos de precipitação, comum à generalidade dos modelos hidrodinâmicos disponíveis no mercado, o SWMM também permite simulações contínuas utilizando séries históricas de precipitação, fornecendo diversas estatísticas para os resultados. As séries de resultados também podem ser facilmente exportadas, possibilitando o seu tratamento e análise com ferramentas de cálculo externas, como o EXCEL.

Utilizando um computador com processador AMD 2.0GHz e 2GB de memória RAM, o SWMM5 demorou cerca de 16 horas para simular 5 anos de precipitações com as equações da onda dinâmica completa, para um modelo com 90 sub-bacias, 160 nós, 170 colectores e parâmetros da qualidade da água para um parâmetro poluente. A selecção do modelo da onda cinemática reduziria o tempo de cálculo, mas não permitiria entrar em consideração com os efeitos de regolfo e de entrada em carga.

As áreas impermeáveis de cada sub-bacia foram inicialmente modeladas com base na ocupação do terreno por pavimentos e telhados. No entanto, a única perda hidrológica que o SWMM utiliza para as áreas impermeáveis é a retenção superficial, a qual não é suficiente para efectuar as reduções de caudais necessárias para a calibração do modelo. A solução encontrada foi multiplicar todas as áreas impermeáveis por um coeficiente de redução hidrológica e anular a contribuição das áreas permeáveis (tal como é efectuada pelo modelo hidrológico A do programa MOUSE, do *Danish Hydraulic Institute*).

O facto do SWMM não incluir um coeficiente de redução hidrológica na caracterização hidrológica das áreas impermeáveis leva a que o coeficiente de impermeabilização seja usado como um parâmetro de calibração, tendo o inconveniente de não preservar no modelo as áreas impermeáveis efectivamente medidas de acordo com um determinado critério nem os valores dos coeficientes de redução resultantes da calibração, mas apenas o produto final daquelas variáveis.



A modelação contínua permitiu comparar os benefícios de diferentes cenários de armazenamento e do aumento dos caudais encaminhados para a ETAR, na redução dos volumes de águas residuais descarregadas em tempo chuvoso. A modelação dos SST aumentou significativamente as dificuldades e as incertezas associadas ao modelo, sem ter acrescentado benefícios aos resultados da análise, pelo menos no âmbito do presente estudo.

AGRADECIMENTOS

Parte do trabalho apresentado foi desenvolvido no âmbito do projecto co-financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia POCI/AMB/56349/2004, co-financiado pelo programa FEDER.

Os autores expressam o seu agradecimento ao INAG, pela disponibilização da série digital de precipitações da estação climatológica do Instituto Geofísico Infante Dom Luiz.

REFERÊNCIAS

DAVID L.M., MATOS R.S. (2000). Modelação hidráulica e da qualidade da água de um sistema de drenagem unitário em Odivelas, In IX Encontro Nacional de Saneamento Básico, Loures, 21 a 24 de Novembro de 2000.

DAVID L.M. (2002). Qualidade da água em tempo de chuva no sistema de drenagem urbana da Ribeira da Póvoa. In X Encontro Nacional de Saneamento Básico / SILUBESA, Braga, 16 a 19 de Setembro de 2002, em CD.

Huber W., Dickinson R. (1988). Storm Water Management Model Version 4, Part A. User's Manual, U.S. Environmental Research Agency. Office of Research and Development. EPA/600/3-88/001a.

Rossman L.A. (2007). Stormwater Management Model User's Manual, Version 5.0. U.S. Environmental Research Agency. EPA/600/R-05/040 Revised June 2007.

Zhang G., Hamlett J. M. (2006). Development of a SWMM water quality model for the FOX Hollow Watershed, Centre Country, PA. University Park, PA.