

**Análise de soluções de controlo na origem como
medida de compensação dos efeitos das alterações
climáticas em sistemas de drenagem urbanos**

Caso de Estudo da Av. Almirante Reis

Miguel de Carvalho Gonçalves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Orientador(es): Professora Doutora Filipa Maria Santos Ferreira; Eng^a Sara
Luisa Proença Garcia Cordeiro Dias Teles

Júri

Presidente: Professor Doutor António Alexandre Trigo Teixeira

Orientador: Professora Doutora Filipa Maria Santos Ferreira

Vogal: Professora Doutora Ana Fonseca Galvão

Setembro 2016

Agradecimentos

A realização da presente dissertação de mestrado constituiu uma experiência acadêmica e pessoal verdadeiramente gratificante, tendo-me permitido alargar os horizontes e conhecimentos em matérias não aprofundadas nas restantes disciplinas do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, para além de ter potenciado um forte incremento na minha motivação e interesse pela área de Engenharia de Hidráulica e Recursos Hídricos. O desenvolvimento desta dissertação e o entusiasmo com que a concretizei apenas foram possíveis com a valiosa contribuição que recebi por parte de algumas pessoas, às quais expresse o meu reconhecimento

Destaco, em primeiro lugar, o incedível apoio da Professora Filipa Ferreira, que me concedeu numerosas oportunidades, manifestou confiança nas minhas capacidades e me incentivou no desenvolvimento do tema. Agradeço, por isso, todos os conhecimentos, que com a sua sabedoria e competência, me transmitiu, bem como o tempo despendido para me proporcionar o melhor acompanhamento possível na realização e desenvolvimento da investigação.

À Eng^a Sara Proença, pelo apoio oferecido. O seu conhecimento e informação sobre a matéria foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Aos meus pais e família, que me incentivaram e motivaram ao longo do meu percurso académico e me proporcionaram todas as condições necessárias para que atingisse o sucesso.

Por fim, aos meus amigos, que me acompanharam durante o meu percurso académico pelo apoio e bom ambiente que me proporcionaram durante este período.

Resumo

Com o aumento da população mundial e a cada vez maior migração para os centros urbanos, as cidades têm sofrido um crescimento considerável. A este crescimento está associado uma diminuição das áreas permeáveis e consequente aumento do escoamento superficial, o que leva a que os sistemas de saneamento e de drenagem tenham um pior desempenho. Aliado a este factor, surgem ainda as alterações climáticas, que são cada vez mais uma fonte de pressão sobre os sistemas de drenagem urbanos. Esta redução de eficácia em drenar as águas pluviais leva a que surjam vários problemas nos centros urbanos, nomeadamente inundações urbanas, maior transporte de poluentes e contaminação dos meios receptores. Face a estes problemas a necessidade de resolução e adaptação às presentes e futuras alterações são cada vez mais um tópico fulcral nas sociedades de hoje em dia, sendo alvo de estudo e experimentação diversas soluções para esta problemática.

Nesta dissertação estuda-se a eficácia que as soluções de controlo na origem podem ter na bacia hidrográfica da Av. Almirante Reis, em Lisboa. Para tal, utilizam-se dois *softwares* de apoio à decisão e que permitem estudar o desempenho dos sistemas de drenagem, o SUSTAIN e o SWMM. A metodologia que se adopta consiste na criação de cenários com diferentes soluções de controlo na origem, utilizando o SUSTAIN, para que se possa seleccionar as medidas óptimas. De seguida, introduzindo a combinação de soluções de controlo na origem considerada mais vantajosa pelo modelo SUSTAIN no modelo SWMM da rede de drenagem, procedeu-se à análise do seu desempenho face a cenários de alterações climáticas. Deste modo, avaliou-se a eficácia que as diferentes combinações de soluções de controlo na origem podem ter no sistema da bacia hidrográfica em estudo.

Prova-se que estas medidas conseguem alguma eficácia na mitigação dos vários problemas que se fazem sentir hoje em dia nas cidades. No entanto, face aos custos de implantação associados, os benefícios conseguidos nas zonas ribeirinhas (zonas com maior risco associado), não são muito satisfatórios. Considerando-se, assim, que as soluções de controlo na origem não devem ser equacionadas como uma solução única, mas sim como um complemento num conjunto de soluções de âmbito mais alargado associadas à beneficiação dos sistemas de drenagem, designadamente armazenamento e desvio de caudais pluviais.

Palavras chave: Alterações climáticas; escoamento superficial; inundações urbanas; adaptação; sistemas de drenagem; soluções de controlo na origem; SUSTAIN; SWMM;

Abstract

Nowadays cities are experiencing a significant growth, mainly due to the increasing world population and the migratory movements to the urban centres. This urban growth leads to the increase of impervious surfaces and thereafter an increasing of the stormwater runoff, which causes a decreasing in the performance of the drainage systems. Worsening all this, the world is experiencing climatic changes that aggravate even more the drainage systems performances. With this decreasing come serious consequences in terms of flooding, transport of pollutants and contamination of natural systems. Therefore, the need for solutions and adaption to all this changes is nowadays a very important subject, existing under study and experimentation several solutions to this matter.

In this study is analysed the performance that the Best Management Practices (BMP) have in a small drainage basin in Lisbon, Av. Almirante Reis drainage basin. For such, are used two decision support systems software's, SUSTAIN and SWMM. The applied methodology consists at creating a model, in SUSTAIN, with a distribution of different BMP and from this model get the optimal dimensions for each BMP. After this, the BMP that can produce the best performance in stormwater runoff reductions, are inserted in a model of the drainage system, created in SWMM, where is analysed the performance that the BMP's induce in the drainage systems concerning climatic changes.

The results show that these solutions can lead to the mitigation of the negative impacts that the urban centres are experiencing, but not with the efficiency needed, especially in the riverside. Thus, with all the measures and techniques that we can use to mitigate this problem, the BMP's should not be seen as the "*one and only*" solution, but more as one of the solutions among a group of different measures that are used to adapt the drainage systems in the cities.

Keywords: Climatic changes; runoff; flooding; adaption; drainage systems; BMP – Best Management Practices; SUSTAIN; SWMM

Índice do Texto

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e justificação do tema	1
1.2	Objectivos	3
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	Sistemas de drenagem em meio urbano.....	4
2.1	Atuais desafios e solicitações.....	4
2.1.1	Crescimento Urbano.....	4
2.1.1.1	Inundações urbanas.....	5
2.1.1.2	Descargas diretas nos meios receptores.....	6
2.1.2	Alterações climáticas	7
2.1.2.1	Aumento da Temperatura.....	8
2.1.2.2	Subida do nível médio do mar.....	9
2.1.2.3	Aumento do número de eventos extremos.....	11
2.1.3	Novos desafios urbanos – Cidade Sustentável (<i>Blue-Green</i>).....	12
2.2	Soluções e medidas de adaptação	14
2.2.1	Principais medidas de adaptação	15
2.2.2	Soluções de controlo na origem	17
2.2.2.1	Trincheiras de Infiltração	17
2.2.2.2	Telhados Verdes	18
2.2.2.3	Detenção de águas pluviais dos telhados em barris	19
2.2.2.4	Bio-Retenção.....	20
2.2.2.5	Bacias de Detenção.....	20
2.2.2.6	Pavimentos Porosos.....	22
2.2.2.7	Valas revestidas com coberto vegetal	23
2.2.3	Planeamento Urbano Sustentável	24
2.2.3.1	Vantagens na implementação de um desenvolvimento urbano sustentável.....	25
2.2.3.2	Barreiras à implementação de um Planeamento Sustentável.....	26
3	Modelação do desempenho de sistemas.....	28
3.1	SUSTAIN (System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration Model)	28
3.1.1	Estrutura do SUSTAIN	29
3.1.1.1	Módulo de simulação do terreno	30

3.1.1.2	Módulo de simulação de BMP.....	34
3.1.1.3	Módulo de simulação de transporte	37
3.1.1.4	Módulo de Optimização.....	38
3.1.2	Interpretação de resultados.....	39
3.1.2.1	Caracterização de eventos pluviométricos.....	39
3.1.2.2	Visualizador de eventos pluviométricos.....	40
3.1.2.3	Síntese do desempenho dos BMP	40
3.1.2.4	Curva de custo eficiência	41
3.2	SWMM (Storm Water Management Model).....	42
3.2.1	Estrutura e principais módulos do <i>software</i>	43
3.2.2	Principais objetos utilizados.....	43
3.2.3	Visualização dos resultados fornecidos.....	45
4	Caso de Estudo: Modelação do desempenho de soluções de controlo na origem e do sistema de drenagem da bacia hidrográfica da Av. Almirante Reis	46
4.1	Caracterização da bacia hidrográfica em estudo	46
4.1.1	Seleção da Bacia hidrográfica da Av. Almirante Reis.....	47
4.1.2	Delimitação da área de modelação	48
4.1.3	Tipo de solo	49
4.1.4	Tipo de Ocupação urbana	50
4.2	Metodologia adoptada.....	51
4.3	Modelação de desempenho de Soluções de Controlo na Origem.....	52
4.3.1	Objectivo de redução	52
4.3.2	Seleção de Soluções de Controlo na Origem e locais de implantação.....	53
4.3.2.1	Bacias de Detenção.....	53
4.3.2.2	Telhados Verdes	55
4.3.2.3	Trincheiras de Infiltração	55
4.3.2.4	Pavimentos Porosos.....	55
4.3.3	Divisão e Caracterização das Sub-bacias.....	56
4.3.4	Caracterização das Soluções de Controlo na Origem utilizadas.....	58
4.3.4.1	Bacias de Detenção.....	58
4.3.4.2	Telhados Verdes	58
4.3.4.3	Trincheiras de Infiltração	60
4.3.4.4	Pavimentos Porosos.....	61
4.3.4.5	Cenário final e caracterização dos colectores.....	62
4.3.5	Apresentação de resultados.....	62
4.3.5.1	Considerações Gerais	62

4.3.5.2	Resultados obtidos	63
4.3.5.3	Resultados consolidados dos vários Tempos de Retorno	65
4.4	Modelação do desempenho de Sistemas de Drenagem.....	67
4.4.1	Apresentação do modelo do sistema de drenagem urbano utilizado.....	67
4.4.2	Síntese das características geométricas das soluções de controlo na origem introduzidas no modelo SWMM	68
4.4.3	Caracterização dos vários cenários	68
4.4.4	Introdução e modelação das soluções de controlo na origem no SWMM.....	69
4.4.4.1	Bacias de detenção	69
4.4.4.2	Telhados verdes, Trincheiras de infiltração; Pavimentos Porosos	70
4.4.5	Apresentação de resultados.....	70
4.4.5.1	Identificação de pontos críticos no sistema de drenagem.	71
4.5	Considerações finais	76
5	Síntese e Conclusões	78
5.1	Sugestões para futuros desenvolvimentos.....	80
	Referências Bibliográficas.....	81
	Anexos	88
	Anexo 1 – Representação final da divisão em sub-bacias	a
	Anexo 2 – Representação final do modelo no SUSTAIN	b
	Anexo 3 – Esquema do modelo final do SUSTAIN.....	c
	Anexo 4 – Resultados para os diferentes tempos de retorno	d
	Anexo 5 – Comparação entre os vários cenários do perfil do sistema de drenagem.....	j
	Anexo 6 – Comparação entre os vários cenários para o perfil do Troço 1	k
	Anexo 7 – Comparação entre os vários cenários para o perfil do Troço 2	l

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Principais mudanças e agravantes na hidrologia dos terrenos com o crescimento urbano. Adaptado de (Roesner et al., 2001).	5
Figura 2.2 – Gráficos ilustrativos das alterações na temperatura devido às variações climáticas naturais e devido às emissões antropogénicas (IPCC, 2013).	8
Figura 2.3 – Gráfico representativo da subida do nível médio do mar ao longo dos anos.	9
Figura 2.4 – Mapa ilustrativo das tendências do nível do mar na Europa (PSMSL).	10
Figura 2.5 – Esquema ilustrativo da relação entre a subida do nível médio do mar, precipitação intensa e a drenagem urbana (Oliveira, 2013).	11
Figura 2.6 – Esquema ilustrativo em que se compara as diferenças no ciclo hidrológico, consoante o tipo de planeamento urbano (Water by Design, 2009).	13
Figura 2.7 – Esquema genérico de um ciclo de controlo com <i>feedback</i> (Machado, 2014).	16
Figura 2.8 – Tipos de alimentação de trincheiras de infiltração (Azzout et al, 1994).	17
Figura 2.9 - Exemplo de um “ <i>Extensive Green Roof</i> ” (Environmental Department of Düsseldorf, 2009).	18
Figura 2.10 - Exemplo de um “ <i>Intensive Green Roof</i> ” (Albert, 2010).	19
Figura 2.11 – Esquema e imagem exemplificativos da solução de controlo de origem “ <i>Rain Barrels</i> ”. Adaptado de (Prince George's County - Department of Environmental Resources, 1999).	19
Figura 2.12 - Exemplo de uma bacia de detenção a seco (USEPA, 1995).	21
Figura 2.13 - Exemplo de uma bacia de detenção com nível de água permanente (USEPA, 1995).	21
Figura 2.14 – Imagens representativas do funcionamento e constituição de pavimentos porosos (Adaptadas de (Huffman, 2008); (Matos M. R., 1999a)).	22
Figura 2.15 – Comparação entre os dois tipos de pavimentos adaptado de (Huffman, 2008).	22
Figura 2.16 – Imagem e esquema ilustrativo do funcionamento de valas revestidas com coberto vegetal (Adaptadas de (Chesapeake Stormwater Network, 2014); (Prince George's County - Department of Environmental Resources, 1999).	23
Figura 2.17 – Exemplo de uma solução possível de infiltração e detenção de água no espaço	

urbano em Paris. Adaptado de (EIVP, 2013).....	25
Figura 3.1 – Esquema representativo da estrutura do SUSTAIN.	29
Figura 3.2 – Esquema ilustrativo dos processos intervenientes no módulo de simulação do terreno, adaptado de (USEPA, 2009)	30
Figura 3.3 – Exemplo de excerto de um ficheiro de precipitação.	31
Figura 3.4 – Representação conceptual da criação do escoamento superficial no módulo de simulação do terreno.....	33
Figura 3.5 – Esquema ilustrativo dos processos hidrológicos simulados pelo SUSTAIN nos diversos BMP, adaptado de (USEPA, 2009).....	34
Figura 3.6 – Esquema ilustrativo do funcionamento da estrutura de armazenamento subterrâneo (Carvalho, 2012).	36
Figura 3.7 – Exemplo de um gráfico referente a um ficheiro meteorológico. Comparação entre o número de eventos pluviométricos e o número de horas a seco entre eventos, adaptado de (USEPA, 2009).....	39
Figura 3.8 – Exemplo de um acontecimento pluviométrico para três cenários distintos, adaptado de (USEPA, 2009).....	40
Figura 3.9 – Exemplo de gráficos para a redução do caudal de ponta, num intervalo temporal com 34 eventos pluviais, adaptado de (USEPA, 2009)	41
Figura 3.10 – Exemplo de uma curva de custo eficiência, adaptado de (USEPA, 2009)	41
Figura 3.11 – Exemplo de uma distribuição de custos de BMP face ao custo total de implantação de uma determinada solução quase-ótima, adaptado de (USEPA, 2009)	42
Figura 4.1 – Imagens representativas da hipsometria da Av. Almirante Reis e gráfico de barras representativo das zonas da cidade de Lisboa com mais inundações (Adaptadas de (Câmara Municipal de Lisboa, 2010); (Oliveira e Ramos, 2002)).	47
Figura 4.2 – Fotografias de prédios existentes na Av. Almirante Reis em avançado estado de degradação.	48
Figura 4.3 - Delimitação da bacia hidrográfica da Avenida Almirante Reis	48
Figura 4.4 – Representação de parte da Carta Geológica do Concelho de Lisboa (Adaptado de (Câmara Municipal de Lisboa, 2010))	49
Figura 4.5 – Esquema ilustrativo dos elementos identificados na bacia e divisão entre áreas permeáveis e impermeáveis.	50
Figura 4.6 – Gráfico representativo do evento pluviométrico que foi utilizado para solicitar os modelos.....	51
Figura 4.7 – Identificação e localização dos locais escolhidos para implantação de bacias de	

detenção.....	54
Figura 4.8 – Possíveis soluções que podem ser idealizadas para deter as águas pluviais....	54
Figura 4.9 – Exemplo real do que se pretende modelar e representar para esta solução de controlo na origem, adaptado de Castleton et al. (2010)	55
Figura 4.10 – Exemplo de uma possível solução para a recolha do escoamento superficial.	55
Figura 4.11 – Representação das áreas selecionadas para implantação de pavimento poroso e exemplos práticos de aplicação desta solução.	56
Figura 4.12 – Esquema ilustrativo de um sistema de drenagem constituído por BMP, adaptado de (USEPA, 2009).....	56
Figura 4.13 – Divisão da bacia hidrográfica em estudo em várias sub-bacias	57
Figura 4.14 – Localização no modelo da solução de controlo na origem, telhados verdes, com identificação numérica.....	60
Figura 4.15 – Curva Custo-Eficiência obtida para um evento de precipitação com T5	63
Figura 4.16 – Gráfico representativo da percentagem que cada solução de controlo na origem representa no custo total da solução. Refira-se que a repartição de custos para a solução óptima está representado no gráfico circular.....	64
Figura 4.17 – Representação das curvas de escoamento para os vários cenários.....	65
Figura 4.18 – Curvas custo-eficiência para diferentes tempos de retorno.....	66
Figura 4.19 – Representação do modelo em SWMM do sistema de drenagem unitário das bacias hidrográficas da Av. Da Liberdade e da Av. Almirante Reis	67
Figura 4.20 – Representação geométrica e perfil das bacias de retenção no SWMM	70
Figura 4.21 – Identificação dos troços a jusante que se vão avaliar.....	71
Figura 4.22 – Identificação em planta do perfil do sistema de drenagem.....	71
Figura 4.23 – Comparação entre os perfis do sistema de drenagem desde o nó de cabeceira até ao ponto mais a jusante, para os diferentes cenários definidos	72
Figura 4.24 – Perfis do Troço 1 para os diferentes cenários considerados	73
Figura 4.25 – Gráfico da variação do caudal, na conduta T104, para os diferentes cenários ao longo do período de simulação	73
Figura 4.26 – Perfis do Troço 2 para os diferentes cenários considerados	74
Figura 4.27 – Gráficos representativos do escoamento na conduta 146. Em cima, gráfico da evolução do caudal na conduta ao longo do tempo de simulação. Em baixo, gráfico da evolução da capacidade da conduta.....	75

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Exemplos de inundações urbanas que causaram grandes estragos (Schiermeier, 2011).....	6
Quadro 2.2 –Aumento em percentagem da intensidade, em vários países Europeus, de eventos de precipitação de uma hora para um período de retorno de 100 anos (Larsen et al., 2009).	12
Quadro 2.3 – Taxas de remoção de nutrientes e poluentes através da Bio-retenção (PGDER, 1993) (Davis et al., 1998).	20
Quadro 4.1 – Parâmetros de referencia do modelo de Green-Ampt, adaptado de (Maidment, 1993)	50
Quadro 4.2 - Intervalo de valores do parâmetro variável que se considerou.....	58
Quadro 4.3 – Síntese dos parâmetros comuns às várias bacias de retenção	58
Quadro 4.4 – Características base de uma unidade de telhado verde	59
Quadro 4.5 – Síntese do número variável máximo de unidades de telhado verde.....	59
Quadro 4.6 – Intervalo de valores do parâmetro variável que se considerou.....	60
Quadro 4.7 – Síntese dos parâmetros comuns e fixos às diferentes trincheiras de infiltração	61
Quadro 4.8 – Intervalo de valores que o comprimento de cada pavimento poroso poderá assumir.....	61
Quadro 4.9 – Síntese dos parâmetros comuns e fixos dos pavimentos porosos	62
Quadro 4.10 – Análise dos parâmetros variáveis de cada BMP consoante a solução.....	64
Quadro 4.11 – Síntese dos valores finais de percentagem de redução e custo das 5 soluções analisadas	65
Quadro 4.12 – Consolidado das percentagens de redução e custo para os diferentes tempos de retorno	66
Quadro 4.13 – Consolidado dos principais parâmetros dos BMP da solução escolhida	68

Simbologia e Notações

BMP – Best Management Practices

LID – Low Impact Development

SUDS – Sustainable Urban Drainage Systems

CTR – Controlo em Tempo Real

SUSTAIN – System for Urban Stormwater Treatment and Analysis INtegration

SWMM – Storm Water Management Model

GEE – Gases de Efeito de Estufa

SIG – Sistema de Informação Geográfico

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

ESRI – Environmental Systems Research Institute

CML – Câmara Municipal de Lisboa

PGDL – Plano Geral de Drenagem de Lisboa

1 Introdução

Neste capítulo pretende-se fazer uma breve descrição do tema, estrutura e organização desta tese. Primeiramente, faz-se um enquadramento e justificação do tema, tentando enquadrar o mesmo na situação atual que se vive no mundo e em Portugal. É também neste contexto que se introduz um pouco o estado de arte que existe atualmente relativamente ao tema em questão. Finalmente, faz-se uma breve descrição da estrutura adoptada nesta dissertação e como se desenvolve a temática ao longo do documento que se apresenta.

1.1 Enquadramento e justificação do tema

Atualmente, grande parte da população mundial vive nos centros urbanos, o que leva a que cada vez mais estes lugares tenham que ter condições e espaço para acomodar maior número de pessoas. A necessidade de crescimento das cidades, e conseqüente aumento das áreas urbanizadas, provoca alterações consideráveis na quantidade de água que se infiltra no solo, levando a que o escoamento superficial aumente. Por consequência, os sistemas de drenagem nas zonas históricas das cidades, sistemas mais antigos e muitas vezes unitários, foram-se tornando sub-dimensionados (Roesner et al., 2001). Aliado à migração de grande parte da população mundial para os centros urbanos, temos ainda as alterações climáticas que se têm vindo a agravar, em grande parte por influência antropogénica. Alterações essas, que têm levado a um aumento dos eventos de precipitação extremos e subida do nível médio do mar.

Este aumento populacional dos centros urbanos a que temos assistido aliado às alterações climáticas, leva a que as condições de saneamento e sistemas de drenagem das cidades estejam cada vez mais sobrecarregados, gerando em muitos casos problemas de inundações e graves prejuízos materiais e conseqüentemente económicos. Assim, a necessidade de adaptação e de novas soluções para estes sistemas nas cidades, é um dos principais temas de discussão e estudo da atualidade.

Em Portugal, mais especificamente na cidade de Lisboa, estes problemas são atualmente uma realidade. O crescimento da cidade e da população, levaram a um aumento dos caudais que o sistema de drenagem tem que transportar. Assim, o sistema que encontramos nas zonas ribeirinhas e de cotas mais baixas, em grande maioria unitários, está a ficar sub-dimensionado. A agravar este facto, temos experienciado um aumento significativo de fenómenos de precipitação extremos e conseqüentemente de inundações urbanas, ou “*flashfloods*” (Leboeuf, et al., 2015)

A cidade de Lisboa, sendo uma cidade costeira, enfrenta outro desafio, a subida do nível médio das águas do mar. Este problema, para além de afectar diretamente as zonas ribeirinhas, afecta também o sistema de drenagem da cidade, não permitindo o correto escoamento dos caudais nas zonas baixas e permitindo assim a acumulação de água das chuvas superficialmente nas ruas da cidade.

Todas estas agravantes juntas, criam um grave problema para as cidades e para o seu funcionamento, sendo este um tópico que tem vindo a ser largamente discutido. Assim, várias soluções surgiram para mitigar este problema.

A solução tradicional passa por simplesmente aumentar a capacidade das tubagens do sistema de drenagem. Esta é, no entanto, uma solução que implica grandes custos económicos e políticos, não sendo uma solução resiliente e sustentável. Surgiram algumas soluções mais baseadas na tecnologia, como os sistemas de controlo em tempo real (CTR), este tipo de medida será melhor explicada na capítulo 2.2. Com o aumento da capacidade tecnológica que o mundo tem experienciado, este tipo de soluções tem ganho grande popularidade. As soluções de controlo na origem têm também sido alvo de estudo e experimentação, tendo já sido aplicadas algumas destas soluções nas cidades. Este tipo de soluções promove a infiltração e detenção das águas pluviais, tentando que os espaços urbanos tenham menos zonas impermeáveis e promovendo a renaturalização destes espaços (Water by Design, 2009). Existem ainda outro tipo de soluções que passam pelo desvio dos caudais das zonas mais afectadas, designadamente por meio de túneis que intersectam o sistema de drenagem atual.

A cidade de Lisboa já tem previsto a realização de algumas destas medidas no seu PGDL (Plano Geral de Drenagem de Lisboa), nomeadamente a realização de um túnel que intersecte os principais colectores, permitindo o desvio dos caudais em excesso para zonas mais a jusante do sistema de drenagem. Neste plano de drenagem está ainda previsto construir-se bacias de detenção, realizar-se o reforço e reabilitação de alguns colectores e aplicação de soluções de controlo na origem em alguns pontos da cidade. A CML (Câmara de Lisboa) pretende ainda desenvolver instrumentos regulamentares para garantir que soluções de controlo na origem sejam equacionadas em novos empreendimentos, de maneira a que este tipo de soluções sejam planeadas logo nas fases preliminares do projeto com recomendação de técnicos da CML (Leboeuf et al., 2015).

Qualquer uma destas soluções, apresentam elevados custos de implantação e inúmeras vantagens e desvantagens. Atualmente, com a capacidade tecnológica de que dispomos, todas estas soluções podem ser primeiro modeladas e estudadas em termos de possível eficácia que possam ter, existindo cada vez mais *softwares* de apoio à decisão aos agentes envolvidos na definição dos sistemas de drenagem. De facto, a evolução e aplicação de grande parte de soluções inovadoras foi sendo acompanhada com a introdução de modelos de análise computacional, e , há semelhança de outras áreas de interesse na sociedade, a utilização destas ferramentas tem-se revelado claramente vantajosa numa perspectiva de apoio à decisão (Carvalho, 2012).

1.2 Objectivos

O principal objectivo desta dissertação é estudar o comportamento e eficácia das soluções de controlo na origem numa bacia urbana com uma alta densidade de urbanização. Para tal, escolheu-se a bacia urbana da Avenida Almirante Reis, em Lisboa. Esta bacia atualmente, apresenta alguns problemas na drenagem das águas pluviais, sendo uma das bacias que descarrega em zonas muito mais problemáticas da cidade, como a baixa pombalina. Posto isto, o estudo de soluções para mitigar os problemas de drenagem, passa por encontrar e estudar soluções para as bacias de cabeceira e para as bacias mais problemáticas, sendo as soluções de controlo na origem uma das muitas soluções possíveis. Utilizam-se assim, dois *softwares* de apoio que permitem estudar a eficácia e os benefícios, que podem resultar da utilização das soluções de controlo na origem para o desempenho global do sistema de drenagem da cidade.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este documento está organizado em 5 capítulos. Sendo o primeiro capítulo reservado para a introdução, onde se faz uma breve descrição do tema, enquadramento e definição dos objectivos gerais.

O segundo capítulo está dividido em dois subcapítulos. Um primeiro em que se apresentam os principais problemas que os sistemas de drenagem apresentam atualmente, tentando desenvolver sobre os factores causadores destes problemas. Um segundo em que se desenvolve sobre algumas das soluções que se podem adoptar para mitigar os principais problemas identificados.

No terceiro capítulo, pretende-se fazer uma breve introdução e descrição dos *softwares* que são utilizados neste trabalho. Este capítulo é baseado no manual de apoio dos mesmos programas.

No quarto capítulo é apresentado o caso prático em que se estuda a eficácia das soluções de controlo na origem. Faz-se uma breve descrição da bacia em estudo, descrevem-se os métodos utilizados na caracterização dos modelos conceptuais, apresentam-se os resultados obtidos e sua análise. No final do capítulo fazem-se as conclusões finais referentes ao caso de estudo.

Finalmente no quinto capítulo, faz-se uma síntese do trabalho que foi desenvolvido e apresentam-se as conclusões que se retiraram do trabalho face aos objectivos que foram inicialmente definidos.

No final deste documento, apresentam-se as fontes que foram utilizadas e alguns anexos que complementam o trabalho desenvolvido.

2 Sistemas de drenagem em meio urbano

As alterações climáticas são cada vez mais percebidas como uma fonte de pressão sobre os sistemas de drenagem urbanos. A subida do nível médio do mar e as alterações nos regimes de precipitação são exemplos de mudanças que põem em risco o bom funcionamento da drenagem urbana. Outro factor que influencia a capacidade de vazão dos sistemas de drenagem, é a cada vez maior impermeabilização das cidades, que leva a um aumento do escoamento superficial e contaminação dos meios receptores. Assim, os problemas atuais que se fazem sentir nos sistemas de drenagem urbanos são, em parte, devidos às alterações climáticas e ao crescimento e planeamento urbano que se realiza hoje em dia.

Tendo em conta todos estes problemas, que vão crescendo ao longo dos anos, a necessidade de resolução e adaptação às presentes e futuras alterações, são cada vez mais um tópico fulcral nas sociedades.

Neste capítulo, pretende-se desenvolver o tema das alterações climáticas e as implicações que estas trazem para o meio urbano. Começa-se por descrever as principais problemáticas atualmente existentes nos meios urbanos: inundações urbanas, descargas de poluentes para os meios receptores, ilha de calor urbana entre outros. De seguida enumeram-se algumas alterações climáticas, nomeadamente a subida do nível do mar e o aumento de eventos extremos, relacionando-as com os principais problemas que existem nas cidades e nos seus sistemas de drenagem. Por fim, apresentam-se algumas soluções e medidas de adaptação que se podem tomar para combater os problemas, cada vez maiores, que surgem devido às alterações climáticas.

2.1 Atuais desafios e solicitações

2.1.1 Crescimento Urbano

Com o crescimento exponencial que as cidades sofreram no século XX e XXI, geraram-se alterações significativas no ciclo hidrológico natural bem como no ambiente envolvente às mesmas. Essas alterações, criaram e continuam a criar, diversos problemas no meio urbano e na qualidade de vida das populações. Atualmente existem vários problemas associados aos meios urbanos, nomeadamente inundações, descargas sem tratamento nos meios receptores, gases de efeito de estufa entre outros. Todos estes problemas têm uma estreita relação com as alterações climáticas que surgem atualmente.

2.1.1.1 Inundações urbanas

As inundações urbanas formam-se em tecido urbano num curto espaço de tempo (dezenas de minutos) no seguimento de fortes chuvadas, cujas consequências são agravadas pela forte impermeabilização das cidades (Oliveira e Ramos, 2002). Os terrenos naturais, isto é sem grandes desenvolvimentos urbanos, têm grande capacidade de retenção das águas pluviais através de fenómenos de infiltração e de evapotranspiração. Com o desenvolvimento urbano, grande parte do solo é coberto por áreas impermeáveis (estradas, passeios, telhados etc.), levando a uma diminuição da taxa de infiltração, gerando maiores escoamentos superficiais. Na Figura 2.1 apresenta-se um esquema ilustrativo deste fenómeno.

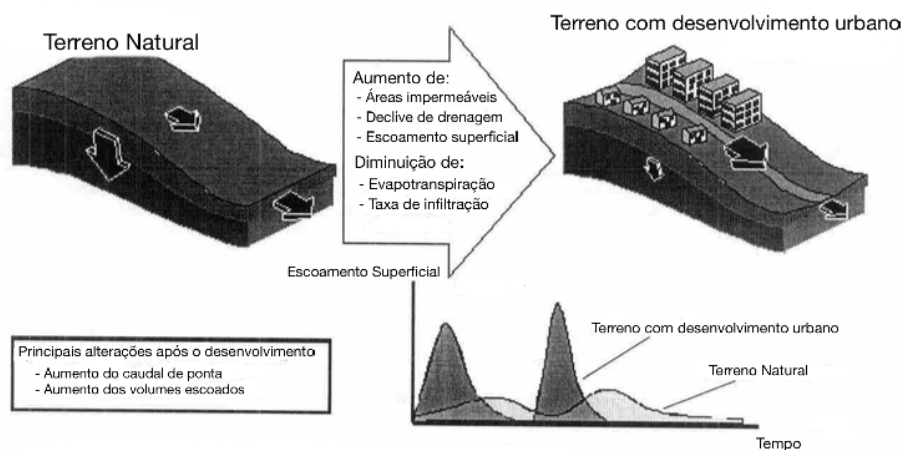


Figura 2.1 – Principais mudanças e agravantes na hidrologia dos terrenos com o crescimento urbano. Adaptado de (Roesner et al., 2001).

Outro factor que pode afectar as inundações urbanas é a canalização subterrânea e a obstrução de pequenos cursos de água que, antes da urbanização, eram responsáveis pela drenagem das cidades (Oliveira e Ramos, 2002).

Com o aumento do volume de escoamento superficial e o curto espaço de tempo em que as fortes chuvadas ocorrem, os sistemas de drenagem, muitas vezes, não têm a capacidade de escoamento necessária, levando a que se gerem inundações no tecido urbano. As zonas urbanas com maior probabilidade de se inundarem, são zonas não declivosas e as zonas para onde converge o escoamento, podendo gerar-se alturas de água bastante consideráveis. Nos locais mais declivosos os escoamentos superficiais podem atingir grandes velocidades, podendo levar a grandes perdas materiais (Oliveira e Ramos, 2002); (Oliveira, 2013). Nas cidades costeiras a influência das marés também afecta o funcionamento dos sistemas de drenagem, podendo dar-se a obstrução da drenagem. A cidade de Lisboa é um bom exemplo, em que a ocorrência de chuvadas intensas durante a maré –alta provocam, em regra, problemas na drenagem da cidade.

O crescimento urbano e o aumento do número de pessoas nos centros urbanos, levou a grandes aumentos nos danos materiais provocados pelas inundações urbanas. Atualmente, as inundações urbanas são dos desastres naturais mais dispendiosos a nível global. Segundo um relatório realizado pela Agência Ambiental Europeia, as inundações urbanas foram as catástrofes naturais que mais

danos materiais provocaram na Europa no período de 1998 a 2009, com perdas na ordem dos 52 bilhões de euros. A nível mundial, segundo o *International Strategy for Disaster Reduction* (ISDR) este foi o desastre natural com maiores ocorrências a nível mundial (Price et al., 2011). No Quadro 2.1 é possível observar algumas das inundações a nível mundial que provocaram mais danos, tanto pessoais como materiais.

Quadro 2.1 – Exemplos de inundações urbanas que causaram grandes estragos (Schiermeier, 2011).

Período	Região	Perdas materiais (bilhões de €)	Mortes
Maio - Setembro (1998)	China	27,6	4150
Junho - Agosto (1996)	China	21,6	3050
Junho - Agosto (1993)	EUA	18,9	50
Agosto (2002)	Europa	14,8	40
Julho - Agosto (1995)	Coreia do Norte	13,5	70

Entende-se assim, que as inundações urbanas são uma problemática muito dispendiosa hoje em dia, podendo vir a ser agravadas pelas alterações climáticas que se fazem sentir, pelo que o investimento em medidas de adaptação, consideradas dispendiosas, pode ser mais económico. Assim, muitos países estão a começar a investir quantidades consideráveis de dinheiro em estudos e na construção deste tipo de medidas.

2.1.1.2 Descargas diretas nos meios receptores

Grande parte das cidades sofreram um desenvolvimento em torno de zonas litorais ou zonas perto de cursos de água, utilizando-os como meios receptores para as águas residuais e pluviais. Os sistemas de drenagem são desenvolvidos de maneira a que as águas pluviais e residuais, ao serem recolhidas sejam encaminhadas para as ETAR, sendo depois tratadas e restituídas nos meios receptores. No entanto, muitas vezes a ETAR excede a sua capacidade máxima, não sendo possível fazer o tratamento das águas. Nessa altura, torna-se necessária a realização de descargas diretas nos meios receptores, deteriorando os ecossistemas dos mesmos.

Com o crescimento urbano e o aumento populacional das cidades, houve um aumento nos caudais afluentes à rede de drenagem, levando a que o número de descargas diretas sofresse um aumento. A própria atividade humana provoca a poluição da superfície das bacias de drenagem, levando a que as escorrências pluviais arrastem os poluentes para os meios receptores, agravando as condições ambientais (Ferreira e David, 2014), atualmente as águas das escorrências superficiais são dos principais poluentes dos cursos de água em muitos países (Barbosa et al., 2012). Assim, os eventos de precipitação que provoquem a excedência dos sistemas de drenagem podem criar graves problemas de poluição dos meios receptores. Os principais poluentes existentes nos escoamentos superficiais e nas águas residuais são, sólidos suspensos totais, nutrientes (fósforo e azoto), metais pesados e coliformes fecais. Segundo Roesner et al., 2001, os eventos de precipitação têm um impacto bastante negativo nos ecossistemas dos meios receptores devido aos seus constituintes, no entanto o verdadeiro problema não está nos poluentes mas sim no escoamento descontrolado que muitas vezes ocorre nos meios urbanos. Logo, é a opinião do autor, que para resolver o problema da poluição dos meios receptores é necessário, primeiramente, resolver os problemas de escoamentos

superficiais. Se este controlo for devido, então os problemas de poluição ficam praticamente resolvidos.

O excesso de descargas diretas pode afectar também o caudal de pequenos cursos de água. O aumento do caudal pode provocar problemas de erosão e/ou açoramento e aumento da velocidade de escoamento, deteriorando-se a morfologia do curso de água e pondo em causa os habitats e ecossistemas do mesmo.

A poluição e os problemas ambientais, são parâmetros cada vez mais considerados nas leis dos vários países. Com as crescentes alterações climáticas que se fazem sentir, a água é cada vez mais um elemento sob pressão, pelo que a sua manutenção e proteção é cada vez mais um tópico nas sociedades de hoje em dia. Assim sendo, a necessidade de controlo das descargas diretas é um dos problemas e desafios que os sistemas de drenagem urbanos enfrentam.

2.1.2 Alterações climáticas

As alterações climáticas são fenómenos complexos e difíceis de quantificar, o que complica a integração de políticas de prevenção e de adaptação no processo de decisão política. A comunidade científica tem-se dedicado ao estudo das alterações climáticas, tentando determinar através de simulações a evolução do clima e de factores associados a este. Para a comunidade científica o facto de o clima variar não é motivo de preocupação, pois o clima nunca foi constante. A preocupação reside nas ações antropogénicas que, através das emissões de gases de efeito de estufa (GEE) e extensiva alteração do uso do solo, têm acelerado o processo de mudanças climáticas (Oliveira, 2013); (Paupério, 2011). Assim, os estudos que se têm feito, são na óptica de estudar as alterações que já ocorreram e prever as mudanças que possam vir a ocorrer. Repare-se que qualquer previsão que se faça tem de ter em conta vários cenários de emissão de GEE, pois as alterações climáticas que se fazem sentir estão intimamente relacionadas com estas emissões. Assim, foram elaborados pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) cenários de emissões relacionados com o desenvolvimento socioeconómico e de governação, apelidados de RCP's. Havendo cenários que implicam ações antropogénicas mais determinantes nas mudanças climáticas e outros com menores influências antropogénicas (IPCC, 2013). Os cenários permitem compreender a evolução da temperatura em relação às emissões e, através dos modelos climáticos, projetar as futuras alterações de um determinado fenómeno, como a subida do nível do mar, as alterações de precipitação ou o aumento de períodos de seca.

Atualmente, os meios urbanos já têm diversos problemas, no entanto as alterações climáticas que se fazem sentir hoje em dia podem agravá-los. As mudanças climáticas ocorrem a vários níveis, desde a temperatura média terrestre à humidade relativa do ar, no entanto algumas destas alterações são mais preponderantes no agravamento dos problemas dos sistemas de drenagem urbanos que se fazem sentir. Assim, desenvolvem-se apenas algumas das principais alterações climáticas que se consideram trazer mais consequências para os sistemas de drenagem urbanos e suas populações.

2.1.2.1 Aumento da Temperatura

Quando falamos de alterações climáticas é impossível não fazer referência às alterações de temperatura que se têm desenvolvido. É devido ao aumento da temperatura, que muitas das alterações e mudanças no clima se têm dado.

A temperatura sofre alterações naturalmente devido à própria variabilidade interna do sistema climático ou às diferenças na alteração do equilíbrio de energia do sistema Terra-Atmosfera devido às alterações orbitais do planeta. No entanto, estas variações são agravadas pelo aumento das emissões antropogénicas, nomeadamente gases de efeito de estufa (GEE). Na Figura 2.2 é possível observar gráficos ilustrativos que comparam a evolução da temperatura global, segundo modelos com variações de origem antropogénicas e naturais.

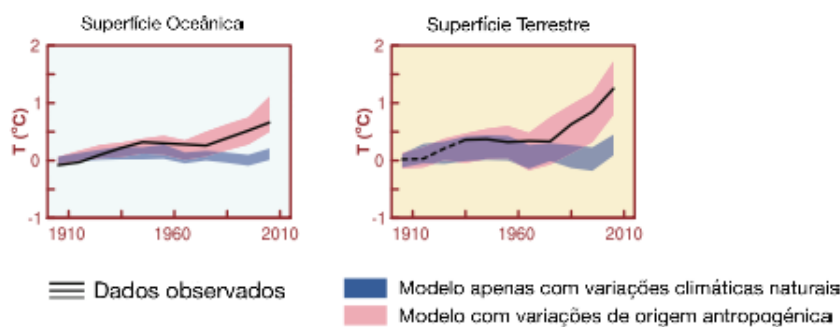


Figura 2.2 – Gráficos ilustrativos das alterações na temperatura devido às variações climáticas naturais e devido às emissões antropogénicas (IPCC, 2013).

As observações e dados colectados nos últimos 50 anos, provam que tem havido um aumento sucessivo ao longo dos anos, da temperatura média global. Segundo o IPCC (2013), a temperatura global combinada da superfície terrestre e oceânica, sofreu um aquecimento de 0,85 °C no período de 1880 a 2012, com uma maior tendência de aumento nas últimas três décadas. Prevê-se que no fim do século XXI venha a ocorrer um aumento de cerca de 1,5 °C, em relação ao período de 1850 a 1900 (sendo este o valor que vai ser excedido em todos os cenários RCP).

É importante perceber-se que, as alterações climáticas não tomam as mesmas proporções em qualquer região do globo, havendo pequenas variações consoante a região em estudo. O Ártico, por exemplo, tem sofrido aumentos de temperatura mais substanciais que o resto dos continentes. Assim, certos fenómenos, que estão indiretamente associados ao aumento da temperatura, têm também diferentes proporções geográficas.

Com o aumento da temperatura, os problemas que já existem nos meios urbanos e nos respectivos sistemas de drenagem podem vir a ser agravados. Neste caso, são agravados indiretamente por alteração de outros factores, ou seja, o facto da temperatura aumentar leva à diminuição global das áreas cobertas pelo gelo e neve, subida do nível médio do mar, a alteração dos padrões de vento e chuva, o aumento generalizado de precipitações extremas, o aumento do número e intensidade de eventos extremos. Todas estas alterações podem agravar os atuais problemas de inundações e descargas nos meios receptores que alguns meios urbanos têm.

2.1.2.2 Subida do nível médio do mar

Das várias mudanças que o planeta está a sofrer, a subida do nível médio do mar é das alterações que mais se tem falado. É provavelmente, dos maiores desafios que as cidades costeiras enfrentam, pois implica uma grande necessidade de adaptação.

A comunidade científica crê que este fenómeno é, principalmente, devido a dois factores.

- A expansão térmica dos oceanos.
- Perda de massa por parte dos glaciares e mantos de gelo.

Ambos os factores estão diretamente relacionados com o aumento da temperatura global, sendo que o primeiro factor é responsável por cerca de 30 a 40% da subida do nível médio do mar. O derretimento das massas de gelo, tem sido dos principais responsáveis pela subida do nível do mar mais acentuada nas últimas décadas. Segundo o IPCC (2013), a expansão térmica dos oceanos contribuiu com 1,1 mm/ano para a subida do nível médio do mar, o derretimento dos glaciares contribuiu com 0,76 mm/ano, os mantos de gelo antárticos e da Gronelândia com 0,6 mm/ano e as reservas terrestres de água com cerca de 0,38 mm/ano. Somando as contribuições de todas as parcelas obtemos o valor anual médio da subida do nível médio do mar, 2,8 mm/ano. É importante referir que, a resposta dos Oceanos ao aumento da temperatura não é imediato, ou seja, existe um desfasamento de cerca de 18 anos no efeito da variação da temperatura sobre o nível do mar, com um aumento de 0,16 m por cada grau. Assim, provavelmente, o oceano ainda não entrou em equilíbrio com o aquecimento induzido pelas atividades antropogénicas, prevendo-se uma subida do nível do mar nos próximos anos (Dias e Taborda, 1988). Na Figura 2.3 representa-se um gráfico ilustrativo do fenómeno descrito. As várias linhas a cores representam diferentes conjuntos de dados, sendo as linhas a cores sombreadas representativas das incertezas de cada série de dados.

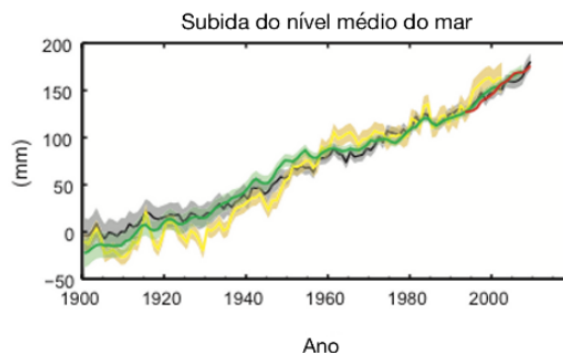


Figura 2.3 – Gráfico representativo da subida do nível médio do mar ao longo dos anos.

O nível médio do mar vai continuar a subir ao longo do século XXI, provavelmente a taxas mais elevadas que as observadas nas últimas décadas. Os modelos de previsão criados foram considerados pouco fiáveis, não havendo provas e dados suficientes para se definirem valores muito específicos. Assim, as projeções que se definiram apontam para subidas do nível médio do mar entre 0,3 e 0,8 m para o período de 2081 a 2100 (IPCC, 2013).

Como já foi referido, todos os fenómenos de alteração climáticas fazem-se sentir de maneiras

diferentes consoante a região e local. A subida do nível médio do mar é distribuída regionalmente, com variações de -10 a 10 mm/ano devido a diferenças de temperatura das águas do oceano, consequência da circulação oceânica e dos regimes de ventos (Katsman, 2011). O derretimento das massas de gelo também influencia a distribuição da subida do nível do mar devido a fenómenos de atração gravítica, sendo a subida superior em regiões afastadas do local do derretimento. Atualmente, a principal causa da distribuição regional deve-se às diferenças de temperatura do oceano, prevendo-se que o futuro derretimento das massas de gelo altere os atuais padrões (Meysnignac e Cazenave, 2012). A Figura 2.4 ilustra estas diferenças geográficas no continente Europeu.

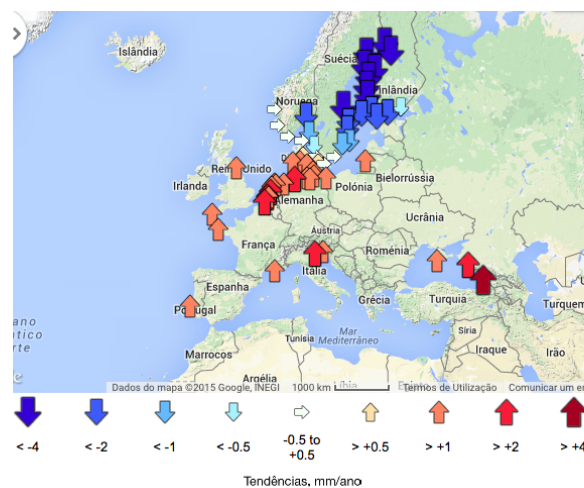


Figura 2.4 – Mapa ilustrativo das tendências do nível do mar na Europa (PSMSL – Permanent Service for Mean Sea Level).

Em Portugal a evolução da subida do nível médio do mar tem acompanhado a tendência global, segundo a análise de dados retirados da estação maregráfica de Cascais, concluiu-se que o nível médio do mar apresenta uma tendência de subida de 1,9 mm/ano (Dias e Taborda, 1988); (Antunes, 2012). Segundo Antunes, 2012, as previsões para 2050 são uma subida de entre 38 e 46 cm face ao valor registado em 2012.

A subida do nível médio do mar aliada a fenómenos de precipitação extrema podem agravar em muito os problemas de inundação urbana e de poluição dos meios receptores que já se fazem sentir, principalmente nas cidades costeiras. Em algumas cidades costeiras, como Lisboa, quando a maré alta coincide com fenómenos de precipitação extremos, ocorrem inundações urbanas. Este fenómeno acontece, devido ao efeito tampão que se cria no fim da rede de drenagem, impossibilitando o correto funcionamento dos sistemas de drenagem. Deste modo, pequenas alterações na amplitude das marés, devido à subida do nível do mar, vão levar a que os pontos de descarga estejam continuamente obstruídos, criando-se inundações urbanas. Na Figura 2.5 pode-se observar um esquema ilustrativo deste tipo de situação.



Figura 2.5 – Esquema ilustrativo da relação entre a subida do nível médio do mar, precipitação intensa e a drenagem urbana (Oliveira, 2013).

2.1.2.3 Aumento do número de eventos extremos

Com os estudos já realizados, não resta qualquer dúvida de que as alterações climáticas são em parte fruto de uma influência antropogénica. No entanto, no que toca a alterações regionais, nomeadamente alterações na intensidade de precipitação e eventos extremos, a relação com as atividades antropogénicas não é fácil de medir. Segundo De Toffol, 2009, as alterações nos regimes de precipitação não têm grande correlação com as atividades antropogénicas, sendo devidas a ciclos naturais. Já Schiermeier, 2011 defende que, com a evolução dos modelos climáticos e da capacidade computacional, a comunidade científica pode agora afirmar, com alguma confiança, que as alterações na intensidade dos eventos extremos não é só explicada pela variabilidade natural do clima, mas também por influência antropogénica. Não existe, portanto, grande consenso na comunidade científica no que respeita à influência das atividades humanas nos eventos de precipitação extremos. No entanto, conclui-se que o número de eventos extremos está a aumentar, seja por influência humana ou não, portanto a necessidade de adaptação é cada vez maior (De Toffol, 2009).

Segundo a comunidade científica, o princípio físico que leva ao aumento da intensidade de precipitação em certas regiões, é baseado no aumento do vapor de água na atmosfera. Uma atmosfera aquecida pode carregar maiores quantidades de vapor de água, cerca de 6 a 7% por °C de aquecimento da superfície terrestre, implicando um aumento da intensidade da precipitação (Oliveira, 2013). Desta forma, com os aumentos de temperatura que se têm registado, também o vapor de água tem aumentado a sua concentração, levando à ocorrência de mais eventos pluviométricos extremos. Nas últimas décadas têm-se registado eventos extremos em várias regiões, nomeadamente, na China, Europa e EUA. Também num estudo levado a cabo por Millán, 2014, concluiu-se que zonas perto de mares interiores (Mar Mediterrâneo, Mar da China, Mar do Japão etc) têm mais apetência para grandes períodos de secas ou precipitações extremas, devido à acumulação de vapor de água sobre essas regiões. Tendo este processo influência nos regimes de precipitação das zonas adjacentes.

Estes eventos ocorrem localmente e esporadicamente, sendo de difícil previsão, no entanto, os estudos apontam para um aumento da probabilidade de ocorrência. Segundo Schiermeier, 2011, o risco de ocorrerem inundações devido a precipitações extremas pode vir a duplicar no final do século XXI, quer isto dizer que eventos com um período de retorno maior passarão a ocorrer com mais frequência. Num estudo levado a cabo por Larsen et al., 2009, conclui-se que os eventos de precipitação extrema vão aumentar em toda a Europa, mas com mais intensidade nos países

nórdicos. No Quadro 2.2 é possível observar as previsões referentes ao aumento da intensidade para um evento de uma hora e um período de retorno de 100 anos, em vários países Europeus.

Quadro 2.2 –Aumento em percentagem da intensidade, em vários países Europeus, de eventos de precipitação de uma hora para um período de retorno de 100 anos (Larsen et al., 2009).

Países	Intensidade controlo (1961-1990) (mm/h)	Intensidade prevista (2071-2100) (mm/h)	Aumento (%)
França	22,05	29,77	35%
Reino Unido	16,21	20,26	25%
Suécia	15,86	33,31	110%
Roménia	14,98	19,62	31%
Espanha	18,02	21,98	22%
Áustria	17,70	21,42	21%
Dinamarca	18,48	29,57	60%

Em Portugal as previsões apontam para uma redução na quantidade de precipitação anual, no entanto espera-se um aumento na intensidade diária, implicando assim um maior número de eventos extremos. Prevê-se que uma precipitação com um período de retorno de 20 anos passe a ocorrer entre 15 a 18 anos, sendo a sua intensidade igualmente agravada em cerca de 10 a 20% (Oliveira, 2013).

Os sistemas de drenagem são dimensionados para determinados eventos de precipitação correspondentes a um tempo de retorno, não estando preparados para controlar eventos de grande intensidade com uma probabilidade de ocorrência menor. Assim, segundo as previsões, os eventos com tempos de retorno maiores vão passar a ocorrer com mais frequência, implicando um sucessivo subdimensionamento dos sistemas de drenagem. Logo, com aumento do número de eventos extremos, também o número de inundações urbanas vai aumentar. Refira-se que, o aumento do período de secas também pode gerar problemas, nomeadamente na redução da capacidade de auto-limpeza das tubagens e aumento das cargas poluentes nos caudais de *first-flush*, resultando em dificuldades à exploração das ETAR. O aumento de inundações urbanas implica também um aumento das descargas diretas nos meios receptores, agravando a qualidade dos ecossistemas.

2.1.3 Novos desafios urbanos – Cidade Sustentável (Blue-Green)

Os desafios urbanos que surgem atualmente são cada vez maiores, pois tendo em conta a forma dos centros urbanos e as alterações climáticas nos processos hidrológicos, as cidades ficam cada vez mais expostas a fenómenos de inundações. O aumento da intensidade de precipitação implicará não só caudais maiores como também menores tempos de concentração das bacias urbanas, dependendo o seu escoamento da periodicidade da emissão costeira. No entanto, com a subida do nível do mar, a obstrução dos pontos de descarga coincidente com fenómenos de precipitação intensos leva a que as inundações ganhem uma maior amplitude, aumentando a duração destas e consequentemente a quantidade de água acumulada. Num contexto em que as precipitações intensas e a subida do nível do mar são já uma realidade presente e com forte tendência de agravamento, as dificuldades na drenagem urbana aumentam, principalmente devido ao

subdimensionamento da rede de drenagem e à progressiva obstrução dos seus pontos de descarga. Assim, um dos desafios urbanos atuais passa por arranjar soluções para estes problemas, adaptando as cidades às novas dinâmicas de escoamento na perspectiva de mitigar o número de inundações urbanas (Oliveira, 2013).

A inviabilidade prática da reconstrução integral dos sistemas de drenagem, implica que a adaptação incorpore soluções inovadoras, em que a drenagem urbana deixe de estar tão dependente dos sistemas atuais, criando-se soluções mais resilientes e que permitam uma adaptação sustentável face às mudanças que se preveem, surge assim o conceito da “*Blue-Green City*”. Este conceito tem como principal objectivo redesenhar as cidades de maneira a mitigar os seus problemas atuais, tentando renaturalizar as bacias de drenagem e restaurando o ciclo hidrológico natural, para tal, utilizam-se “soluções verdes” que utilizam processos naturais para atingir os objectivos pretendidos (Voskamp e Van de Ven, 2015); (Water by Design, 2009). Assim, criam-se zonas permeáveis que realizam processos hidrológicos e, ao mesmo tempo, ajudam na drenagem urbana permitindo a infiltração da água e reduzindo a velocidade do escoamento superficial. Para além deste tipo de soluções, é imprescindível também a criação de soluções de retenção da água que permitem a sua acumulação, pois este é um elemento essencial para a manutenção das soluções verdes, principalmente em períodos de seca (Voskamp e Van de Ven, 2015). Algumas medidas, passam também por criar espaço para a água, renovar pequenos cursos de água, permitir que a água entre no espaço urbano nos locais preparados para tal, criando-se assim o conceito de “viver com a água” em vez de a evitar a todo o custo. Com estas soluções, ditas “*Blue and Green*”, é possível aumentar os tempos de concentração das bacias urbanas, permitindo atenuar os problemas que os sistemas de drenagem enfrentam hoje, melhorando o controlo sobre as inundações urbanas. Na Figura 2.6 é possível observar um esquema em que se compara as alterações no ciclo hidrológico numa cidade atual com uma “*Blue-Green City*”.

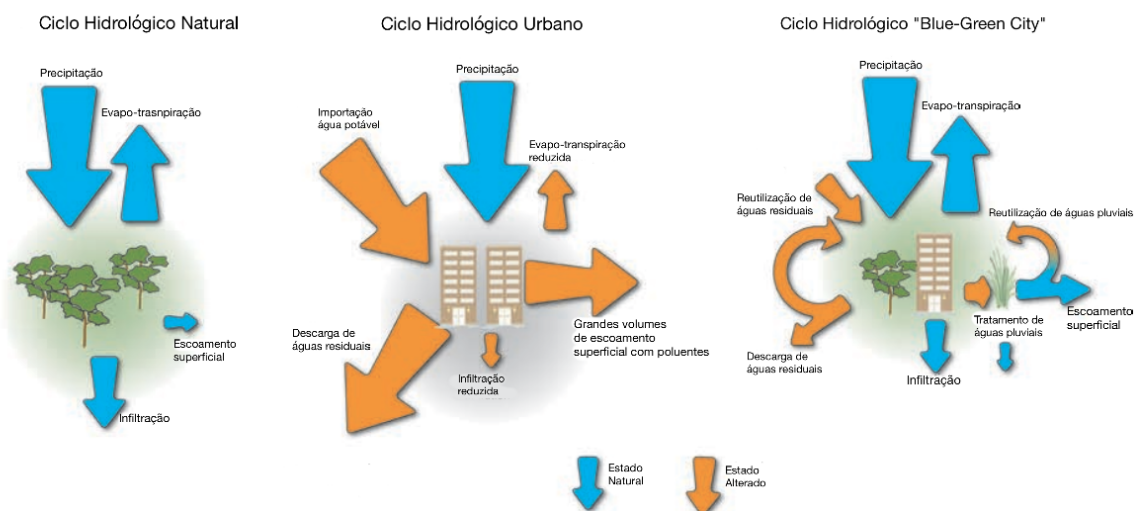


Figura 2.6 – Esquema ilustrativo em que se compara as diferenças no ciclo hidrológico, consoante o tipo de planeamento urbano (Water by Design, 2009).

O conceito de “*Blue-Green City*” implica, assim, uma estreita relação com o planeamento urbano das cidades, pois a implementação destas soluções implica, muitas vezes, a alteração da malha urbana e

da sua organização, pelo que, o processo de “transformação” demora tempo e implica o trabalho conjunto de várias disciplinas, desde a engenharia ao planeamento urbano. A utilização de várias destas soluções, permite a criação de uma rede urbana verde onde se podem incluir espaços recreativos e, em alguns casos, a criação de novos ecossistemas, modificando a organização e forma das cidades (Voskamp e Van de Ven, 2015). É importante referir que, em caso algum este novo conceito de organização do espaço urbano, pretende a substituição total dos atuais sistemas de drenagem. Na verdade, aquilo que se pretende é um trabalho conjunto da rede urbana verde com os atuais sistemas de drenagem urbanos, permitindo assim a redução do risco de inundação urbana e melhoria da qualidade da água descarregada nos meios receptores.

Face aos problemas existentes e eventuais agravamentos, a necessidade de adaptação torna-se imprescindível. Esta adaptação passa por repensar a maneira como a drenagem urbana é feita, sendo um novo desafio a implementação de novas medidas. O conceito que se apresenta já começou a ser implementado em algumas cidades, estando a ganhar uma adesão cada vez maior. Conclui-se, assim, que um dos novos desafios urbanos passa pela capacidade de mudar a maneira de “pensar” o espaço urbano como o conhecemos, tentando criar cidades que se possam adaptar à mudança, resilientes, e que encarem a água de uma perspectiva diferente, para tal é necessário aplicar várias soluções e medidas de adaptação.

2.2 Soluções e medidas de adaptação

Como descrito nos capítulos anteriores, as alterações climáticas são cada vez mais um problema das sociedades de hoje em dia e os desafios que surgem com estas mudanças são cada vez maiores. Sendo que muitos dos impactos estão já presentes ou são considerados inevitáveis, os territórios, nos quais se incluiu o urbano, terão de se adaptar às presentes e futuras alterações na óptica de minimizarem os seus efeitos mais negativos. Neste aspecto, as cidades constituem um dos territórios mais expostos devido à sua elevada concentração populacional. As cidades terão de compreender os impactos a que estarão cada vez mais sujeitas, as suas vulnerabilidades e as possibilidades de adaptação (Oliveira, 2013). Sendo que, esta adaptação é um processo condicionado por aspetos específicos de cada local e sistema, as soluções generalistas correm o risco de serem desadequadas, se aplicadas indiscriminadamente. Faz, por isso, todo o sentido, aplicar estratégias de adaptação às escalas local ou institucional, devidamente integradas nos planos de nível superior, como planos de âmbito nacional, planos de desenvolvimento regional ou local. O desafio dos responsáveis pelos vários sectores e sistemas é converter o conceito de adaptação num conjunto de soluções práticas que sejam aceites por todas partes interessadas (Oliveira e Cunha, 2013).

Apresentam-se de seguida algumas das soluções e medidas de adaptação atuais, que se podem utilizar e planear para combater os problemas que os sistemas de drenagem urbanos apresentam hoje em dia. Refira-se que se faz um apanhado geral das várias soluções, dando mais ênfase às soluções de controlo na origem e ao planeamento sustentável.

2.2.1 Principais medidas de adaptação

As principais medidas de adaptação que se podem adoptar para mitigar os problemas de drenagem urbana que muitas cidades sofrem são essencialmente, reforço e reabilitação de colectores, criação de áreas de armazenamento de água, desvio de caudais dos principais colectores, sistemas de controlo em tempo real (CTR), soluções de controlo na origem e planeamento sustentável.

- Reforço e reabilitação de colectores

Os colectores de um sistema de drenagem podem apresentar, essencialmente, dois tipos de problemas que levem à necessidade de reabilitação, deficiência estrutural e/ou deficiência hidráulica. As deficiências estruturais resultam do mau estado de conservação, período de vida útil do colector, erros de construção entre outros. A solução para este problema, passa por substituir ou reparar os trechos que estejam em risco de colapso.

As deficiências hidráulicas resultam quando um determinado trecho ou sistema não tem a capacidade de transporte definida no projeto, ou quando existem ligações indevidas da rede pluvial à rede doméstica originando problemas de dimensionamento. A solução para este problema, passa por verificar o todo o cadastro da rede de drenagem para que se possa identificar quais os colectores com problemas de dimensionamento e/ou ligações indevidas, para que se possa substituir/renovar determinado trecho. Este tipo de renovação pode ser feito de várias maneiras, aumentando o diâmetro do colector, implantação de colectores paralelos, redução da rugosidade do colector através de revestimentos.

- Armazenamento

Uma forma de atenuar caudais de ponta e controlar melhor possíveis fenómenos de inundações é a utilização de armazenamento do sistema de drenagem, sendo que este armazenamento pode ser feito integrado no sistema ou fora dele. A mobilização dos volumes do próprio sistema, passa por utilizar reguladores de escoamento, permitindo que certos trechos detenham água em detrimento de outros. Estruturas adicionais podem ser construídas, nomeadamente trechos paralelos apenas para acumulação de água, bacias de retenção entre outros. As bacias de retenção são normalmente em betão, sendo este tipo de medida também considerada uma possível solução de controlo na origem, quando aplicadas nas bacias de cabeceira e normalmente com capacidade para permitir infiltração pelo fundo.

- Desvio de caudais

Uma outra medida de adaptação que pode ser utilizada para melhor controlo dos caudais mais a jusante do sistema, normalmente mais gravosos e maiores, passa por desviar os caudais dos principais colectores para um colector único que os intersecte. Assim, a afluência de caudais em excesso para as zonas mais a jusante do sistema de drenagem é controlada, desviando os caudais para serem descarregados noutra ponto completamente independente do todo o sistema de drenagem. Como já referido esta é uma solução que a CML equaciona para resolver os problemas de drenagem da cidade.

- CTR – Sistemas de Controlo em Tempo Real

Este tipo de sistemas surgem como complemento ou alternativa a investimentos em soluções de controlo na origem ou de infra-estruturação, que são onerosas (Machado, 2014) e, em alguns casos, impraticáveis devido à falta de espaço que muitas cidades apresentam. Este tipo de tecnologia já tem tido alguns casos bem sucedidos após a sua aplicação, começando a ter mais interesse por parte das entidades gestoras dos sistemas de drenagem urbanos, não só pela experiência adquirida mas também pela maior viabilidade desta tecnologia, devido à redução de custos de *hardware* e *software* (Schutze, 2004); (Schilling, 1989); (Pabst, 2011); (DWA, 2005); (Olsson e Newell, 1999).

Um sistema de controlo em tempo real é constituído por vários componentes, nomeadamente os sensores (medidores de caudal, medidores da variação do nível da superfície livre, entre outros), actuadores (válvulas, comportas, entre outros), controladores (regulam os actuadores) e sistema de transmissão de dados (Machado, 2014), estando estas componentes todas a funcionar com base num algoritmo de controlo. Este algoritmo tem o objectivo de definir um conjunto de regras que garante que os valores alvo variáveis no tempo são atingidos, sendo depois aplicado aos vários actuadores e controladores, consoante os dados recebidos pelos sensores, tentando garantir assim o objectivo. Na Figura 2.7 esquematiza-se o funcionamento genérico dum dispositivo de controlo, onde as setas simples indicam o sentido de transmissão da informação e as setas duplas indicam a direcção do escoamento (Ferreira e David, 2014); (Rauch e Harremoës, 1999a).

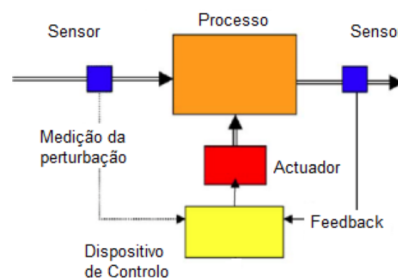


Figura 2.7 – Esquema genérico de um ciclo de controlo com *feedback* (Machado, 2014).

A aplicação deste tipo de solução traz inúmeras vantagens, nomeadamente uma melhor utilização do potencial de armazenamento do sistema de drenagem e desvio de caudais quando necessário, redução das amplitudes de caudais afluentes às ETAR, permitindo um melhor desempenho das mesmas, entre outras vantagens (Vanrolleghem, 2005); (USEPA, 2006); (Borsányi, 2008). A aplicação dos sistemas CTR juntamente com as medidas de armazenamento e desvio de caudais, referidas anteriormente, permite uma melhor performance deste tipo de medidas, podendo ser uma solução complementar a outras soluções (De Korte, 2009); (Sebastião, 2005). Apesar destas vantagens, a aplicação deste tipo de sistemas acarreta algumas dificuldades, nomeadamente o facto de não haver uma solução *standard* e os estudos de planeamento serem muito morosos e alguns dos componentes ainda serem bastante onerosos (Stinson, 2005); (Darsono e Labadie, 2007); (Voskamp e Van de Ven, 2015); (Schütze, 2008); (Pabst, 2011).

2.2.2 Soluções de controlo na origem

Cada vez mais os problemas ambientais são um tópico de discussão nas sociedades de hoje em dia, e com as alterações climáticas que se têm observado, nomeadamente em relação a eventos de precipitação de intensidade anormalmente elevada, as redes de drenagem urbana têm vindo a sofrer algumas alterações nomeadamente a utilização de soluções de controlo na origem. De acordo com o objectivo e o país em que foram desenvolvidas, estes novos conceitos de descentralização dos sistemas de drenagem adquiriram diferentes denominações, “*Best Management Practices*” (BMP) no EUA, “*Sustainable Urban Drainage Systems*” (SUDS) no Reino Unido, “*techniques alternatives*” em França, representam algumas das designações utilizadas (Barbosa et al., 2012). Neste documento adopta-se a designação norte americana (BMP).

As soluções de controlo na origem começaram por ser desenvolvidas e utilizadas no início da década de 80 em diversos países da Europa e América do Norte. Estas técnicas são aplicadas a montante da rede de drenagem, tendo o objectivo de promover a detenção e infiltração das águas pluviais, através da redução de áreas impermeáveis ligadas à rede. Consequentemente, os volumes e caudais de escoamento urbanos sofrem uma redução, promovendo a redução dos riscos de inundação urbana, e a poluição e erosão dos meios-receptores (Matos e Ferreira, 2011).

A aplicação deste tipo de soluções pode ser feita a diferentes escalas da malha urbana. Apresenta-se de seguida uma pequena descrição de alguns dos diferentes tipos de técnicas de controlo na origem.

2.2.2.1 Trincheiras de Infiltração

As trincheiras de infiltração são escavações de reduzida profundidade (1m a 4m) com desenvolvimento maioritariamente longitudinal, apresentam secção transversal rectangular ou trapezoidal. São, normalmente, preenchidas com materiais drenantes como brita, e revestidas por um geotêxtil. A brita colocada, deve ser de um tamanho tal que permita cerca de 40% de espaços vazios. Este tipo de soluções, tem como principal objectivo a recolha das águas pluviais perpendiculares ao seu desenvolvimento, permitindo o armazenamento e tratamento destas (Carvalho, 2012); (USEPA, 1999).

As trincheiras de infiltração podem ser enterradas ou superficiais, sendo alimentadas através de colectores ou através da escorrência de águas superficiais, respectivamente. Na Figura 2.8 apresentam-se dois cortes transversais representativos destas situações (Matos e Ferreira, 2011).

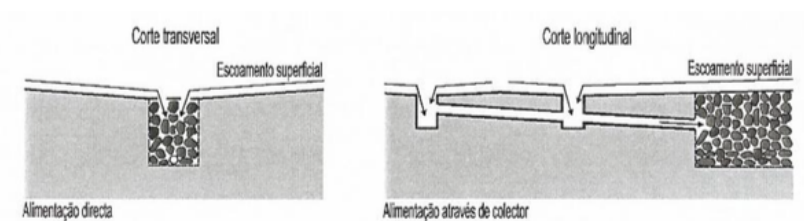


Figura 2.8 – Tipos de alimentação de trincheiras de infiltração (Azzout et al, 1994).

A saída da água efetua-se por infiltração no solo envolvente à escavação. Como tal, para garantir um correto funcionamento hidráulico da estrutura, é necessário ter em conta que o nível freático não deve estar a uma profundidade menor que 1m da cota de fundo, assegurando-se que não existe poluição de um possível aquífero subterrâneo.

Este tipo de estrutura acarreta alguns inconvenientes, nomeadamente o risco de poluição de eventuais aquíferos subterrâneos que possam existir. No entanto tem também grandes vantagens, pois apresenta grandes capacidades de absorção e tratamento dos caudais afluentes, permite uma fácil integração urbana e são soluções relativamente fáceis de aplicar, não implicando um custo económico alto (Matos e Ferreira, 2011).

2.2.2.2 Telhados Verdes

Este tipo de solução é normalmente reconhecida pelo termo anglo-saxónico “*Green-Roof*”, consistindo, essencialmente, na criação de uma camada de crescimento vegetal no topo das moradias. Estas estruturas são de aplicação à escala do lote na malha urbana, sendo de aplicação mais difícil pelo facto de, normalmente, os edifícios e moradias serem de domínio privado. Esta técnica de construção tem diferentes níveis de complexidade consoante o tipo de vegetação e acessibilidade que se deseja no telhado. Existem, assim, dois tipos de telhados verdes, os “*Extensive Green Roofs*” e os “*Intensive Green Roofs*”.

- Extensive Green Roofs: São caracterizados, essencialmente, pela vegetação rasteira que possuem. Esta técnica tem algumas vantagens, nomeadamente, o facto de não ser necessário reforçar estruturalmente o edifício, não ser necessário nenhum sistema de irrigação e a manutenção ser muito reduzida. Em comparação com os “*Intensive Green Roofs*”, não permitem uma eficácia energética e de redução dos caudais pluviais tão acentuada (Axler et al., 2009). Na Figura 2.9 é possível observar um exemplo da técnica descrita



Figura 2.9 - Exemplo de um “*Extensive Green Roof*” (Environmental Department of Düsseldorf, 2009).

- Intensive Green Roofs: São caracterizados pela vegetação mais variada e de maior porte que se utiliza. Permitem melhores resultados na retenção de águas pluviais e a nível energético. Esta solução acarreta algumas desvantagens, nomeadamente, o facto de ser necessário reforço estrutural e necessidade de irrigação e manutenção (Axler et al., 2009). Na Figura 2.10, em baixo, encontra-se um exemplo deste tipo de BMP.



Figura 2.10 - Exemplo de um “Intensive Green Roof” (Albert, 2010).

Os telhados verdes são essencialmente constituídos por três camadas principais: uma camada de drenagem; uma camada de solo; e uma camada de vegetação. A camada de solo pode adquirir diferentes espessuras consoante o tipo de telhado verde. A utilização deste tipo de BMP tem aumentado no últimos anos, devido ao facto destes sistemas oferecem eficácia a nível acústico, energético, redução da ilha de calor urbano e redução dos caudais pluviais (Carvalho, 2012). Refira-se que a eficácia desta solução é muito dependente do clima, nomeadamente da intensidade de precipitação. Um estudo levado a cabo por, J.Y.Lee et al, acerca da eficácia dos “Extensive Green-Roofs” refere que, este tipo de solução tem uma capacidade alta de retenção das águas pluviais para precipitações menores que 20 mm/h. Esta eficácia, tende a diminuir para precipitações de intensidades maiores. Com este estudo, conclui-se que este tipo de BMP apresenta uma eficácia de retenção das águas pluviais entre 44% e 52%, sendo uma solução eficaz na diminuição dos caudais pluviais.

2.2.2.3 Detenção de águas pluviais dos telhados em barris

Esta solução de controlo na origem, normalmente reconhecida por “*Rain Barrels*”, tem uma aplicação ao nível do lote, sendo uma solução bastante simples e económica. Este BMP consiste, essencialmente, num reservatório que armazena a água pluvial que escoa dos telhados das moradias, permitindo a detenção das águas pluviais e conseqüente diminuição dos caudais pluviais. A água armazenada, pode ser utilizada nos períodos de seca para vários fins, como por exemplo, rega de pequenos jardins. Na Figura 2.11 apresenta-se um esquema e imagem exemplificativos desta solução. À direita um esquema ilustrativo do funcionamento desta solução, à esquerda uma imagem representativa de um “*Rain Barrel*.”



Figura 2.11 – Esquema e imagem exemplificativos da solução de controlo de origem “*Rain Barrels*”. Adaptado de (Prince George’s County - Department of Environmental Resources, 1999).

2.2.2.4 Bio-Retenção

A Bio-retenção é uma solução de controlo na origem desenvolvida nos anos 90 nos EUA. Esta solução consiste numa depressão de pequena profundidade, para onde as águas pluviais são conduzidas e tratadas por um sistema de infiltração. Este sistema é usualmente constituído por um filtro vegetal, uma secção constituída por areia, uma zona de detenção, uma camada orgânica, solo de plantio e vegetação apropriada. Ao atravessar o filtro vegetal, a velocidade do escoamento superficial é reduzida, sendo o caudal distribuído pela zona de detenção onde ocorre a infiltração (USEPA, 1999).

Os caudais drenados, são armazenados no solo à medida que se vão infiltrando no solo subsequente. Este BMP concilia o tratamento das águas pluviais com o retardamento dos escoamentos, permitindo uma redução nos caudais e volumes de escoamento pluviais, bem como a melhoria da qualidade da água. Refira-se que, caso os solos subsequentes não tenham condições de infiltração apropriadas, é necessário colocar-se um dispositivo de drenagem subterrânea para encaminhar a água infiltrada para um sistema de drenagem pluvial a jusante. Segundo estudos realizados por Davis et al, 1998 e PGDER, 1993, estes sistemas de infiltração tem taxas de redução de nutrientes e poluentes bastante positivas. No Quadro 2.3 apresentam-se alguns dos valores que se obtiveram.

Quadro 2.3 – Taxas de remoção de nutrientes e poluentes através da Bio-retenção (PGDER, 1993) (Davis et al., 1998).

Nutriente/Poluente	Taxa de Remoção
Fósforo (P)	70% - 83%
Metais (Cu; Zn; Pb)	93% - 98%
Sólidos Suspensos Totais (SST)	90%
Bactérias	90%

Esta solução apresenta grandes vantagens, pois implica custos de manutenção e monitorização baixos e permite a requalificação da zona urbana em que é utilizada. Apresenta algumas desvantagens na medida em que, só é possível a utilização em terrenos planos e com o nível freático 2m abaixo da superfície. A possível proliferação de mosquitos, devido à formação de poças e existência de vegetação, é também um cenário possível.

2.2.2.5 Bacias de Detenção

Esta solução de controlo na origem tem sido das mais utilizadas no mundo, pois é a solução que permite melhores eficácias de controlo dos escoamentos superficiais. Este BMP tem um princípio bastante simples, acumula as águas superficiais retardando a entrada no sistema dos volumes retidos, permitindo a restituição a jusante de um caudal compatível com o sistema de drenagem, reduzindo, assim, o risco de inundações (Ferreira, 1999).

Existem duas classificações diferentes para as bacias de detenção, consoante o seu comportamento hidráulico.

- Bacias de Detenção a seco: Têm água apenas nos períodos após os eventos pluviométricos. Têm uma função principalmente reguladora dos caudais, não sendo a solução mais apropriada para tratamento das águas superficiais. Esta solução é vantajosa, na medida em que, permite um controlo eficaz dos caudais de ponta, garante a valorização da malha urbana e tem custos associados menores, comparativamente com as bacias com nível de água permanente. Na Figura 2.12 apresenta-se um exemplo de uma bacia deste tipo.



Figura 2.12 - Exemplo de uma bacia de detenção a seco (USEPA, 1995).

- Bacias de Detenção com nível de água permanente: Esta técnica permite o controlo da quantidade e qualidade das águas superficiais. Apresentam sempre, uma toalha de água permanente, mesmo em períodos de seca, permitindo uma remoção mais eficaz, em comparação com as bacias a seco, de poluentes e sólidos suspensos. A utilização deste BMP implica uma monitorização cuidada, caso contrário a possibilidade de eutrofização, criação de ambientes anaeróbios, possibilidade de contaminação dos solos e aquíferos subterrâneos, são cenários possíveis de ocorrer. Em baixo, na Figura 2.13, apresenta-se um exemplo deste tipo de BMP.



Figura 2.13 - Exemplo de uma bacia de detenção com nível de água permanente (USEPA, 1995).

As bacias de detenção podem ainda ser colocadas no alinhamento do colector, bacias ditas em série (*“online”*), ou paralelamente a este, bacias em paralelo (*“offline”*). A principal diferença entre estes dois tipos de posicionamento, tem que ver com o seu dimensionamento. No caso das bacias *“online”*, são dimensionadas para albergarem a totalidade do caudal afluente ao passo que, as bacias *“offline”* são dimensionadas para receber apenas parte do caudal afluente, normalmente, os primeiros caudais (Ferreira, 1999).

2.2.2.6 Pavimentos Porosos

Ao contrário dos pavimentos impermeáveis, muito comuns nas estradas e parques de estacionamento, os pavimentos porosos são desenhados para permitirem a infiltração da água das chuvas através da superfície, permitindo que essa mesma água se infiltre naturalmente no solo. Assim, esta solução permite reduzir o escoamento superficial e não sobrecarregar tanto os sistemas de drenagem urbanos. Esta técnica deve ser aplicada em zonas em que o armazenamento por unidade de área de infiltração seja reduzido, sendo adequada para substituição das faixas de rodagem convencionais, parques de estacionamento, faixas de serviço e passeios pedonais (Ferreira, 1999).

Existem duas vertentes diferentes para este tipo de solução de controlo na origem. Uma em que apenas se utiliza uma camada porosa, permitindo a infiltração direta no solo de fundação. A segunda vertente consiste na utilização de uma camada adicional, com elevado índice de vazios, que permite a acumulação das águas pluviais, sendo posteriormente conduzidas para a rede de drenagem ou infiltradas no solo de fundação. Na Figura 2.14 apresentam-se duas imagens referentes a estas duas possíveis utilizações de pavimentos porosos. À esquerda ensaio que mostra o funcionamento da camada porosa utilizada neste BMP, à direita um corte transversal de um pavimento poroso com uma camada extra, que permite a acumulação de água pluvial.

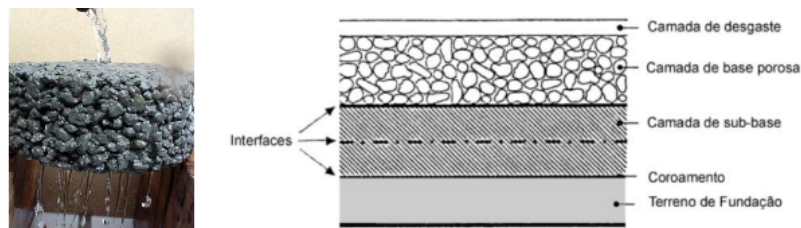


Figura 2.14 – Imagens representativas do funcionamento e constituição de pavimentos porosos (Adaptadas de (Huffman, 2008); (Matos M. R., 1999a)).

Os pavimentos porosos apresentam a vantagem de não ocuparem espaço adicional, pois são utilizados em substituição dos pavimentos convencionais. São também vantajosos no facto de permitirem maior segurança em termos rodoviários, pois evitam o fenómeno de aquaplanagem. Têm a desvantagem de apresentar propensão para a colmatção, o que torna a manutenção e reabilitação bastante difíceis de aplicar (Matos e Ferreira, 2011). Apresenta-se na Figura 2.15 um exemplo de aplicação desta solução, comparando-a com os pavimentos convencionais.



Figura 2.15 – Comparação entre os dois tipos de pavimentos adaptado de (Huffman, 2008).

2.2.2.7 Valas revestidas com coberto vegetal

Uma vala revestida com coberto vegetal ou “vegetated swales”, designação anglo-saxónica, consiste num canal de superfície livre com um revestimento vegetal no fundo e nas paredes laterais. Esta técnica tem o propósito de encaminhar as águas pluviais à medida que estas se vão infiltrando no solo adjacente à vala. Estas valas são pouco profundas, funcionam geralmente a seco, apresentam taludes de declives inferiores a 3:1 e secções de perfil triangular, trapezoidal ou circular. Esta é uma solução que deve ser aplicada em bacias urbanas pequenas, com volumes de escoamento relativamente pequenos (Matos e Ferreira, 2011); (Ferreira, 1999).

O escoamento na vala deve ser lento, de maneira a proporcionar a infiltração e armazenamento das escoências superficiais. Esta solução pode ser aplicada paralelamente a vias rodoviárias, passeios ou nas proximidades de parques de estacionamento, não devendo ser utilizada em zonas muito declivosas ou com climas que não permitam a manutenção do coberto vegetal. Na maior parte dos casos o revestimento é feito exclusivamente por relva, no entanto existem outros revestimentos possíveis que permitem retenção biológica, obtendo-se maiores eficácias na redução do volume de escoamento e na remoção de poluentes. Existe ainda a possibilidade de criar pequenos diques longitudinais ao longo do canal, o que permite maior capacidade de armazenamento e melhores índices de remoção de poluentes. Em baixo, na Figura 2.16, apresentam-se duas imagens ilustrativas deste tipo do solução de controlo na origem.



Figura 2.16 – Imagem e esquema ilustrativo do funcionamento de valas revestidas com coberto vegetal (Adaptadas de (Chesapeake Stormwater Network, 2014); (Prince George’s County - Department of Environmental Resources, 1999).

Esta solução de controlo na origem apresenta algumas desvantagens, nomeadamente, o facto de não se poder aplicar em zonas muito planas nem muito inclinadas (possibilidade de não ocorrência do escoamento e a possibilidade de ocorrência de um escoamento com grandes velocidades, respectivamente), zonas com um tipo de solo inadequado ou ainda zonas em que o clima não permita a manutenção da camada vegetativa. Apresentam ainda uma eficácia reduzida para eventos pluviométricos muito volumosos.

Comparativamente a outros métodos de infiltração, as valas de coberto vegetal caracterizam-se por serem uma mais-valia do ponto de vista do enquadramento paisagístico. Adicionalmente, permitem um tratamento biológico de custos reduzidos e são de fácil manutenção e monitorização (Carvalho, 2012).

2.2.3 Planeamento Urbano Sustentável

Como já foi descrito nos capítulos anteriores, a necessidade de adaptação dos sistemas de drenagem urbanos é cada vez maior. Um factor comum aos vários planos e soluções de adaptação, é a percepção da inadequação do redimensionamento dos sistemas de drenagem artificiais que se utilizam na atualidade. Esta inadequação de reconstrução tem que ver com diversos factores, nomeadamente o grande investimento financeiro que acarretam, a dificuldade de reconstrução no seio das cidades já consolidadas e a fraca flexibilidade que apresentam face a um clima dinâmico. Perante isto, as estratégias de adaptação baseiam-se num desenvolvimento não tão dependente das estruturas artificiais atuais, mas em soluções mais resilientes e ecológicas.

O conceito de Planeamento Urbano Sustentável, reconhecido pelos termos *Sustainable Urban Water Management* (SUWM) no Reino Unido e *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) na Austrália, é uma estratégia de adaptação que tem vindo a ser cada vez mais estudada e, em alguns casos, posta em prática. Inicialmente este conceito, focava-se apenas na gestão urbana da água, no entanto, sofreu uma evolução, passando agora a integrar a promoção de um desenvolvimento urbano sustentável. Em suma, aproveita a requalificação do espaço urbano ao mesmo tempo que melhora a qualidade e quantidade dos volumes de água superficiais urbanos, encarando a água pluvial mais como um recurso do que como um incómodo. Assim, o desenvolvimento urbano nesta óptica, tem em conta a sustentabilidade da água (Lee e Yigitcanlar, 2010). Normalmente, estes objectivos são conseguidos através da descentralização dos sistemas de drenagem, isto é, promovendo a infiltração e detenção da água na origem utilizando “infraestruturas verdes”, já referidas anteriormente. É um conceito que difere dos modelos tradicionais nos seus objectivos principais, tipo de estruturas utilizadas e na maneira de gerir o ciclo da água urbano (Marlow et al., 2013). Apresentam-se de seguida os principais objectivos do Planeamento Urbano Sustentável:

- Redução dos volumes de escoamento e caudais de ponta superficiais
- Controlo da qualidade das escorrências superficiais
- Promoção da requalificação urbana
- Promoção da reutilização das águas pluviais e residuais

Conclui-se que o principal objectivo do Planeamento Urbano Sustentável é, portanto, a criação de um ciclo da água urbano que permita uma aproximação ao ciclo natural hidrológico, reduzindo os impactos da urbanização (Water by Design, 2009).

Muitas “infraestruturas verdes” que se podem utilizar para tentar implementar um planeamento urbano sustentável, implicam a utilização, por vezes, de grandes áreas urbanas, ou áreas que interfiram com a organização da cidade. Quer isto dizer que, o urbanismo, o planeamento urbano e o desenho urbano têm um papel fundamental na implementação destas medidas, podendo integrar diversas medidas que potenciem o armazenamento ou detenção do escoamento. Muitas das soluções descritas no capítulo 2.2.2, podem ser integradas na malha urbana fazendo com que o tecido edificado e os espaços públicos sejam entendidos como autênticas infraestruturas de drenagem. A título de exemplo, algumas praças e edifícios podem armazenar água, pavimentos e

espaços verdes que funcionam como reservatórios e pontos de infiltração. Apresentam-se em baixo na Figura 2.17, algumas imagens ilustrativas de um exemplo da possível ligação entre a malha urbana e o desenho urbano com a drenagem das cidades.



Figura 2.17 – Exemplo de uma solução possível de infiltração e retenção de água no espaço urbano em Paris. Adaptado de (EIVP, 2013)

Desta forma, a gestão da drenagem urbana deixa de estar tão ligada à infraestrutura, passando a olhar-se mais para todo o ciclo da água urbano e ligação ao planeamento do espaço. Esta mudança na forma de gerir e pensar a drenagem e o espaço urbano, é importante num clima dinâmico, em que a diminuição da dependência da infraestrutura representa uma importante vantagem a médio e longo prazo, diminuindo a futura necessidade do seu constante reajustamento (Oliveira, 2013).

A estratégia e as medidas que melhor se adaptam são diferentes e têm diferentes eficácias consoante vários factores, como por exemplo o espaço urbano disponível, o tipo de solo existente ou até mesmo a disponibilidade económica. Assim, cada cidade necessita de uma estratégia diferente de utilização deste tipo de soluções, não havendo, portanto, uma solução generalizada que se possa aplicar. Por exemplo, numa zona urbana com uma intensidade de ocupação muito alta, a utilização de soluções que ocupem muito espaço não são tão fáceis de aplicar, sendo necessário optar por diversas medidas de descentralização de drenagem. Já num meio com menos intensidade de ocupação, as soluções utilizadas podem ocupar áreas maiores, podendo utilizar-se medidas mais eficazes como bacias de retenção.

2.2.3.1 Vantagens na implementação de um desenvolvimento urbano sustentável

A adopção de um planeamento urbano sustentável traz inúmeras vantagens, muitas vezes confundindo-se com os próprios objectivos deste conceito. De seguida listam-se algumas das vantagens que este conceito pode trazer:

- Muitas das soluções para um planeamento urbano sustentável passam pela aposta em infraestruturas verdes, soluções de controlo na origem e descentralização dos sistemas de

drenagem. Ao se promover a aplicação destas soluções estamos a aumentar a áreas permeáveis, permitindo um maior controlo sobre os volumes de água superficiais, tanto a nível de qualidade como em quantidade. Assim, a probabilidade de entrada em carga hidráulica da rede de drenagem é menor, reduzindo-se o risco de inundação urbana e descarga de excedentes.

- Em muitas zonas urbanas existe a possibilidade de se utilizar água de qualidade inferior, para irrigação de pequenos jardins, aplicação industrial entre outros. A criação de um ciclo da água urbano que permita a reutilização da água pluvial e residual, permite aproveitar esta água de qualidade inferior, conseguindo-se poupar água potável (Marlow et al., 2013).
- A aposta em infraestruturas verdes permite a redução dos efeitos da ilha de calor urbano e maior eficiência energética dos edifícios, neste caso se se utilizarem telhados verdes (Susca et al., 2011).
- Melhoria do ambiente urbano, através da sua requalificação, melhoria da qualidade física do ar e da água e reconstituição da biodiversidade urbana.

Todas estas vantagens contribuem para a criação de um meio urbano que gere o seus recursos de uma maneira mais sustentável, protegendo também o meio envolvente, conseguindo-se uma maior adaptabilidade face ao clima dinâmico que cada vez mais experienciamos.

2.2.3.2 Barreiras à implementação de um Planeamento Sustentável

Apesar das várias vantagens que um Planeamento Urbano Sustentável pode trazer, a maior parte dos países não apresenta qualquer tipo de alteração na gestão da drenagem urbana das cidades, sendo que aqueles que já começam a tentar implementar novas medidas, fazem-no a um ritmo muito lento (Marlow et al., 2013). Segundo alguns autores, esta inércia é devida a vários factores:

- Factores Sociais e Organizacionais
- Factores Técnicos
- Factores Económicos

A implementação de uma estratégia para que se possa retirar reais benefícios de um planeamento sustentável, implica um trabalho cooperativo entre várias áreas, como a engenharia civil, arquitetura, ecologia, urbanismo e as câmaras municipais. Por si só, isto já é um problema, pois muitas destas áreas não têm experiência de trabalho conjunto, o que leva a que, muitas vezes, os projetos demorem muito tempo a evoluir e, pior que isso, que sejam mal implementados.

O facto desta ser uma nova maneira de gerir a drenagem urbana e incluir soluções algo inovadoras, leva a que haja alguma reserva à sua utilização por parte das comunidades. Esta reserva tem que ver com diversos factores, o facto de não haver tanta informação no que toca à eficácia destas novas soluções; sendo soluções pouco testadas ainda não se tem informação sobre potenciais problemas que possam vir a acontecer, (por exemplo em Melbourne, Austrália, após a implementação de uma bacia de retenção houve uma afluência anormal de pássaros à zona, gerando vários problemas como o cheiro e o barulho (Marlow et al, 2013)); a falta de experiência técnica e de construção leva a que muitas soluções resultem mal, acabando por rotular este tipo de medidas como incertas ou

ineficazes (Lee e Yigitcanlar, 2010).

Existe a percepção de que a implementação de algumas destas soluções são mais onerosas que as soluções tradicionais, o que não traduz necessariamente a verdade. Esta percepção é muito influenciada pela dificuldade de aprovação, por parte das câmaras, de certos projetos. Na verdade estas soluções têm um investimento inicial maior, no entanto trazem muito mais benefícios sociais e ambientais a longo termo do que as soluções tradicionais (Lee e Yigitcanlar, 2010) (Barbosa et al., 2012).

O facto deste ser um novo conceito na gestão da drenagem urbana e da própria cidade em si, implica necessariamente, um risco maior e, provavelmente, falta de capacidade em gerir as incertezas e problemas que possam surgir. No entanto é necessário começar a investir em novas soluções para que este tipo de barreiras possam ser ultrapassadas.

3 Modelação do desempenho de sistemas

Atualmente, diversas áreas têm aproveitado a evolução tecnológica para melhorar as abordagens de resolução e previsão de soluções. A hidráulica e a drenagem urbana não fogem à regra, utilizando modelos computacionais para simular acontecimentos pluviométricos e o desempenho de sistemas, desde os anos 60. Com a cada vez maior evolução e capacidade dos sistemas tecnológicos, os modelos tendem a ser cada vez mais precisos e complexos, permitindo avaliar cada vez mais factores, tornando-se numa ferramenta quase indispensável em qualquer estudo ou projeto.

Neste capítulo, pretende-se fazer uma descrição dos modelos que se vão utilizar no caso de estudo, nomeadamente o SUSTAIN e o SWMM. A descrição será feita em termos do seu funcionamento e das bases científicas que o constituem, referindo desde já que a informação deste capítulo é, na sua maioria, adaptada dos relatórios de apoio dos *softwares*. A descrição dos vários conceitos e técnicas será feito de forma sintetizada, não sendo objectivo deste estudo apresentar uma análise exaustiva da formulação do *software*, que pode ser encontrada nos respectivos manuais.

3.1 SUSTAIN (System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration Model)

O SUSTAIN é um modelo conceptual de apoio à decisão, que visa otimizar e facilitar a localização e seleção dos métodos de controlo na origem a utilizar em bacias urbanas. O desenvolvimento deste tipo de *software* tem por base a crescente necessidade de adaptação que os sistemas de drenagem urbanos têm vindo a necessitar, nomeadamente na integração de soluções de controlo na origem, soluções essas que não têm um histórico experimental muito elevado. Assim, o SUSTAIN, representa uma ferramenta de avaliação da eficácia de soluções de controlo na origem, que para além de permitir ver resultados em termos de redução dos escoamentos superficiais e melhoramento da qualidade da água, paralelamente, realiza uma avaliação em termos de custos económicos.

Em termos gerais, o SUSTAIN permite responder às seguintes questões:

- Qual a eficácia dos métodos de controlo na origem na redução do escoamento superficial e das cargas poluentes?
- Quais são as soluções com melhor relação custo-benefício que permitem atingir os objectivos quantitativos e qualitativos na qualidade da água?
- Onde, de que tipo e de que dimensão deverão ser os métodos de controlo na origem a utilizar?

Posto isto, faz-se uma síntese dos principais conceitos científicos que se encontram incluídos no SUSTAIN e que visam capacitar o modelo para a simulação dos fenómenos que afectam a evolução dos escoamentos pluviais e dos sistemas de drenagem urbana.

3.1.1 Estrutura do SUSTAIN

O modelo computacional do SUSTAIN é totalmente integrado na plataforma ArcGIS (ESRI), sendo constituído por vários módulos que se interligam entre eles dentro desta plataforma. Os módulos que constituem o *software* são os seguintes:

- Módulo de seleção de locais de implantação de BMP
- Módulo de simulação do terreno
- Módulo de simulação dos BMP
- Módulo de transporte
- Módulo de optimização

Na Figura 3.1 apresenta-se um esquema representativo desta estrutura, em que a tradução da imagem para cada módulo é a seguinte: “BMP Siting Tool” – Módulo de seleção de locais de implantação de BMP; “Land Module” – Módulo de simulação do terreno; “BMP Module” – Módulo de simulação dos BMP; “Conveyance Module” – Módulo de transporte; “Optimization” – Módulo de optimização; “Interpretation” – Pós processador de interpretação de resultados.

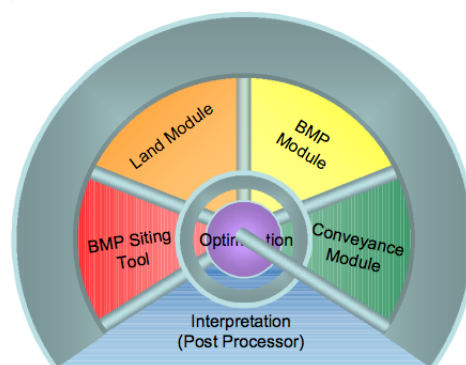


Figura 3.1 – Esquema representativo da estrutura do SUSTAIN.

O módulo de seleção de locais de implantação de BMP é uma ferramenta, independente do módulo computacional principal, que serve de apoio à decisão e contribui para classificar a adequabilidade dos vários BMP aos diferentes locais. Esta ferramenta cruza informações de vários mapas espaciais com critérios de localização definidos pelo utilizador, filtrando as localizações que se adequam às diversas soluções de controlo na origem. Entre os critérios de decisão incluem-se o declive, tipo de solo, tipo de ocupação urbana, distância a linhas de água, arruamentos e/ou edifícios, nível freático e área de drenagem. A utilização deste apoio é opcional, podendo o utilizador escolher a localização que desejar, se necessário. No caso de estudo desta tese, não se recorreu a este ferramenta, pelo que não será descrita com mais detalhe nos subcapítulos seguintes.

O módulo de simulação do terreno é usado para gerar o escoamento superficial e o arrastamento da

carga poluente que este acarreta. A simulação do escoamento superficial é feita através do algoritmo do modelo SWMM (Versão 5), ao passo que a simulação do processo físico da erosão das cargas poluentes é feita através do algoritmo do modelo HSPF. O módulo de simulação dos BMP consiste numa combinação de algoritmos expressões analíticas que permitem calcular vários processos tais como a infiltração, evapotranspiração, evolução do escoamento, transporte de sedimentos, decaimento de poluentes, entre outros. Processos estes, inerentes a cada BMP que se utilize. O módulo de transporte faz a transição do escoamento entre vários pontos físicos do sistema de drenagem (terreno, BMP, colectores e junções) (Carvalho, 2012). Finalmente o módulo de optimização utiliza os resultados provenientes de todos os outros módulos, procedendo à avaliação, de forma iterativa, do desempenho dos métodos de controlo na origem para os factores de avaliação e dados de custo escolhidos. Assim, são seleccionadas um conjunto de soluções que permitem atingir um determinado objectivo de redução e apresentem o melhor desempenho na relação custo-eficiência (USEPA, 2009).

3.1.1.1 Módulo de simulação do terreno

O módulo de simulação do terreno é utilizado para gerar o escoamento superficial e o arrastamento da carga poluente que este acarreta. Apenas uma parcela do volume total que afluí à bacia hidrográfica proveniente de eventos pluviométricos, é convertido em escoamento superficial. Os factores que afectam esta diferença de volumes são a infiltração, evapotranspiração, recarga de aquíferos, entre outros processos hidrológicos. Na Figura 3.2 apresenta-se um esquema ilustrativo dos vários processos que são tidos em conta.

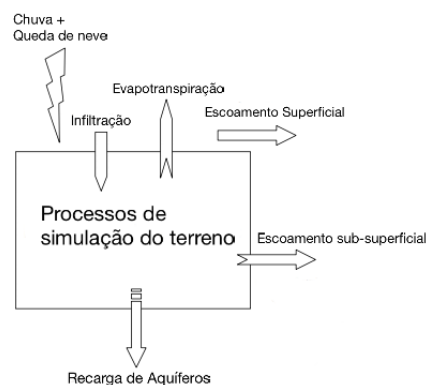


Figura 3.2 – Esquema ilustrativo dos processos intervenientes no módulo de simulação do terreno, adaptado de (USEPA, 2009)

O SUSTAIN permite gerar as séries de escoamento superficial de duas maneiras, ou o utilizador introduz dados gerados externamente, em programas de pré-calibração de bacias ou utiliza a simulação interna do *software*. A simulação interna baseia-se em algoritmos do SWMM e do HSPF para gerar o hidrograma de cheia e o gráfico de poluentes. Os testes efectuados comprovam ser uma aproximação precisa aos modelos originais.

As componentes que entram no processo de simulação do terreno podem ser divididas em três

grupos principais, meteorologia, hidrologia e qualidade da água.

Meteorologia

A componente meteorológica do SUSTAIN é adaptada da mesma componente do SWMM, que envolve os processos de precipitação, degelo e evaporação. Estes processos são introduzidos pelo utilizador em séries temporais, criando-se dois ficheiros independentes. Um referente à precipitação e outro referente aos outros processos climatéricos.

O ficheiro climatérico deve conter as temperaturas máximas e mínimas diárias, velocidade do vento e taxa de evaporação. Este ficheiro não é obrigatório para poder correr o modelo. Já o ficheiro de precipitação, é obrigatório, e deve conter os valores de precipitação em intervalos horários.

1. Precipitação

Cada linha do ficheiro de precipitação deve conter, da esquerda para a direita, número de identificação da estação, ano, mês, dia, hora, minutos e precipitação. na Figura 3.3 apresenta-se um excerto de um ficheiro de precipitação. É importante referir que, os valores máximo e mínimo de temperatura presentes no ficheiro climatérico são utilizados para verificar de que modo ocorre a precipitação (neve ou chuva).

```
ST448903 2007 1 1 00 00 0.12  
ST448903 2007 1 1 01 00 0.04  
ST448903 2007 1 2 16 00 0.07
```

Figura 3.3 – Exemplo de excerto de um ficheiro de precipitação.

2. Degelo

Este fenómeno é considerado pelo SUSTAIN, pela influência que este pode ter nos escoamentos superficiais e na drenagem das cidades. No entanto em Portugal continental, este é um fenómeno que ocorre apenas em algumas zonas e com pouca influência, não foi assim utilizada qualquer informação relativa a este processo.

3. Evaporação

Este factor é calculado tendo em conta o cúmulo da evaporação verificada nas unidades de armazenamento, sendo depois subtraído ao sistema antes do cálculo da infiltração. É possível introduzir o valor de evaporação de três modos distintos, através do ficheiro climatérico, definição de um valor constante ou médias mensais de evaporação.

Hidrologia

Esta componente simula os vários processos existentes para que se crie escoamento superficial, ou seja, quantifica os efeitos da infiltração de modo a que se obtenham os caudais de escoamento superficiais. Mais uma vez, esta componente é baseada no algoritmo do SWMM para a representação da superfície do terreno e escoamento sub-superficial.

1. Infiltração

O SUSTAIN utiliza o modelo de Green-Ampt para calcular a infiltração das zonas permeáveis na bacia de drenagem. Este método permite determinar a taxa de infiltração de água num determinado solo, com base em três parâmetros: déficit inicial; sucção na frente de humedecimento e condutividade hidráulica saturada (Carvalho, 2012). A grande vantagem deste método reside no facto, destes parâmetros poderem ser determinados através de processos físicos, permitindo uma boa aproximação à realidade do tipo de solo presente na bacia. Apresenta-se de seguida as equações intervenientes neste processo.

Caso $I \leq K_s$, então $f = I$

Caso $I \geq K_s$, então $f = I$, até que $F = F_s$

Onde,

$$F = F_s = \frac{\psi_f * (\theta_s - \theta_i)}{1 - I/K_s}$$

Atingida a capacidade de saturação, tem-se:

$$f = \frac{dF}{dt} = K_s \left[1 + \frac{(\theta_s - \theta_i) * \psi_f}{F} \right]$$

Onde,

I = Taxa de infiltração (L/T)

F = Total infiltrado (L)

F_s = Capacidade de infiltração em condições de saturação (L)

f = Taxa de infiltração (L/T)

K_s = Condutividade hidráulica de saturação (L/T)

θ_s = Teor de humidade de saturação (-)

θ_i = Teor de humidade inicial (-)

ψ_f = Sucção na frente de humedecimento (L)

Este é um processo de cálculo iterativo, sendo a infiltração calculada a cada passo temporal.

2. Escoamento superficial

O escoamento superficial é simulado com base na equação de Manning, sendo que a superfície é encarada como um pequeno reservatório, como se pode ver na Figura 3.4 em baixo. A água que o reservatório recebe, é proveniente da precipitação, e através da infiltração e evaporação quantifica-se a água que sai do reservatório. Assim, a diferença entre o que entra e o que sai deste reservatório fictício, representa a quantidade de água que se acumula superficialmente. Esta quantidade é representada por uma altura d_p , gerando-se escoamento superficial para jusante sempre que a altura do escoamento seja superior à de armazenamento ($d > d_p$).

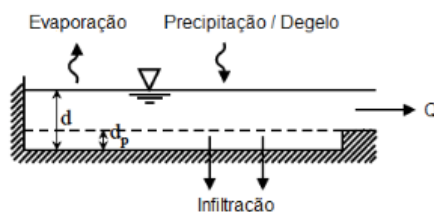


Figura 3.4 – Representação conceptual da criação do escoamento superficial no módulo de simulação do terreno

Posto isto, o caudal é calculado com base na equação de Manning:

$$Q = W * \frac{1,49}{n} * (d - d_p)^{\frac{5}{3}} * S^{1/2}$$

onde,

Q = Caudal superficial (L^3/T)

W = Largura da bacia (L)

n = Coeficiente de rugosidade de Manning ($T.L^3$)

d = Altura de escoamento (L)

d_p = Altura de armazenamento (L)

S = Declive da bacia de drenagem (L/L)

Por sua vez a altura de escoamento d , é calculada com base na seguinte equação de balanço hídrico:

$$\frac{dd}{dt} = i_e - \frac{1,49 W}{A * n} (d - d_p)^{\frac{5}{3}} * S^{1/2}$$

onde,

d = Altura do escoamento (L)

t = Tempo (T)

W = Largura da bacia (L)

A = Área da bacia de drenagem (L^2)

n = Coeficiente de rugosidade de Manning ($T*L^{-1/3}$)

i_e = Excesso de precipitação (L/T)

d_p = Altura de armazenamento (L)

S = Declive da bacia de drenagem (L/L)

Refira-se que o SUSTAIN tem a possibilidade de calcular o escoamento sub-superficial, avaliando a influência que a variação do nível freático tem na interação de solos saturados e não saturados. Neste trabalho, não se considerou esta vertente, assumindo-se que este não seria um factor condicionante face às soluções de controlo na origem que se iriam utilizar. Assim, esta

componente não é descrita com detalhe.

Qualidade da água

O SUSTAIN permite avaliar a qualidade da água do escoamento superficial. Basicamente, a componente de simulação da qualidade de água, faz a ligação entre a componente hidrológica e o transporte de sedimentos. O SUSTAIN baseia-se no algoritmo do SWMM para o transporte dos sedimentos e no algoritmos do HSPF para a simulação da erosão e produção dos sedimentos. A simulação de transporte e produção, é feita de maneira diferente consoante o tipo de ocupação urbana que exista (terreno permeável ou impermeável), sendo que a carga poluente produzida pela bacia hidrográfica em estudo, é a soma das cargas poluentes obtidas para cada categoria de ocupação urbana e tratamento que cada solução de controlo na origem faça.

Esta funcionalidade não foi avaliada no presente caso de estudo, pelo que não se vai fazer uma descrição detalhada desta funcionalidade.

3.1.1.2 Módulo de simulação de BMP

Este módulo tem o objectivo de simular o escoamento e o transporte de poluentes para várias soluções de controlo na origem. Para tal, tem em conta diversos processos hidrológicos que se podem dar nos vários BMP. Na Figura 3.5 apresenta-se um esquema ilustrativo dos vários processos que são tidos em conta neste módulo de simulação.

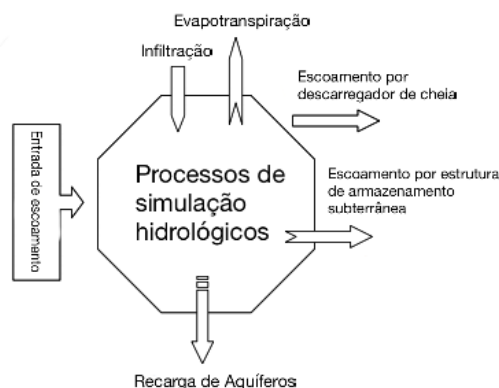


Figura 3.5 – Esquema ilustrativo dos processos hidrológicos simulados pelo SUSTAIN nos diversos BMP, adaptado de (USEPA, 2009)

De seguida faz-se uma pequena descrição dos vários processos intrínsecos à simulação dos BMP.

Armazenamento e descarga em bacias de detenção

A evolução do escoamento em locais onde exista detenção de volume de água é usualmente representada por uma equação de balanço hidrológico que relaciona os caudais afluente e efluente.

$$\Delta V / \Delta t = I - O$$

Onde,

ΔV = Variação do volume armazenado

Δt = Intervalo de tempo

I = Caudal afluente (L^3/T)

O = Caudal efluente (L^3/T)

O caudal afluente é recebido de montante, consoante a área de influência do BMP em questão. O caudal efluente tem diferentes comportamentos consoante o tipo de descarregador que se considera, havendo no SUSTAIN diferentes algoritmos que permitem simular o escoamento através de descarregadores de cheia e de orifícios.

Em termos de descarregadores de cheia o *software* tem três possibilidades geométricas, descarregador rectangular de soleira delgada, descarregador triangular de soleira delgada e descarregador rectangular de soleira longa. Cada tipo de descarregador tem um algoritmo de vazão associado que influencia a evolução do escoamento. O SUSTAIN permite definir alguns BMP, que para além dos descarregadores mencionados anteriormente têm também orifícios descarregadores.

Infiltração

O processo de infiltração, que assume um papel importante no funcionamento de alguns dispositivos de drenagem urbana, pode ser estimado através de dois métodos: a equação de Holtan-Lopez e a equação de Green-Ampt (Carvalho, 2012). A equação de Green-Ampt já foi descrita neste capítulo anteriormente, podendo ser igualmente aplicada para simular a infiltração nas várias soluções de controlo na origem.

A equação de Holtan-Lopez calcula a taxa de infiltração em função da capacidade de armazenamento da camada superficial do solo, S_a (USEPA, 2009). A equação deste método apresenta-se de seguida:

$$f = GRI * A * S_a^{\frac{1}{4}} + f_c$$

Onde,

f = Taxa de infiltração (L/T)

GRI = Factor de crescimento do coberto vegetal em maturidade percentual, variando entre 0,1 e 1 (-)

A = Parâmetro vegetal que correlaciona a porosidade entre diferentes camadas de solo e a densidade das raízes vegetais com a capacidade de infiltração (-)

S_a = Capacidade de armazenamento da camada superficial de solo (L)

f_c = Taxa de infiltração constante (L/T)

Este método baseia-se nas premissas, de que o processo de infiltração é principalmente influenciado pelos parâmetros A e S_a da equação anterior.

Armazenamento subterrâneo

Em métodos de controlo na origem que considerem a infiltração das águas pluviais, o *software*

permite a criação de uma estrutura de armazenamento subterrânea, aumentando assim o volume de armazenamento e criando um atraso adicional no caudal efluente. Muitas vezes, quando se utilizam certas soluções de controlo na origem que se baseiam muito na infiltração e não existe um tipo de solo que permita uma taxa de infiltração muito elevada, é aconselhável a utilização deste tipo de estruturas subterrâneas. Na Figura 3.6, apresentada de seguida, ilustra-se o funcionamento deste tipo de estrutura.

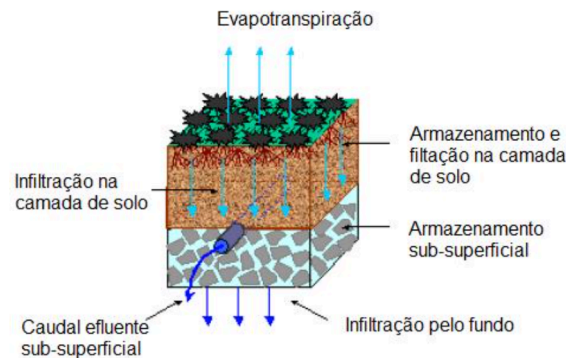


Figura 3.6 – Esquema ilustrativo do funcionamento da estrutura de armazenamento subterrâneo (Carvalho, 2012).

O caudal afluente à estrutura subterrânea depende da infiltração na camada de solo superior, o caudal efluente só é gerado quando se esgota a capacidade de armazenamento da estrutura, como se pode observar na figura. Este tipo de solução é opcional, estando ao critério do utilizador a sua modelação ou não.

Evapotranspiração

Tal como descrito na Figura 3.5, um dos processos hidrológicos que têm influência nas várias soluções de controlo na origem é a evapotranspiração. Os dados referentes a este processo hidrológico, podem ser incluídos na modelação dos vários BMP de três formas diferentes: 1) Introdução de constantes mensais para a taxa de evapotranspiração; 2) Cálculo do potencial de evapotranspiração utilizando séries diárias de evaporação; 3) Cálculo do potencial de evapotranspiração pelo método de Hamon.

Este último permite o cálculo do potencial de evapotranspiração através da temperatura do ar, número de horas de sol (calculado através da latitude que o utilizador introduza) e humidade absoluta do ar (calculado através da temperatura do ar).

Remoção e transporte de sedimentos

Tal como descrito no capítulo 3.1.1.1, o SUSTAIN permite o cálculo da remoção e transporte de sedimentos e poluentes da água. Assim, o módulo de simulação de BMP apresenta opções, tanto para o cálculo da remoção de poluentes como para a modelação de transporte dos mesmos nas várias soluções de controlo na origem. Para a remoção de poluentes e transporte dos mesmos, são utilizados diferentes algoritmos, como o método de decaimento de 1ª Ordem e modelo de mistura completa. Estes algoritmos não serão especificados, pois neste trabalho não foi avaliado esta componente do tratamento da água e, portanto, utilizaram-se os métodos que o *software* fornecia por

definição.

Base de dados de custo de BMP

O SUSTAIN permite fazer uma avaliação custo-eficiência das várias soluções de controlo na origem. Para tal, criou-se uma base de dados com os custos unitários (por unidade de comprimento, área, volume ou unidade) referentes aos diversos componentes individuais de cada BMP. O facto de se definirem os custos unitários ao invés do custo global por BMP, permite avaliar de que modo as variações dimensionais dos várias soluções podem afectar o custo global do modelo que se está a estudar.

Os custos definidos na base de dados fornecida, são referentes a valores de construção do EUA. No entanto, é possível o utilizador definir os custos de construção de acordo com a realidade económica em que se insere o seu modelo. Neste trabalho, os custos de construção que se utilizaram foram, em grande parte, retirados de artigos científicos e de pesquisa feita, não tendo sido utilizados os valores da base de dados.

3.1.1.3 Módulo de simulação de transporte

Este módulo de simulação calcula o escoamento e a qualidade do mesmo ao longo da rede de drenagem que é definida no modelo. No SUSTAIN, é possível definir os elementos da rede de drenagem como colectores ou canais de superfície livre, que encaminham o escoamento entre os diversos nós definidos.

Existem diferentes algoritmos e fórmulas consoante o transporte seja de sedimentos, poluentes ou simplesmente um escoamento pluvial. Apenas se apresenta uma descrição mais detalhada do funcionamento dos escoamentos pluviais ao longo da rede de colectores, pois a qualidade da água e transporte de sedimentos não foi objecto de estudo neste trabalho.

A evolução do escoamento pluvial ao longo dos colectores de drenagem é calculada com recurso ao método da onda cinemática. O método da onda cinemática caracteriza-se por não considerar regolfo nem a inversão do escoamento, não sendo aplicáveis em regimes lentos. O método admite que o escoamento varie espacial e temporalmente ao longo do colector, de modo a que o hidrograma de saída seja atenuado, comparativamente com o caudal afluente ao colector. Caracteriza-se pela sua eficiência computacional, podendo ser expresso de forma aproximada, pela equação de Gaukler-Manning-Strickler (Carvalho, 2012).

$$V = \frac{1}{n} * R_h^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Onde,

V = Velocidade média da água (L/T)

n = Coeficiente de rugosidade de Manning ($T*L^{-1/3}$)

R_h = Raio hidráulico (L)

S = Declive (L/L)

O caudal máximo que é transportado pelo colector, corresponde ao valor da secção cheia determinado pela equação de Manning-Strickler. Sempre que haja extravasamento, o caudal em excesso é encaminhado para o nó a jusante. Importa referir, que nesta dissertação não foi utilizada esta componente no SUSTAIN, mas sim no modelo em SWMM da rede de drenagem da bacia em estudo.

3.1.1.4 Módulo de Optimização

O módulo de optimização utiliza os resultados provenientes de todos os outros módulos, procedendo à avaliação de forma iterativa, do desempenho dos métodos de controlo na origem para os factores de avaliação e dados de custo escolhidos. Assim, são seleccionadas um conjunto de soluções que permitem atingir um determinado objectivo de redução e apresentem o melhor desempenho na relação custo-eficiência. Os parâmetros que são iterados, são parâmetros geométricos dos vários BMP, criando-se várias soluções diferentes em termos geométricos e, conseqüentemente, de custo.

Quer isto dizer que, o modelo de optimização está dependente da existência de parâmetros geométricos variáveis para os métodos de controlo existentes no modelo conceptual de simulação. Estes parâmetros geométricos, podem corresponder a comprimentos, alturas ou número de unidades de controlo, entre outros, dependendo do tipo de BMP introduzido, havendo a limitação de se considerar no máximo um parâmetro variável para cada tipo de estrutura de controlo na origem existente na simulação.

Os outros *inputs* necessários para a optimização do modelo são a definição do local de avaliação, quais os objectivos de controlo, o factor de avaliação que se pretende medir e os custos associados aos vários BMP. O local de avaliação corresponde ao ponto do sistema no qual se pretende realizar a análise de desempenho, sendo que o ponto do sistema terá de corresponder a um BMP, nó de ligação ou dispositivos de saída. Os factores de avaliação possíveis de serem avaliados dividem-se em factores qualitativos e quantitativos. Os factores quantitativos estão relacionados com o aumento de escoamento superficial devido à urbanização, podendo analisar-se o caudal de ponta, volume anual de escoamento e frequência de excedência. Os factores qualitativos estão relacionados com a qualidade do escoamento, podendo analisar-se carga anual média de sedimentos/poluentes, a concentração anual média de sedimentos/poluentes e a concentração média máxima de sedimentos/poluentes. Os objectivos de controlo estão associados aos factores em medição, podendo ser um valor específico ou um intervalo de valores (Carvalho, 2012).

Os *outputs* deste módulo são as soluções quase-óptimas dentro dos vários parâmetros definidos. Os resultados vêm sobre a forma de gráficos, sendo todos centralizados num pós processador-próprio que permite ao utilizador avaliar toda a informação respeitante ao modelo em análise. É também possível obter-se os valores referentes à geometria que cada BMP apresenta por solução. A interpretação que deve ser feita dos *outputs* deste módulo são explicados no capítulo seguinte.

3.1.2 Interpretação de resultados

Como já referido no capítulo anterior, 3.1.1.4, os *outputs* da simulação são centralizados num pós-processador e apresentados sob a forma de gráficos, facilitando a análise de resultados e comparação entre os vários cenários. Cenários esses, que são identificados como cenários de pré-desenvolvimento, pós-desenvolvimento e pós-desenvolvimento com BMP. Estas designações dizem respeito respectivamente, à situação do terreno sem qualquer tipo de desenvolvimento urbano, situação com desenvolvimento urbano mas sem medidas de controlo na origem e, finalmente, à situação de desenvolvimento urbano com medidas de controlo na origem aplicadas.

Este pós-processador divide-se em quatro componentes fundamentais de interpretação, a caracterização de eventos pluviométricos, visualizador de eventos pluviométricos, síntese do desempenho dos BMP e curva de custo-eficiência (Carvalho, 2012). Seguidamente será feita uma descrição sintetizada destas quatro componentes.

3.1.2.1 Caracterização de eventos pluviométricos

O SUSTAIN individualiza e quantifica os diferentes eventos pluviométricos a partir do ficheiro meteorológico que se introduz na concepção do modelo. Os eventos pluviométricos, apesar de serem quantitativamente iguais, podem produzir diferentes escoamentos superficiais. Tal acontece devido às condições do solo que temos quando determinado evento acontece, ou seja consoante o número de dias a seco antecedentes a determinado evento teremos uma resposta da bacia diferente.

Assim sendo, o *software* quantifica o número de eventos pluviométricos consoante o número de horas a seco necessários para o restabelecimento das condições naturais, impondo que cada evento seja antecedido e precedido por um intervalo de tempo mínimo igual ao número de horas a seco. Na Figura 3.7 apresenta-se uma imagem exemplificativa do tipo de gráfico que se consegue observar no SUSTAIN.

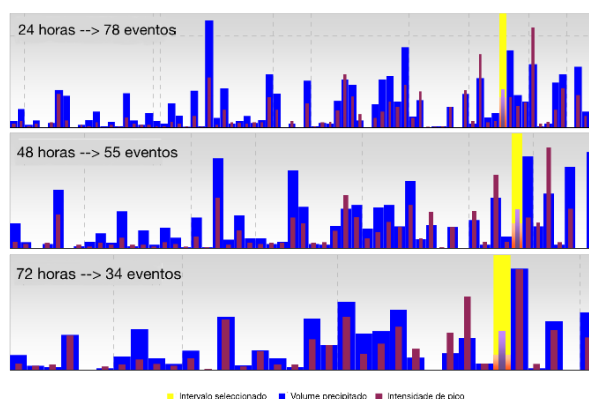


Figura 3.7 – Exemplo de um gráfico referente a um ficheiro meteorológico. Comparação entre o número de eventos pluviométricos e o número de horas a seco entre eventos, adaptado de (USEPA, 2009).

Como se pode observar na Figura 3.7, e como seria de esperar, o número de eventos desce à medida que se considera maior o número horas a seco entre eventos.

Faz-se a ressalva que neste trabalho, não se utilizou uma ficheiro meteorológico anual representativo

da realidade, mas sim o de um evento pluviométrico único. Pelo que, estes gráfico têm uma apresentação diferente, no entanto a mesma interpretação.

3.1.2.2 Visualizador de eventos pluviométricos

Assim que os eventos pluviométricos estejam definidos, podem ser individualmente analisados quanto ao seu desempenho. Este visualizador apresenta gráficos para três situações específicas, a situação de pré-desenvolvimento, pós-desenvolvimento e pós-desenvolvimento com BMP. Na Figura 3.8 apresenta-se um exemplo de um gráfico referente a um evento pluviométrico.

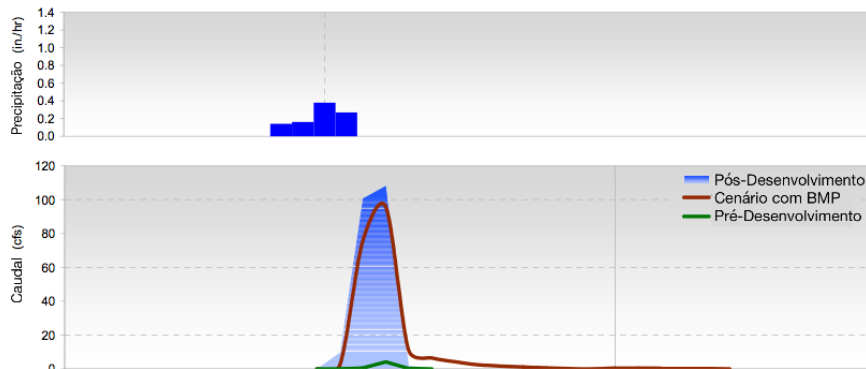


Figura 3.8 – Exemplo de um acontecimento pluviométrico para três cenários distintos, adaptado de (USEPA, 2009)

3.1.2.3 Síntese do desempenho dos BMP

Esta componente do pós processador, permite uma análise mais detalhada do desempenho das soluções de controlo na origem, por evento pluviométrico, face aos vários cenários. O primeiro gráfico que se apresenta, tem representado três séries independentes, como é possível observar na Figura 3.9.

A série representada por círculos, traduz a redução percentual obtida por evento pluviométrico do cenário de pós-desenvolvimento com BMP face ao cenário de pós-desenvolvimento sem BMP. Na Figura 3.9 é possível observar que, geralmente, os eventos pluviométricos mais volumosos não são tão eficazmente controlados pelas soluções de controlo na origem, no entanto, convém referir que este não é o único factor condicionante, a intensidade do evento também influencia em muito a eficácia das soluções.

A série representada por linhas horizontais, compara a redução percentual por evento pluviométrico do cenário de pré-desenvolvimento com o cenário de pós-desenvolvimento sem BMP.

A comparação entre estas duas séries, permite verificar se a aplicação de BMP permite obter desempenhos similares ou superiores às condições de pré-desenvolvimento, situação que ocorre sempre que a série de linhas horizontais iguala ou supera a série representada por círculos (Carvalho, 2012).

A terceira série consiste num gráfico de barras, que é lido no eixo vertical da direita, que quantifica a contribuição percentual de cada evento pluviométrico para o parâmetro em análise.

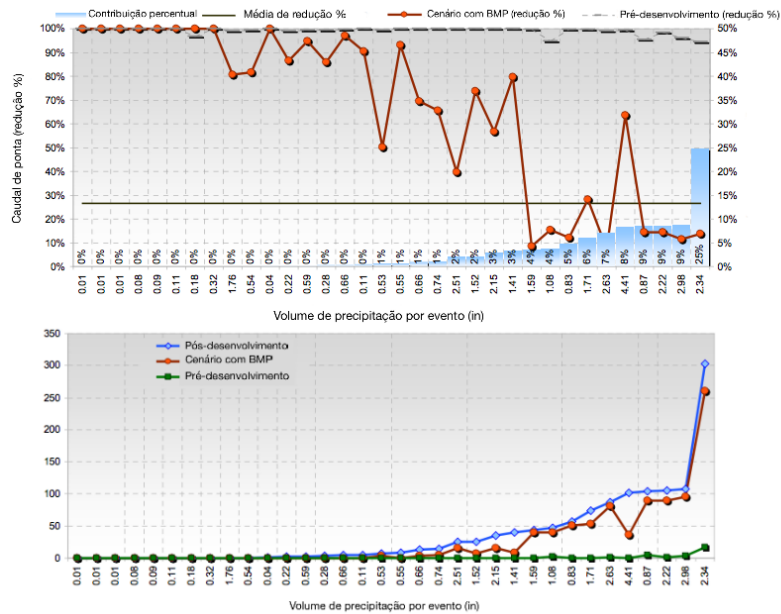


Figura 3.9 – Exemplo de gráficos para a redução do caudal de ponta, num intervalo temporal com 34 eventos pluviais, adaptado de (USEPA, 2009)

O gráfico de baixo é um suplemento ao primeiro, onde está representada a comparação entre os três cenários do parâmetro em análise.

3.1.2.4 Curva de custo eficiência

Finalmente, a última componente do pós-processador é representada por um gráfico que relaciona o custo das várias soluções aplicadas, com a eficiência na redução de um determinado factor de avaliação. A este gráfico é dado o nome de curva custo-eficiência.

Esta curva é criada após o processo iterativo que se realiza no módulo de optimização, através do método de optimização NSGA-II. Este método permite traçar uma curva fronteiriça com as soluções de melhor desempenho. Na Figura 3.10 é possível observar um exemplo de uma curva de custo eficiência, onde se observa que as soluções de fronteira (representadas a laranja) são as soluções da curva custo eficiência e portanto, são as soluções com melhor desempenho.

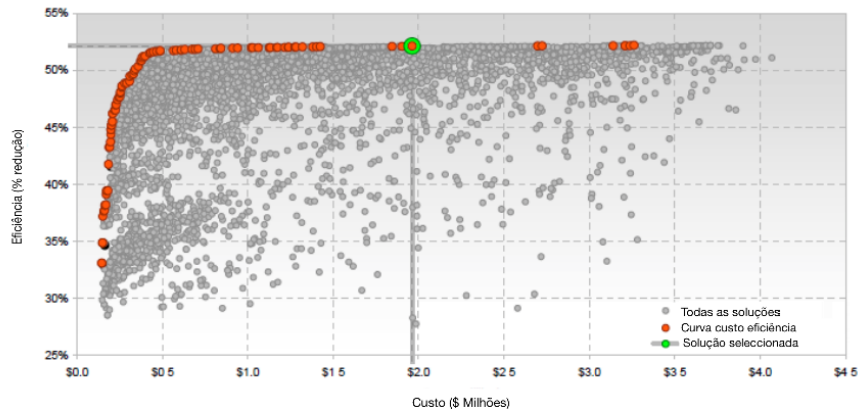


Figura 3.10 – Exemplo de uma curva de custo eficiência, adaptado de (USEPA, 2009)

Por análise da Figura 3.10, rapidamente se percebe que as soluções mais eficazes face ao custo, são

as que se encontram na zona de transição de declive da curva custo eficiência, pois são as soluções que conseguem ter mais eficácia para um custo de implantação menor.

O pós-processador produz ainda mais um gráfico, que está associado ao gráfico da curva custo eficiência. Na Figura 3.11, pode-se observar um exemplo representativo deste gráfico. Este, caracteriza cada solução em termos da sua constituição de BMP, mostrando no gráfico circular a percentagem do custo que os vários BMP têm no custo total de implantação (o gráfico circular muda consoante a solução selecionada na curva custo eficiência).

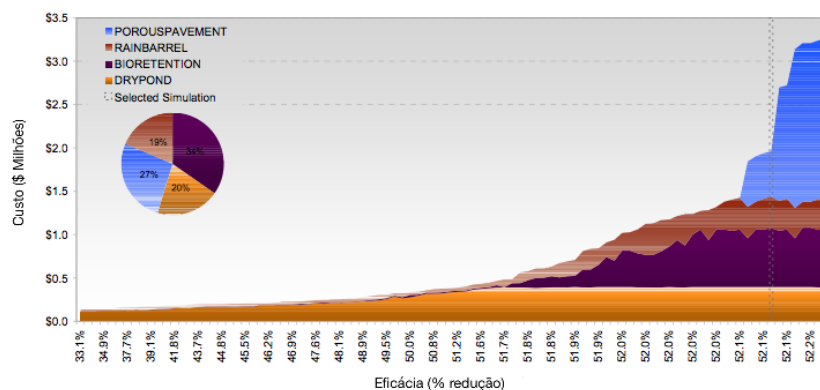


Figura 3.11 – Exemplo de uma distribuição de custos de BMP face ao custo total de implantação de uma determinada solução quase-ótima, adaptado de (USEPA, 2009)

3.2 SWMM (Storm Water Management Model)

O *software* SWMM foi desenvolvido por volta de 1961-1971, tendo sofrido desde então diversas melhorias e alterações. Este modelo conceptual é amplamente utilizado na simulação de eventos singulares ou contínuos em zonas primordialmente urbanas. Tem também o intuito de simular a quantidade e qualidade do escoamento em sistemas de drenagem unitários, por meio da introdução de dados de precipitação, meteorológicos e características físicas do sistema a modelar. Deste modo, com base nos dados introduzidos, o SWMM faz uma corrida onde em cada passo de cálculo se contabilizam diversos processos hidrológicos como as perdas por infiltração, evaporação, retenção das águas pluviais entre outros. Tal como o SUSTAIN (que foi programado com base no SWMM), o SWMM modela o escoamento subterrâneo através da utilização de volumes de infiltração. Para tal, possui dois modelos de infiltração: *Horton* e *Green-Ampt*. (Ferraz, 2013)

Em linhas muito gerais, o SWMM opera da seguinte forma:

- Componente de escoamento superficial: atua nas áreas das bacias gerando, a partir da precipitação solicitada, o escoamento e quantidade de poluentes.
- Componente de escoamento na rede: Transporta o escoamento através do sistema de condutas, canais, unidades de armazenamento/tratamento, bombas e aparelhos de regulação.

O *software* tem a capacidade de fornecer dados ao longo do tempo, dando-nos indicação do volume e escoamento gerado em cada sub-bacia, bem como o caudal, altura de escoamento e qualidade da

água em cada tubagem e canal (USEPA, 2005).

O SWMM é um programa que já existe há algum tempo, já tendo tido várias versões e acertos, é um software mundialmente conhecido e largamente utilizado, pelo que se faz uma síntese mais sucinta. Importa referir que o SUSTAIN é desenvolvido tendo por base as linhas de código do SWMM, pelo que grande parte do que já foi descrito aplica-se também ao SWMM.

3.2.1 Estrutura e principais módulos do software

Como já referido o SUSTAIN foi desenvolvido tendo em conta todo o algoritmo e linhas de código do SWMM, pelo que grande parte da estrutura de ambos é muito similar. As simulações do SWMM são resultado da execução sequencial de módulos de programa, que embora com ligeiras diferenças, são bastante parecidos com alguns dos módulos já descritos para o SUSTAIN.

- Bloco *Runoff*: Este bloco tem a funcionalidade de simular fenómenos de quantidade e qualidade do escoamento superficial nas bacias de drenagem. Ou seja, faz a transformação dos eventos pluviométricos em escoamento superficial nas bacias de drenagem. Para tal, recorre a um balanço hidrológico, contabilizando não só a precipitação, mas também a infiltração, evaporação, acumulação de neve (se existente), intercepção e armazenamento em depressões.
- Bloco de *Transport*: É através desta secção que o software modela o transporte de água na rede de colectores com base no modelo cinemático. É também neste bloco que se procede à simulação da poluição que o escoamento superficial pode arrastar e acumular, simulando o transporte destas cargas poluentes.
- Bloco *Storage/Treatment*: Interage com os outros dois acima descritos, estimando a produção de cargas poluentes presentes no escoamento verificado, para o número de componentes de qualidade definidos pelo utilizador.
- Bloco *Extran*: Por sua vez o presente bloco é responsável pela modelação hidrodinâmica em colectores e canais. Para tal, recorre as equações de *Saint-Venant*, o que lhe permite simular escoamentos em pressão, sobrecargas, escoamentos em sentidos inversos, condições limite dinâmicas (p.e: efeitos de maré), entre outras.

3.2.2 Principais objetos utilizados

A utilização do modelo SWMM pressupõem o desenho e definição de todas as componentes físicas do sistema de drenagem em análise, desde bacias de drenagem, colectores, sistemas de bombagem, caixas de visitas, medidas de controlo na origem, entre outros (Ferraz, 2013). Faz-se de seguida uma breve descrição dos principais componentes do modelo utilizados:

- Caixas de visita: As caixas de visita são nós no sistema de drenagem para onde confluem os colectores. A sua definição no software é feita através da inserção dos dados correspondentes à cota da soleira, altura da caixa de visita e atribuição de caudal externo a adicionar, quando aplicável.

- Colectores: Os colectores são tubagens ou canais que levam o caudal de um nó ao outro no sistema de drenagem a modelar. De ressaltar que, uma vez mais, os nós podem representar diversas estruturas como câmaras de visita, bacias de retenção, bacias de descarregamento ou dispositivos de descarga. A definição dos colectores no SWMM é feita através da introdução dos parâmetros nós de entrada e nó de saída, comprimento, rugosidade, cotas de tubagem a montante e jusante, diâmetro e forma de secção.
- Bacias de drenagem: As bacias de drenagem são representadas como unidades de terreno cujas topografias e ocupação do solo são determinantes para a quantidade de escoamento superficial produzida, que é direcionada para um único ponto de descarga. A definição é feita através da introdução dos parâmetros como declive médio, coeficiente de *Manning* para zonas permeáveis e impermeáveis, definição da área permeável, qual o posto udométrico alocado à bacia e ainda quais as soluções de controlo na origem que se aplicam na bacia em questão.
- Posto Udométrico: Com este objecto, o utilizador pode definir os dados de precipitação que afectam uma ou mais bacias de drenagem. A introdução dos dados pode ser feita manualmente ou utilizando um ficheiro externo.
- Unidades de Armazenamento: Tal como o nome indica, estes objetos representam nós do sistema de drenagem que armazenam volumes de escoamento. Estas unidades de armazenamento podem ser utilizadas para modelar tanto bacias de retenção, como lagos ou mesmo poços húmidos. A definição deste tipo de objecto, passa pela atribuição da sua cota de soleira, profundidade máxima e forma geométrica.
- Soluções de Controlo na Origem (LID): A sigla LID vem do anglo-saxónico *Low Impact Development*. O SWMM, permite que se introduzam as soluções de controlo na origem de duas formas diferentes, ou se cria uma bacia de drenagem para cada solução ou se introduzem as várias soluções numa bacia de drenagem já existente. Em termos de resultados ambas as formas são equivalentes, sendo que a segunda solução provoca alterações em certos parâmetros da bacia de drenagem em questão.

O SWMM, permite modelar cinco soluções de controlo na origem diferentes:

- Bio-Retenção;
- Pavimentos Porosos
- Trincheiras de infiltração;
- *Rain Barrels* (Detenção de água das chuvas em cisternas/barris);
- Valas revestidas com coberto vegetal.

A metodologia computacional que o software segue para modelar estas soluções de controlo na origem, são análogas às já descritas no subcapítulo 3.1.1.2.

O desempenho das soluções reflete-se no escoamento superficial total que é encaminhado para a rede de drenagem. É ainda possível observar-se os resultados do balanço hidrológico em cada solução de controlo na origem introduzida, permitindo ver os resultados dos vários processos hidrológicos que são considerados.

3.2.3 Visualização dos resultados fornecidos

A visualização dos resultados pode ser efectuada de diversas formas, o SWMM permite visualizar de forma animada, a evolução temporal de diversas características hidráulicas do escoamento ao longo da representação gráfica do perfil longitudinal dos diversos colectores.

É também possível analisar o sistema de drenagem modelado como um todo, no entanto temos de seleccionar previamente uma característica e uma componente do sistema, permitindo uma análise animada no sistema todo da característica hidráulica seleccionada.

Finalmente, a representação de resultados através de tabelas de resultados também é possível, permitindo a representação de várias características hidráulicas num único objecto ou a mesma característica hidráulica para diferentes objetos (Ferraz, 2013)

Após a modelação poder-se-ão analisar as seguintes características hidráulicas do escoamento:

- Altura de escoamento em cada troço de colector;
- Velocidade de escoamento em cada troço de colector;
- Caudal descarregado em cada troço de colector;
- Altura de água nas caixas de visita;
- Caudal descarregado em cada caixa de visita;
- Caudal descarregado pelos descarregadores.

4 Caso de Estudo: Modelação do desempenho de soluções de controlo na origem e do sistema de drenagem da bacia hidrográfica da Av. Almirante Reis

Como descrito no capítulo 2, atualmente os sistemas de drenagem urbanos estão sobre grande pressão. As principais razões para tal são devidas ao crescimento e planeamento urbano, alterações climáticas e a cada vez maior impermeabilização das cidades. Todos estes factores levam a que os sistemas de drenagem, por vezes, não tenham a capacidade de vazão necessária, levando a que haja inundações.

Posto isto, surge então a necessidade de encontrar soluções para mitigar estes problemas que tendem a agravar-se. Neste trabalho pretende-se estudar o desempenho de soluções de controlo na origem, tentando fazer a ligação entre estas soluções e a requalificação urbana. Assim, o objectivo final é a redução do escoamento superficial nas bacias urbanas através do aumento de zonas permeáveis e de retenção de água.

Neste capítulo vai-se descrever e analisar o modelo em SUSTAIN que se construiu. Este modelo tem o objectivo de estudar a eficácia das soluções de controlo na origem face a determinado evento pluviométrico, numa bacia urbana com elevados índices de impermeabilização. Pretende-se assim fazer a comparação, entre a bacia sem qualquer intervenção e com a utilização de soluções de controlo na origem. No fim espera-se obter-se as dimensões óptimas dos BMP tendo em conta o Custo/Eficácia dos mesmos.

Após se analisarem os resultados deste último modelo, faz-se a introdução dos mesmos no modelo em SWMM já feito, de maneira a perceber-se em que medida é que a introdução de soluções de controlo na origem na malha urbana edificada, pode beneficiar o atual sistema de drenagem implantado. No final pretende-se concluir se este tipo de medidas pode ou não trazer os devidos benefícios.

4.1 Caracterização da bacia hidrográfica em estudo

A bacia urbana que se escolheu para estudar o desempenho e influência que as soluções de controlo na origem podem ter, foi a bacia hidrográfica da Avenida Almirante Reis. Neste capítulo começa-se por fazer uma breve descrição da bacia e suas características.

4.1.1 Seleção da Bacia hidrográfica da Av. Almirante Reis

A escolha desta bacia hidrográfica recai sobre vários aspectos. Primeiro, o facto de haver um modelo já feito em SWMM, que se pode utilizar com introdução de novos dados retirados do SUSTAIN em termos de soluções na origem optimizadas para redução de *runoff*. Segundo, o facto desta ser uma zona afectada por fenómenos de *flash floods* e ter grande influência na ocorrência das mesmas em zonas a jusante. Finalmente, e pretendendo aliar a aplicação de soluções de controlo na origem à requalificação da cidade, esta é uma zona da cidade com clara necessidade de requalificação.

Pela Figura 4.1 na imagem da esquerda, pode observar-se que, geográfica e morfologicamente a Av. Almirante Reis está implantada sobre uma linha de água, estando neste momento canalizada subterraneamente. Tal facto, implica necessariamente a escorrência das águas pluviais para esta zona, aumentando não só a probabilidade de inundações urbanas, como acaba por ser uma zona canalizadora para as áreas urbanas a jusante. Segundo Oliveira e Ramos, 2002, os locais mais frequentemente inundados distribuem-se pela frente ribeirinha, Baixa pombalina e Avenidas Almirante Reis e Liberdade. Nestas zonas, a Baixa e o Rossio são dos locais com mais frequência de inundações urbanas, situando-se justamente na confluência dos vales da Av. Liberdade e Av. Almirante Reis. Estes factores, tornam a bacia hidrográfica da Av. Almirante Reis numa zona de potencial estudo da eficácia de métodos alternativos de drenagem, nomeadamente os métodos de controlo na origem. Na Figura 4.1 na imagem da direita, apresenta-se um gráfico de barras representativo das zonas da cidade de Lisboa com mais inundações por década. Repare-se que a Av. Almirante Reis enquadra-se nos locais com cerca de 10 inundações por década, o que mostra a propensão que este local tem para este tipo de eventos.

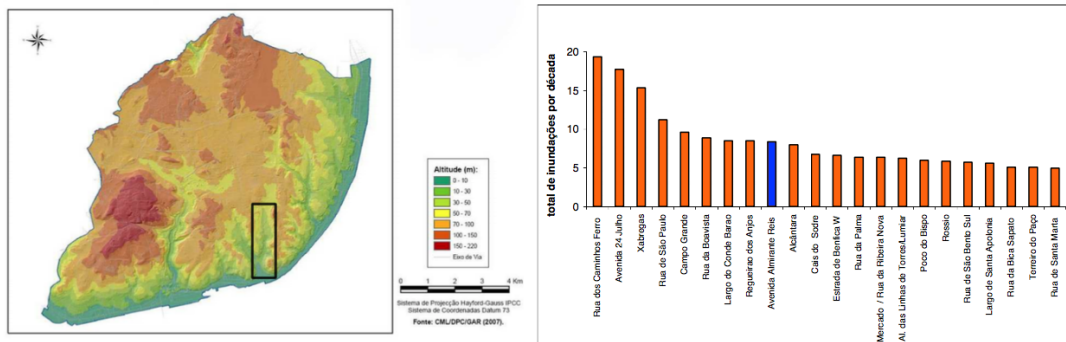


Figura 4.1 – Imagens representativas da hipsometria da Av. Almirante Reis e gráfico de barras representativo das zonas da cidade de Lisboa com mais inundações (Adaptadas de (Câmara Municipal de Lisboa, 2010); (Oliveira e Ramos, 2002)).

Ao contrário da Avenida da Liberdade, a Avenida Almirante Reis teve um desenvolvimento populacional e da malha urbana que não garantiu a manutenção e requalificação regular que é necessário nas cidades. Tal facto, levou a que esta zona ficasse degradada e com muitos edifícios em estado devoluto. Assim, esta bacia enquadra-se no âmbito de tentar aliar a adaptação dos sistemas de drenagem com soluções de controlo na origem e a requalificação urbana. De seguida algumas imagens representativas de edifícios na zona em questão, com necessidade de manutenção e requalificação.



Figura 4.2 – Fotografias de prédios existentes na Av. Almirante Reis em avançado estado de degradação.

4.1.2 Delimitação da área de modelação

A área em análise situa-se no centro de Lisboa, representando uma das principais Avenidas da cidade. Esta bacia caracteriza-se por ser uma zona com uma elevada taxa de impermeabilização, logo uma zona da cidade totalmente desenvolvida e ocupada por edifícios e arruamentos. Este facto poderia afectar a introdução de soluções de controlo na origem, no entanto neste trabalho pretende-se aliar estas soluções com uma possível requalificação da malha urbana. Pelo que, em algumas zonas com pouco espaço ou edifícios devolutos, considerou-se a possibilidade de se colocar BMP's numa perspectiva de evolução e requalificação futura da malha urbana. Esta foi a principal razão para a não utilização da ferramenta de seleção de locais de implantação de BMP. A delimitação da bacia hidrográfica que se utilizou é visível na Figura 4.3, tendo sido feita com base nas linhas de cumeada e linhas de água.



Figura 4.3 - Delimitação da bacia hidrográfica da Avenida Almirante Reis

4.1.3 Tipo de solo

Um dos factores mais condicionantes no que toca à utilização de soluções de controlo na origem é o tipo de solo. A razão de ser deste factor ser muito influente, tem que ver com o facto de muitas das soluções que se utilizam atualmente dependerem da taxa de infiltração da água pluvial. Assim sendo, a definição do tipo de solo que podemos encontrar na bacia em estudo tem grande importância.

Para que se pudesse retirar algumas conclusões quanto ao tipo de solo e parâmetros físicos da bacia hidrográfica da Avenida Almirante Reis, consultou-se a Carta Geológica do Concelho de Lisboa. Na Figura 4.4 está representada a área em estudo (em destaque à esquerda) bem como os tipos de unidades geológicas com relevância (em destaque à direita).

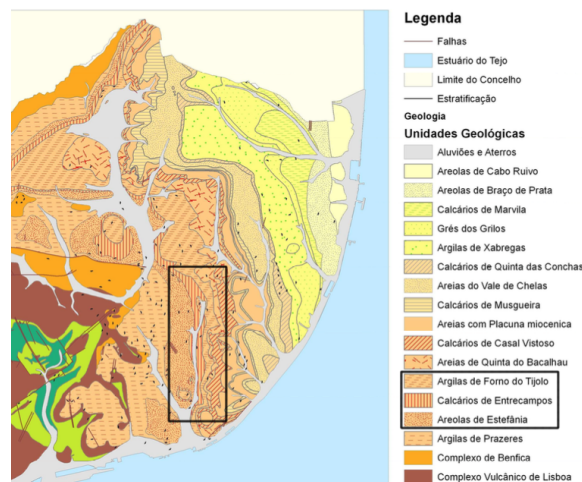


Figura 4.4 – Representação de parte da Carta Geológica do Concelho de Lisboa (Adaptado de (Câmara Municipal de Lisboa, 2010))

Como descrito no capítulo 3.1.1.1, o SUSTAIN utiliza o modelo de Green – Ampt para calcular a infiltração nas zonas definidas como permeáveis. Este modelo permite caracterizar o solo em termos da sua capacidade infiltrante através de três parâmetros, a condutividade hidráulica, sucção na frente de humedecimento e défice de humidade inicial. Para se obter os valores destes parâmetros referentes às unidades geológicas relevantes da zona em estudo, recorreu-se a valores de referência para diferentes tipos de solo.

Segundo a nota explicativa da folha 34-D Lisboa (nota explicativa referente à carta geológica consultada) conclui-se quais os tipos de solo das unidades geológicas em questão.

- Areolas de Estefânia – Areia Argilosa
- Calcários de Entrecampos – Silte Arenosa
- Argilas de forno do Tijolo – Solo Franco Argiloso

Os valores de referência dos parâmetros do modelo de Green – Ampt para este tipo de solos são os apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Parâmetros de referencia do modelo de Green-Ampt, adaptado de (Maidment, 1993)

Classificação dos solos em termos de textura	Sucção na frente de humedecimento (mm)	Conductividade Hidráulica (mm/hr)	Défice de humidade inicial	
			Solos húmidos	Solos secos
Areia	49,50	235,60	0,35	0,40
Silte Arenosa	166,80	6,80	0,17	0,37
Areia Argilosa	218,50	3,00	0,14	0,25
Franco Argiloso	208,80	2,00	0,15	0,27
Argila	316,30	0,60	0,08	0,20

Ressalva-se que, no que toca à eficácia das soluções de controlo na origem, os solos com maior importância são os superficiais. Assume-se que os solos representados na carta geológica, têm muita influência na camada de solo mais superficial, no entanto, não a representam com total fiabilidade, pelo que se optou por definir parâmetros médios que representassem a globalidade do solo da bacia. Assim, os valores finais dos parâmetros utilizados para definir a capacidade infiltrante do solo são:

- Sucção na frente de humedecimento – 198,12 mm
- Condutividade hidráulica – 4,5 mm/hr
- Défice de humidade inicial – 0,15 (solos húmidos) ; 0,3 (solos secos)

4.1.4 Tipo de Ocupação urbana

Como já referido anteriormente, esta é uma zona da cidade altamente impermeabilizada e com grande taxa de ocupação do terreno, pelo que, para além de informação topográfica utilizou-se também informação relativa ao tipo de ocupação urbana. Quer isto dizer que se fez uma identificação dos edifícios, jardins, arruamentos e outras estruturas presentes na bacia. Esta identificação, permite uma divisão entre as zonas que são consideradas permeáveis e as impermeáveis. Na Figura 4.5, à esquerda, representa-se os vários elementos identificados na bacia e à direita, a divisão entre áreas permeáveis e impermeáveis.

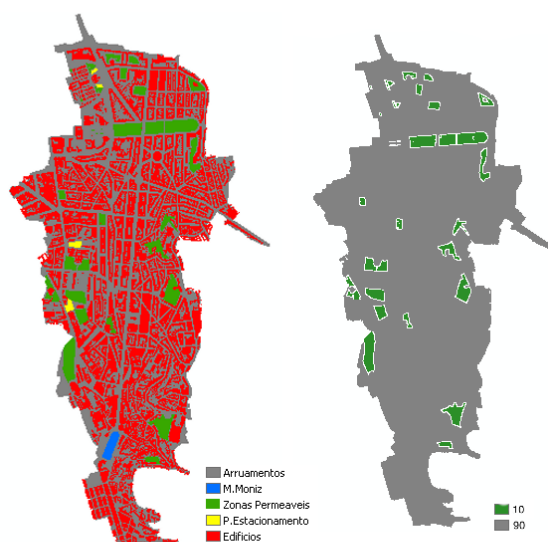


Figura 4.5 – Esquema ilustrativo dos elementos identificados na bacia e divisão entre áreas permeáveis e impermeáveis.

Como se pode concluir da análise à Figura 4.5, a classificação dos vários elementos considerados no

tipo de ocupação urbana é bastante simples. Neste caso, considerou-se que tudo o que eram jardins ou zonas relvadas teria uma taxa de impermeabilização de 10%, ao passo que tudo o resto teria uma taxa de 90% de impermeabilização. Para se identificar os vários jardins e zonas relvadas, recorreu-se ao *Google Maps* e a observações efectuadas no local.

4.2 Metodologia adoptada

Importa agora definir qual a metodologia que se pretende seguir, para que se atinjam os objectivos finais deste trabalho.

Estando já identificada geograficamente e definidas as principais características da bacia hidrográfica em estudo, começa-se por definir quais as soluções de controlo na origem que se vão utilizar e os locais de implantação das mesmas. A decisão de quais os BMP a utilizar bem como quais os locais de implantação, estão justificados mais à frente. Assim, após esta definição, constrói-se o modelo em SUSTAIN.

De seguida e para que se possa utilizar o modelo construído, define-se o evento pluviométrico que servirá de base para solicitar os dois modelos, o do SUSTAIN e o do SWMM. O evento pluviométrico que se utilizou foi o mesmo que foi utilizado no PGDL e teve como base o hietograma de projecto para Portugal, sendo a intensidade dos blocos determinada de acordo com as linhas IDF determinadas para Lisboa (Leboeuf et al., 2015). De seguida, adaptou-se este hietograma para que pudesse correr no SUSTAIN, visto que este *software* apenas lê eventos com um intervalo horário. Assim, para este caso de estudo, foi utilizado um evento de precipitação horária com 5 horas. Na Figura 4.6 apresenta-se o gráfico representativo do evento pluviométrico que se utiliza. Refira-se que o SUSTAIN utiliza as unidades do sistema norte americano, logo todos os gráficos retirados do modelo serão apresentados nessas unidades. Estuda-se a influência deste evento pluviométrico para tempos de retorno de 5, 10 e 20 anos.

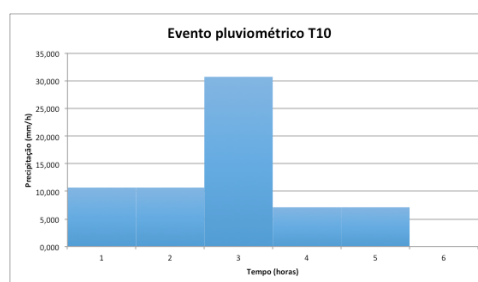


Figura 4.6 – Gráfico representativo do evento pluviométrico que foi utilizado para solicitar os modelos.

Definido o modelo e o evento pluviométrico que se irá solicitar ao mesmo, retiram-se as eficácias e os resultados que o modelo gera. Neste caso, aquilo que pretendemos retirar, são as medidas geométricas óptimas que permitem uma melhor relação custo/eficácia de redução de volume de escoamento. Ou seja, para cada BMP é escolhido um parâmetro que se pretende que seja otimizado (comprimento, numero de unidades, profundidade, etc.), retirando-se quais as medidas geométricas óptimas que permitem uma melhor relação custo/eficácia. Retiram-se também os custos de implantação e construção da solução escolhida.

Tendo as medidas geométricas óptimas das várias soluções de controlo na origem, faz-se a introdução desses dados no modelo em SWMM da rede de drenagem da bacia hidrográfica em estudo, avaliando-se assim a influência direta das soluções de controlo na origem e os seus efeitos na rede de drenagem urbana.

A metodologia que se adopta para estudar a influência deste tipo de soluções na rede de drenagem, através do modelo SWMM, passa por correr quatro cenários diferentes. O primeiro cenário, é aquele que representa a situação atual, neste caso precipitação sem qualquer tipo de aumento e a malha urbana tal e qual como a conhecemos.

No segundo cenário, introduzem-se as soluções de controlo na origem e mantem-se o evento de precipitação inalterado. Assim, conseguimos concluir se existe ou não melhoramento, através da introdução de soluções de controlo na origem na malha urbana, face à situação atual.

Finalmente, criam-se um terceiro e quarto cenários em que se contemplam as alterações climáticas, aumento da intensidade de precipitação e subida do nível médio do mar, introduzindo-se as soluções de controlo na origem apenas no terceiro cenário, representando este, uma situação hipotética futura tanto a nível das alterações na malha urbana como nas condições climáticas. Já o quarto cenário, pretende representar a situação futura caso não se tomem quaisquer medidas em relação às alterações climáticas, deixando a malha urbana tal e qual como se encontra atualmente.

Posto isto, fazem-se as devidas comparações entre os cenários permitindo tirar conclusões face à eficácia deste tipo de soluções na drenagem urbana.

4.3 Modelação de desempenho de Soluções de Controlo na Origem

Após definição das principais características físicas da bacia hidrográfica em estudo, começa-se por definir quais as soluções de controlo na origem que se pretendem utilizar e qual a sua distribuição na malha urbana. Posto isto, desenha-se o modelo e retiram-se resultados. Neste capítulo pretende-se descrever o modelo que é utilizado e apresentar os resultados que retiramos da aplicação do mesmo.

4.3.1 Objectivo de redução

Como já descrito anteriormente, a bacia em questão apresenta-se quase na sua totalidade impermeabilizada. Tendo em conta as alterações nos regimes de precipitação que se preveem devido às alterações climáticas, nomeadamente o aumento da intensidade de precipitação, o objectivo de redução é focado em reduzir os caudais pluviais de possíveis eventos futuros, de maneira a que a situação atual se mantenha. Assim, pretende-se aferir em que medida as soluções de controlo na origem compensam os aumentos de escoamento superficiais causados devido às possíveis alterações climáticas, nomeadamente o aumento de volume de escoamento por evento pluviométrico.

Para que se possa avaliar a influência destas soluções em eventos futuros, ao evento pluviométrico que se faz solicitar nos modelos é aplicado um aumento em cerca de 20% na sua intensidade, pois

como descrito no capítulo 2.1.2, prevê-se que no futuro a intensidade dos eventos aumente nessa percentagem. Assim, retiram-se as percentagens de redução que as soluções de controlo na origem terão num cenário de precipitação futuro.

Esta abordagem permite compreender até que ponto, este tipo de soluções consegue ou não mitigar o cada vez maior risco de inundações urbanas.

4.3.2 Seleção de Soluções de Controlo na Origem e locais de implantação

Como já referido anteriormente esta é uma bacia com níveis de ocupação elevados, pelo que a seleção das soluções de controlo na origem que se vão utilizar e as áreas que se vão ocupar, serão sempre numa perspectiva de melhoramento do planeamento urbano conjuntamente com a redução dos caudais superficiais criados pelas chuvas.

Todo este modelo é definido na ideia de planeamento sustentável, conceito já referido no capítulo 2.2.3, em que se pretende que haja uma alteração da malha urbana de maneira a que se melhore a flexibilidade e sustentabilidade das infraestruturas de drenagem da cidade. Com esta ideia em mente, definiram-se as várias soluções que se iriam utilizar e em que medida é que a implantação das mesmas em certas zonas da bacia, iria requalificar a malha urbana. Assim, de entre as soluções de controlo na origem já referidas anteriormente e que o SUSTAIN modela, utilizaram-se as seguintes: Bacias de Detenção; Telhados Verdes; Trincheiras de Infiltração; Pavimentos Porosos.

Para identificação de quais os possíveis e melhores locais de implantação das respectivas soluções de controlo na origem, fez-se uma observação local dos principais bairros da bacia hidrográfica.

4.3.2.1 Bacias de Detenção

Os locais que se consideraram como sendo mais aptos à implantação deste tipo de estrutura, foram locais que tivessem algum espaço e eventualmente com edifícios devolutos, que atualmente não têm qualquer função. Assim, identificaram-se três possíveis zonas de implantação de bacias de detenção que se identificam de seguida na Figura 4.7.



Figura 4.7 – Identificação e localização dos locais escolhidos para implantação de bacias de retenção

Como se pode observar, estes são edifícios em mau estado de conservação e sem qualquer utilização. São também zonas com áreas razoáveis que permitem a criação de zonas verdes aproveitando-se assim o espaço urbano para atenuar os efeitos do aumento de intensidade dos eventos pluviométricos. Na Figura 4.8 exemplificam-se possíveis soluções que podem ser idealizadas para estas zonas urbanas. Faz-se a ressalva que o que se idealiza nestas imagens, poderá fazer sentido no caso de sistemas de drenagem separativos. No entanto, no caso de estudo o sistema de drenagem é unitário, pelo que estes dispositivos são modelados como grandes reservatórios enterrados.

Para que se possa representar estas soluções, modela-se no SUSTAIN uma bacia de retenção para cada uma destas zonas tendo em conta a área máxima que se pode ocupar. As bacias serão identificadas ao longo deste documento pelos números que lhes estão associados na Figura 4.7. Refira-se que não se considerou, nem se fez qualquer pesquisa acerca da legalidade em relação à utilização dos terrenos e edifícios das áreas consideradas. Mais à frente neste capítulo faz-se a descrição detalhada da modelação das bacias de retenção.



Figura 4.8 – Possíveis soluções que podem ser idealizadas para deter as águas pluviais

4.3.2.2 Telhados Verdes

Os parâmetros que se consideraram para a aplicação desta solução foram essencialmente, a escolha de edifícios e bairros mais recentes que permitissem uma aproximação mais real à possibilidade de implantação de telhados verdes. Assim, nos bairros mais antigos, nomeadamente aqueles que geograficamente estão mais a Sul, não se considerou a aplicação desta solução.

Refira-se que neste estudo, não se considerou a inclinação dos telhados e considerou-se a aplicação de telhados verdes do tipo *Extensive Green Roofs*, em que não existe a necessidade de reforço estrutural. As dimensões e características específicas utilizadas na modelação desta solução, são descritas posteriormente. Na Figura 4.9 representa-se um exemplo real daquilo que se pretende modelar e representar.



Figura 4.9 – Exemplo real do que se pretende modelar e representar para esta solução de controlo na origem, adaptado de Castleton et al. (2010)

4.3.2.3 Trincheiras de Infiltração

A aplicação desta solução de controlo na origem tem o objectivo de recolha das escorrências pluviais ao longo de toda a Avenida Almirante Reis. Claro está, que para implantação da mesma a necessidade de diminuição do passeio ou da faixa de rodagem é uma necessidade. Mais uma vez aquilo que se pretende com esta solução está ilustrado na Figura 4.10. A modelação e definição mais específica desta solução de controlo na origem é apresentada mais à frente neste capítulo.

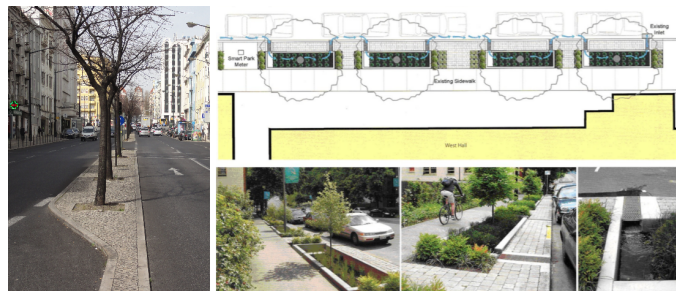


Figura 4.10 – Exemplo de uma possível solução para a recolha do escoamento superficial.

4.3.2.4 Pavimentos Porosos

As zonas indicadas para a implantação deste tipo de BMP, são essencialmente, parques de estacionamento, faixas de rodagem convencionais, faixas de serviço e passeios pedonais. Posto isto, identificaram-se algumas zonas tipo parque de estacionamento onde se pudesse aplicar esta solução de controlo na origem. Na Figura 4.11 representam-se as áreas escolhidas (à esquerda), bem como

um exemplo do que se pretende modelar (à direita). A numeração representada é a que será utilizada ao longo da modelação para mais fácil identificação do local que se está a falar.

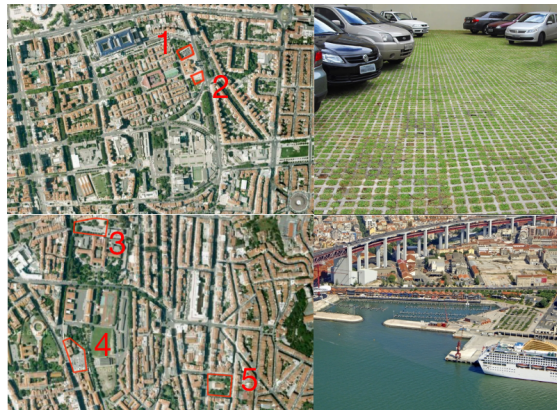


Figura 4.11 – Representação das áreas seleccionadas para implantação de pavimento poroso e exemplos práticos de aplicação desta solução.

4.3.3 Divisão e Caracterização das Sub-bacias

O escoamento superficial originado pela chuva, é encaminhado para múltiplos locais de afluência dependendo das características do terreno. Segundo (USEPA, 2009), a ligação entre os vários componentes do sistema de drenagem pode ser representada pelo esquema da Figura 4.12.

Cada BMP recebe um caudal parcial consoante o ponto onde estiver implantado, sendo que a divisão dos caudais que afluem a diferentes pontos de entrada realiza-se através da definição de sub-bacias de drenagem, que acabam por representar a área de influência de cada BMP.

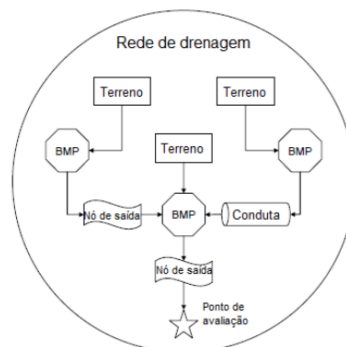


Figura 4.12 – Esquema ilustrativo de um sistema de drenagem constituído por BMP, adaptado de (USEPA, 2009)

Na criação do modelo de simulação a após já se ter decidido onde e quais os métodos de controlo na origem que se vão utilizar e analisar, é necessário definir as sub-bacias a adoptar (que se representam na Figura 4.13), visto que a divisão de cada sub-bacia afecta os caudais que cada BMP poderá ou não receber (Está representada esta figura, no Anexo 1, com proporções maiores para mais fácil visualização). O traçado das sub-bacias é feito com base nas áreas que pretendemos que cada solução de controlo na origem ocupe e na área de influência que cada uma delas tem no terreno. Por exemplo, as sub-bacias alocadas às bacias de detenção foram definidas, em parte, tendo em conta a topografia existente, tentando prever quais os fluxos de escoamento expectáveis. No caso dos telhados verdes, considerou-se que os bairros em que se aplica esta solução seriam uma sub-

bacia. É importante referir que, no SUSTAIN, cada sub-bacia apenas pode estar “ligada”, quer isto dizer a descarregar, a uma única solução de controlo na origem. Assim, a divisão feita representa, essencialmente, a área de influência e a zona de aplicação de cada BMP.

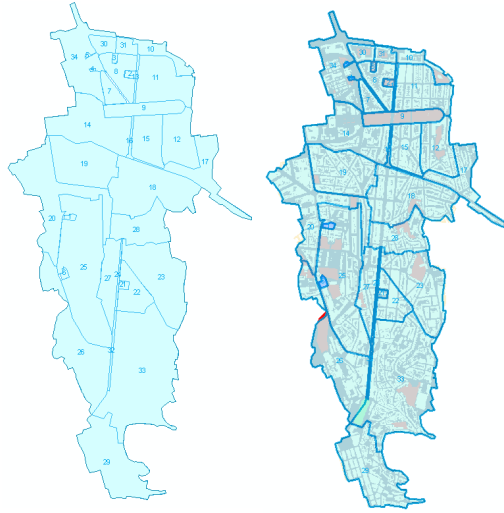


Figura 4.13 – Divisão da bacia hidrográfica em estudo em várias sub-bacias

A caracterização das sub-bacias é parcialmente realizada pela plataforma SIG, que para cada sub-bacia calcula a área total, taxa de impermeabilização e largura efetiva (parâmetro que representa o quociente entre a área total e o comprimento do principal canal de escoamento). Os restantes parâmetros têm de ser introduzidos manualmente pelo utilizador.

- Coefficiente de rugosidade de Manning, n , para áreas impermeáveis e permeáveis

Este parâmetro é de difícil quantificação, principalmente quando se está a falar da rugosidade dos arruamentos e afins, que acabam por ter vários materiais que os constituem, não havendo valores tabelados. Assim, adotaram-se os valores definidos por (USEPA, 2000), em que para as zonas impermeáveis define o valor de 0,01 e para as zonas permeáveis o valor de 0.02.

- Capacidade de armazenamento

Este parâmetro corresponde à parcela de precipitação que é detida e que não é escoada para jusante, representado o limite a partir do qual começa a haver escoamento superficial. Este parâmetro já foi referido anteriormente no capítulo 3 e está representado na Figura 3.4.

Os valores definidos foram os propostos em (USEPA, 2009), em que para as superfícies permeáveis sugere-se 1,5 cm de altura de detenção e para as superfícies impermeáveis 3 cm.

- Parâmetros de infiltração segundo o modelo de Green-Ampt

O cálculo da infiltração que ocorre no terreno é feito através do modelo de Green-Ampt. Já foi caracterizado no capítulo 4.1.3, o solo da bacia hidrográfica, pelo que, os valores dos três parâmetros que é necessário introduzir são os definidos nesse capítulo. É importante referir que se considerou que as características do solo eram homogêneas para toda a bacia hidrográfica, pelo que os valores definidos são considerados para todas as sub-bacias.

4.3.4 Caracterização das Soluções de Controlo na Origem utilizadas

Neste subcapítulo pretende-se fazer uma síntese das várias assunções que se consideraram na modelação das várias soluções de controlo na origem. No fundo, pretende-se explicar como é que foi feita a modelação das várias soluções para aproximar às soluções idealizadas que já foram descritas no capítulo 4.3.2.

4.3.4.1 Bacias de Detenção

A modelação geométrica de bacias de detenção no SUSTAIN é bastante simplista, assumindo as paredes laterais verticais e o fundo horizontal. Ou seja, assume que estes dispositivos têm uma forma paralelepipedica.

No caso em estudo, para as três bacias que se definem, o parâmetro variável que foi escolhido foi o comprimento. Isto porque, a maior limitação na implantação desta solução é, sem dúvida, o espaço. Assim, calculou-se qual a área máxima disponível em cada local e fixou-se a secção transversal variando-se o comprimento até ao máximo que uma bacia quadrada poderia ter. No Quadro 4.2 apresenta-se uma síntese dos parâmetros variáveis e da área total de implantação que se considerou nas várias bacias de detenção

Quadro 4.2 - Intervalo de valores do parâmetro variável que se considerou

Bacia de detenção	Área total (m ²)		Comprimento variável (m)	
	Disponível	Utilizada	Min	Max
Bacia 1	6860	6561	0	81
Bacia 2	8930	8649	0	93
Bacia 3	13250	12996	0	114

Os restantes parâmetros necessários à definição deste tipo de solução de controlo na origem, são fixos e comuns a todas as bacias implantadas, pelo que apresenta-se no Quadro 4.3 o resumo dos valores utilizados para os parâmetros mais relevantes.

Quadro 4.3 – Síntese dos parâmetros comuns às várias bacias de detenção

Características Geométricas	Profundidade da bacia (cm)	210,0
Características do Solo	Sucção na frente de humedecimento (mm)	198,1
	Conductividade hidráulica (mm/h)	4,5
	Défice de humidade inicial (-)	0,3
Custo	(€/m ³)	389,3

Relativamente à capacidade infiltrante do dispositivo, e uma vez que não são previstas alterações relativamente ao solo, considera-se que as bacias de detenção tem as mesmas características que o solo envolvente. O custo definiu-se com base nos valores do site do USEPA.

4.3.4.2 Telhados Verdes

Para se modelar este dispositivo no SUSTAIN, optou-se por se definir primeiramente as dimensões geométricas base de uma unidade, otimizando de seguida este parâmetro. Ou seja, para cada sub-

bacia faz-se a contagem do número de unidades necessárias. Esta unidade representa, em média, a dimensão de um telhado habitacional na bacia hidrográfica em estudo, cerca de 300 m². Assim, ao se otimizar este parâmetro, consoante a sub-bacia em que se aplica, contabiliza-se o número de telhados verdes que é necessário colocar para atingir determinada percentagem de redução. No Quadro 4.4 representam-se as características base da unidade que foi definida.

Quadro 4.4 – Características base de uma unidade de telhado verde

Características Geométricas	Área (m ²)	300,0
	Lado (m)	17,3
	Espessura (cm)	10,5
Características do Solo	Sucção na frente de humedecimento (mm)	50,8
	Condutividade hidráulica (mm/h)	25,4
	Défice de humidade inicial (-)	0,15
Características Geométricas do armazenamento sub-superficial	Porosidade (-)	0,7
	Espessura (cm)	6,0
	Infiltração na base (mm/h)	0,0
Custo	(€/m ²)	211,4

Para melhor compreensão do que representa o armazenamento sub-superficial, recomenda-se a visualização da Figura 3.6. As características do tipo de solo que se utiliza nesta estrutura, são definidas com base nos parâmetros que o SUSTAIN tem por definição. O custo definido, tem como base a média dos valores definidos no artigo de Castleton et al. (2010).

Para se otimizar o número de unidades em cada sub-bacia, é necessário ter um valor máximo e mínimo para que o *software* possa iterar dentro desse intervalo. A definição do valor máximo, já que o mínimo será considerado sempre zero, é feito tendo em conta uma contagem média do número de telhados existentes em cada sub-bacia, tendo sempre presente o tamanho da unidade que se considerou (300 m²). Assim, apresenta-se no Quadro 4.5 uma síntese dos valores considerados para a otimização deste parâmetro. A identificação geográfica na bacia hidrográfica da numeração utilizada, apresenta-se na Figura 4.14.

Quadro 4.5 – Síntese do número variável máximo de unidades de telhado verde

Numeração de Telhados Verdes	Nº máximo de unidades possível	
	Max	Incremento por iteração
1	25	5
2	20	5
3	35	5
4	70	5
5	240	10
6	140	10
7	100	10
8	240	10
9	120	10
10	220	10
11	90	10
12	200	10

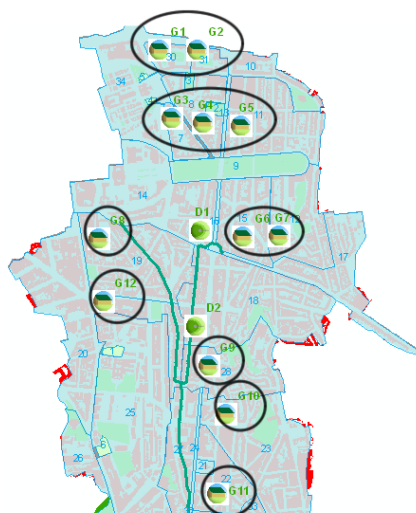


Figura 4.14 – Localização no modelo da solução de controlo na origem, telhados verdes, com identificação numérica

4.3.4.3 Trincheiras de Infiltração

A modelação desta solução de controlo na origem é feita de maneira semelhante à das bacias de retenção. Ou seja, considera-se uma forma paralelepipedica fazendo-se variar o comprimento da trincheira. Como já descrito nos capítulos anteriores, a modelação da trincheira de infiltração tem o objectivo de recolha das escorrências superficiais da Avenida Almirante Reis, pelo que são definidas sub-bacias ao longo da Avenida. O comprimento máximo que se pode admitir para as trincheiras de infiltração, será o comprimento total das sub-bacias em que se inserem. No Quadro 4.6 representa-se o intervalo de valores que se considera para a variação do comprimento destes BMP. A numeração das trincheiras de infiltração é feita, tendo em conta que a disposição das mesmas o longo da Avenida. Quer isto dizer que, a trincheira de infiltração número 1 está mais a Norte, a número 2 é colocada a seguir até se colocar a mais a Sul de todas, a identificada pelo número 4.

Quadro 4.6 – Intervalo de valores do parâmetro variável que se considerou

Trincheira de infiltração	Comprimento variável (m)	
	Min	Max
Trincheira de infiltração 1	0	381
Trincheira de infiltração 2	0	342
Trincheira de infiltração 3	0	576
Trincheira de infiltração 4	0	639

Todos os outros parâmetros que são comuns às várias trincheiras de infiltração, apresentam-se no Quadro 4.7. Refira-se que, tal como nas bacias de retenção, também nas trincheiras de infiltração considera-se que as características do solo que se utilizam são as mesmas do solo envolvente.

Quadro 4.7 – Síntese dos parâmetros comuns e fixos às diferentes trincheiras de infiltração

Características Geométricas	Largura (m)	2,1
	Profundidade (m)	1,8
Características do Solo	Sucção na frente de humedecimento (mm)	198,1
	Défice de humidade inicial (-)	0,3
Características Geométricas do armazenamento sub-superficial	Porosidade (-)	0,7
	Profundidade (cm)	15
	Infiltração na base (mm/h)	4,5
Custo	Escavação (€/m ³)	4,8
	Relva (€/m ²)	2,6
	Gravilha (€/m ³)	21,7
	Filtro Geotextil (€/m ²)	2,0
	Acabamentos (€/m ²)	0,4

O custo, neste caso, foi retirado da base de dados que o SUSTAIN apresenta. Nesta base de dados, apresentam-se os vários componentes necessários à construção desta solução de controlo na origem.

4.3.4.4 Pavimentos Porosos

As cinco zonas numeradas na Figura 4.11, representam as zonas de implantação desta solução de controlo na origem. Para a modelação deste BMP, considerou-se que se ocuparia 100% da área disponível, logo, sabendo a área máxima disponível, define-se o intervalo de valores em que o comprimento pode variar. Faz-se a ressalva que se considerou uma forma quadrada, visto que o que é importante é a definição da área que se ocupa. No Quadro 4.8 apresentam-se os diferentes intervalos de valores que o comprimento de cada solução pode assumir.

Quadro 4.8 – Intervalo de valores que o comprimento de cada pavimento poroso poderá assumir

Pavimento Poroso	Área Disponível (m ²)	Comprimento variável (m)	
		Min	Max
Pavimento Poroso 1	1024	0	32
Pavimento Poroso 2	1024	0	32
Pavimento Poroso 3	3600	0	60
Pavimento Poroso 4	3969	0	63
Pavimento Poroso 5	4356	0	66

Um factor importante neste tipo de soluções é a permeabilidade que o material utilizado no pavimento apresenta. Esta acaba por ser a principal característica deste BMP, pois é a definição deste valor que permite a modelação da infiltração da água nestas zonas. No Quadro 4.9, onde se definem os vários parâmetros comuns desta solução de controlo na origem, apresentam-se também os valores adoptados para a permeabilidade do pavimento e espessura do mesmo. Mais uma vez, modelou-se para este dispositivo um armazenamento sub-superficial, que neste caso terá a permeabilidade de fundo que o solo envolvente permite. A Figura 2.14 representa bastante bem a modelação que se adoptou.

Quadro 4.9 – Síntese dos parâmetros comuns e fixos dos pavimentos porosos

Características Geométricas	Espessura (cm)	30
Características Geométricas do armazenamento sub-superficial	Porosidade (-)	0,7
	Profundidade (cm)	30
	Infiltração na base (mm/h)	4,5
Característica do pavimento	Condutividade hidráulica (mm/h)	5000
Custo	(€/m ²)	95,2

Os valores utilizados para o custo e permeabilidade deste dispositivo, foram retirados tendo em conta o artigo de Nasvik, 2010, que descreve a utilização desta solução numa cidade no Minnesota, EUA.

4.3.4.5 Cenário final e caracterização dos colectores

Após explicação mais detalhada de como são modeladas as várias soluções de controlo na origem, faz-se agora o apanhado geral de como ficam distribuídas na bacia e no modelo as várias infraestruturas. Apresenta-se nos Anexos 2 e 3 o modelo geral que se criou, sendo possível observar as ligações e nós de ligação que são utilizados para ligar os vários BMP. O SUSTAIN permite que se faça a ligação entre as várias estruturas, existindo várias secções que se podem utilizar para caracterizar os colectores. No entanto, neste caso, optou-se por se definir que todas as ligações seriam do tipo *dummy*. Quer isto dizer que a ligação existente se processa de forma instantânea, sendo as condições do escoamento iguais na entrada e saída dos colectores. A escolha desta opção, prende-se com o facto de se conseguir reduções de tempo de simulação muito consideráveis. É importante referir que a utilização deste modelo não pretende o estudo da rede de drenagem mas sim da eficácia das soluções de controlo na origem e a sua caracterização geométrica. O sistema de drenagem será depois estudado através do modelo SWMM.

Importa referir que todos os parâmetros variáveis que se definiram para cada BMP são iterados ao longo de todo o processo de optimização (corrida do *software*), criando-se assim várias soluções dentro do mesmo cenário com diferenças geométricas e, conseqüentemente, de custo de implantação. Estas soluções são agrupadas numa única curva que compara o custo com a eficiência.

4.3.5 Apresentação de resultados

4.3.5.1 Considerações Gerais

A apresentação dos resultados é feita tendo em conta que se utilizou apenas um único cenário de distribuição de soluções de controlo na origem, neste caso o que foi apresentado no subcapítulo 4.3.4.5 e que se representa nos anexos. Como já referido, dentro deste cenário de distribuição e consoante o tempo de retorno que se simula, obtêm-se diferentes soluções. Quer isto dizer que os parâmetros variáveis para cada solução de controlo na origem, adoptam valores diferentes consoante o tempo de retorno que estamos a analisar. Estas diferenças, acabam por ter bastante influência no custo e eficácia que cada solução terá dentro do cenário de distribuição já definido.

Faz-se a ressalva que, a optimização do modelo é feita tendo em conta o ponto de análise que se

está a considerar, neste caso no ponto mais a jusante possível. Este aspecto leva a que os resultados que venham a ser obtidos sejam otimizados na perspectiva do local para o qual se realiza a avaliação, não existindo uma avaliação particularizada a outros pontos de relevância do sistema.

Refira-se que a análise é análoga aos diferentes tempos de retorno, pelo que a título exemplificativo analisa-se com mais detalhe apenas os resultados decorrentes da simulação do evento de precipitação com tempo de retorno de 5 anos agravado em 20% na sua intensidade, remetendo para o Anexo 4 todos os gráficos e quadros que sejam de certa forma semelhantes aos que serão apresentados.

4.3.5.2 Resultados obtidos

Após simulação do cenário escolhido obtém-se a seguinte curva de custo-eficiência, representada na Figura 4.15. Neste curva estão contempladas todas as soluções de melhor desempenho.

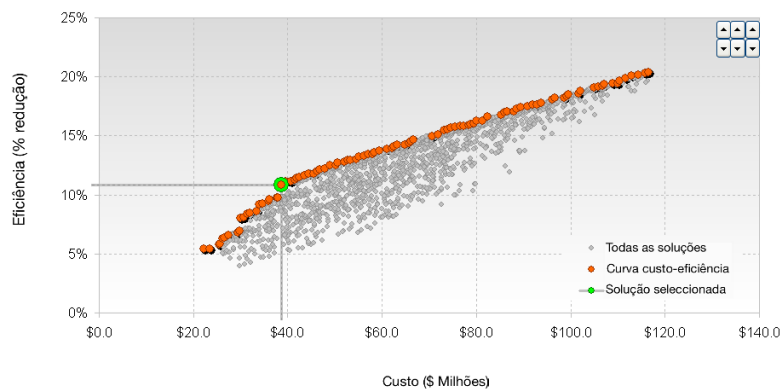


Figura 4.15 – Curva Custo-Eficiência obtida para um evento de precipitação com T5

A leitura deste gráfico é simples: as soluções com menos eficácia na redução do volume de escoamento são também as que têm um custo de implantação inferior. Neste caso, a solução que apresenta melhor relação custo-benefício, solução ótima, está representada pelo ponto selecionado a verde na Figura 4.15. Assim, rapidamente nos apercebemos que o máximo de redução de volume de escoamento por evento que se consegue, é aproximadamente 20%.

Para se analisar com mais detalhe a evolução das soluções e da curva, optou-se por selecionar 5 soluções para uma análise mais detalhada. Neste caso, escolheu-se a solução com menor eficácia de redução, maior eficácia de redução, solução ótima e as soluções entre estes pontos. No Quadro 4.10 apresentam-se as dimensões com que cada BMP fica consoante a solução escolhida.

Analisando os valores, é bastante simples de fazer a correlação entre estes e a Figura 4.15. Quanto mais eficaz a solução, maiores são as dimensões e o número de soluções de controlo na origem que se colocam. Assim, também o custo de cada solução acaba por ter uma diferença acentuada.

Outra conclusão que se pode retirar dos valores apresentados, é que a solução com melhor relação eficácia-custo acaba por ser uma solução que se baseia essencialmente nas soluções de controlo na origem como as bacias de detenção, fazendo algum uso dos telhados verdes. Tal facto, permite concluir que os telhados verdes, apesar de quando utilizados apresentarem valores de redução de

volume de escoamento razoáveis no sistema, essa redução acaba por ser à custa de um elevado valor monetário de implantação. Quer isto dizer que esta não é uma solução de controlo na origem que tenha uma boa relação custo-eficácia. Na Figura 4.16 apresenta-se um gráfico, que vem associado ao gráfico custo-eficiência (como já explicado no capítulo 3.1.2.4), em que se representa a repartição monetária das diferentes soluções de controlo na origem no custo total da solução óptima, evidenciando que esta solução faz uso essencialmente das bacias de detenção.

Quadro 4.10 – Análise dos parâmetros variáveis de cada BMP consoante a solução

BMP	Parâmetro Variável		Solução					
	Tipo de parâmetro	Intervalo de Valores		1 - Min	2	3 - Óptima	4	5 - Max
		Mínimo	Máximo					
Bacia 1	Comprimento (m)	0	81	6	3	78	78	75
Bacia 2	Comprimento (m)	0	93	3	90	90	93	93
Bacia 3	Comprimento (m)	0	114	111	111	111	111	114
Telhado Verde 1	Número de unidades (-)	0	25	5	5	10	5	10
Telhado Verde 2	Número de unidades (-)	0	20	5	0	0	5	10
Telhado Verde 3	Número de unidades (-)	0	35	5	15	15	15	25
Telhado Verde 4	Número de unidades (-)	0	70	10	5	10	40	60
Telhado Verde 5	Número de unidades (-)	0	240	20	30	20	40	210
Telhado Verde 6	Número de unidades (-)	0	140	0	0	0	80	140
Telhado Verde 7	Número de unidades (-)	0	100	0	0	0	60	60
Telhado Verde 8	Número de unidades (-)	0	240	10	10	20	10	220
Telhado Verde 9	Número de unidades (-)	0	120	10	20	20	30	90
Telhado Verde 10	Número de unidades (-)	0	220	10	10	0	190	210
Telhado Verde 11	Número de unidades (-)	0	90	10	10	10	50	80
Telhado Verde 12	Número de unidades (-)	0	200	20	20	20	180	180
Trincheira de Infiltração 1	Comprimento (m)	0	381	111	99	183	333	252
Trincheira de Infiltração 2	Comprimento (m)	0	342	60	339	333	276	243
Trincheira de Infiltração 3	Comprimento (m)	0	576	459	195	522	453	75
Trincheira de Infiltração 4	Comprimento (m)	0	639	63	201	51	585	468
Pavimento Poroso 1	Comprimento (m)	0	32	15	30	27	15	9
Pavimento Poroso 2	Comprimento (m)	0	32	6	6	6	6	6
Pavimento Poroso 3	Comprimento (m)	0	60	42	12	12	36	30
Pavimento Poroso 4	Comprimento (m)	0	63	51	51	60	18	24
Pavimento Poroso 5	Comprimento (m)	0	66	18	42	42	30	48

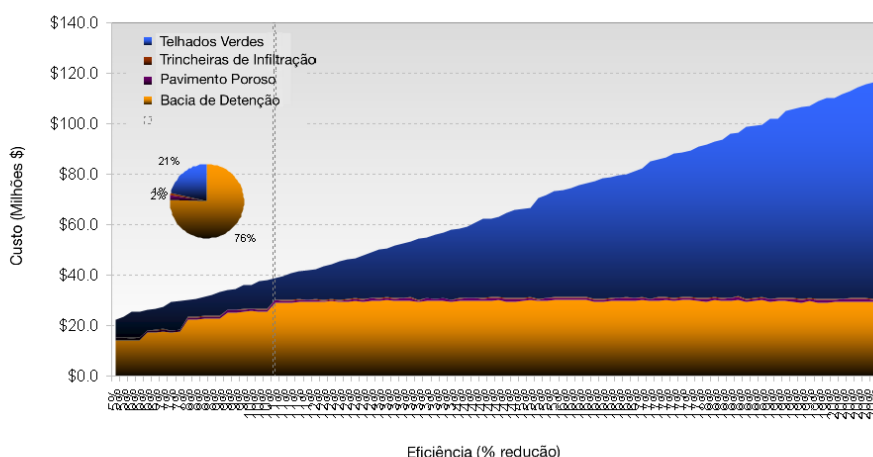


Figura 4.16 – Gráfico representativo da percentagem que cada solução de controlo na origem representa no custo total da solução. Refira-se que a repartição de custos para a solução óptima está representado no gráfico circular.

Para se ter uma melhor percepção da relação entre o custo e a eficácia de cada uma das 5 soluções escolhidas, apresentam-se no Quadro 4.11 os valores totais de custo de implantação e percentagem de redução de volume de escoamento por evento.

Analisando os valores apresentados, chega-se à conclusão que, para se obter eficácias de redução superiores à solução óptima, o investimento não segue uma proporcionalidade direta. Ou seja, a solução número 5 que representa o dobro de percentagem de redução em relação à solução óptima, tem um investimento aproximadamente 3 vezes maior.

Quadro 4.11 – Síntese dos valores finais de percentagem de redução e custo das 5 soluções analisadas

Solução	% Redução	Custo (Milhões de €)
1 - Min	5,42%	20,4 €
2	8,45%	29,4 €
3 - Óptima	10,85%	35,4 €
4	15,86%	70,8 €
5 - Max	20,36%	106,7 €

É ainda possível fazer-se uma análise comparativa entre os vários cenários, neste caso o cenário com aplicação das soluções de controlo na origem, cenário sem aplicação deste tipo de soluções e o cenário caso o terreno fosse natural. Esta análise é possível de se fazer, pois o SUSTAIN gera o seguinte gráfico, apresentado na Figura 4.17. Através do gráfico, conseguimos visualizar que existe uma atenuação na curva do cenário em que se utiliza BMP, em comparação com o cenário em que não se utiliza. Esta diferença, mostra que a utilização de soluções de controlo na origem permite não só uma redução do volume de escoamento como um atraso no escoamento, o que também ajuda a mitigar o risco de inundação urbana.

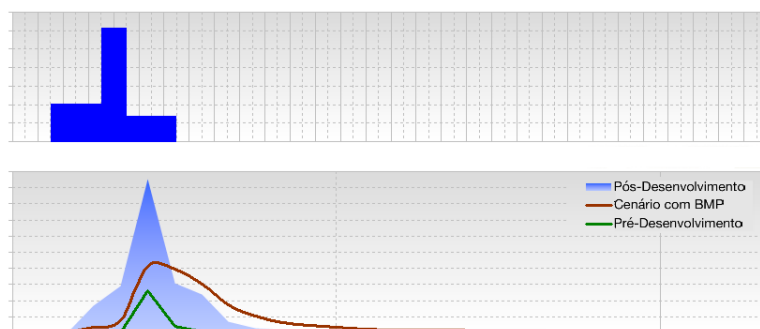


Figura 4.17 – Representação das curvas de escoamento para os vários cenários

4.3.5.3 Resultados consolidados dos vários Tempos de Retorno

Apresentam-se de seguida os resultados consolidados dos vários tempos de retorno, inclusive as curvas de custo-eficiência. Com estes resultados consegue-se comparar as eficácias de redução do cenário para os diferentes tempos de retorno. Como já referido, analisam-se sempre as mesmas 5 soluções independentemente da chuvada que se solicita ao modelo. No Quadro 4.12 apresentam-se os valores consolidados de percentagem de redução e custo para os diferentes tempos de retorno. Apresentam-se ainda as curvas de custo-eficiência.

Quadro 4.12 – Consolidado das percentagens de redução e custo para os diferentes tempos de retorno

Tempo de Retorno	Solucao	% Reducao	Custo (Milhões de €)
T5	1 - Min	5,42%	20,4 €
	2	8,45%	29,4 €
	3 - Óptima	10,85%	35,4 €
	4	15,86%	70,8 €
	5 - Max	20,36%	106,7 €
T10	1 - Min	1,66%	7,7 €
	2	6,26%	24,5 €
	3 - Óptima	9,56%	35,3 €
	4	12,67%	61,7 €
	5 - Max	15,87%	92,9 €
T20	1 - Min	2,29%	13,0 €
	2	5,23%	24,3 €
	3 - Óptima	7,75%	32,1 €
	4	10,92%	62,6 €
	5 - Max	13,57%	94,0 €

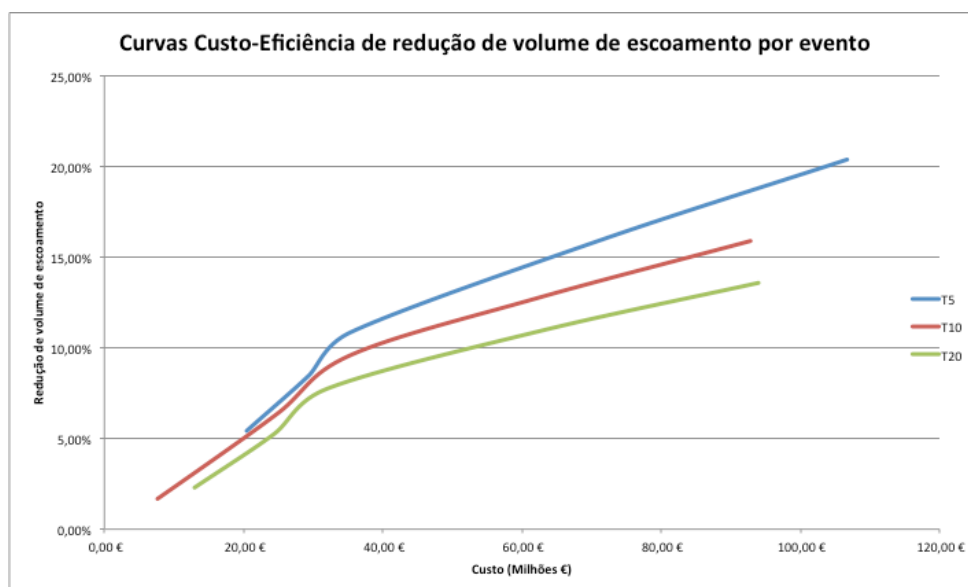


Figura 4.18 – Curvas custo-eficiência para diferentes tempos de retorno.

Da análise da Figura 4.18 e Quadro 4.12, conclui-se, como seria de esperar, que à medida que solicitamos o modelo com eventos de precipitação mais gravosos a eficácia de redução dos métodos de controlo na origem se reduz.

Refira-se que, para todos os eventos de precipitação com diferentes tempos de retorno, as soluções óptimas, quer isto dizer com melhor relação custo eficácia, são sempre soluções em que temos maioritariamente a aplicação das bacias de detenção.

4.4 Modelação do desempenho de Sistemas de Drenagem

Neste capítulo pretende-se utilizar um modelo do sistema de drenagem da bacia hidrográfica em estudo e introduzir-se nesse mesmo modelo as soluções de controlo na origem que se definiram no modelo anterior. Assim, consegue-se estudar a influência direta que este tipo de soluções têm no sistema de drenagem.

4.4.1 Apresentação do modelo do sistema de drenagem urbano utilizado

Para que se possa estudar a influência das soluções de controlo na origem no sistema de drenagem urbano da bacia hidrográfica, utilizou-se um modelo desenvolvido no âmbito do projeto SI-GeA, que modela o sistema de drenagem unitário das bacias hidrográficas da Av. da Liberdade e da Av. Almirante Reis. Apresenta-se de seguida uma figura geral do modelo em questão.



Figura 4.19 – Representação do modelo em SWMM do sistema de drenagem unitário das bacias hidrográficas da Av. Da Liberdade e da Av. Almirante Reis

Este modelo representa as duas principais condutas do sistema de drenagem unitário juntamente com os descarregadores finais do sistema, que descarregam no rio Tejo. Sendo estes últimos elementos diretamente afetados pelo nível de maré, que por sua vez acabam por influenciar todo o sistema a montante. Importa referir que se considerou um nível de maré fixo em 1,9 m, garantindo assim que estamos sempre numa situação desfavorável mas não muito improvável, pois assim garantimos que o evento pluviométrico não coincide com a maré baixa.

Refira-se que se fizeram algumas adaptações neste modelo para que houvesse uma correlação com o modelo construído no SUSTAIN, nomeadamente as características do solo e o evento pluviométrico utilizado. Neste caso, as características do solo que foram utilizadas foram as já referidas no capítulo 4.1.3. Já o evento pluviométrico que se solicitou ao modelo foi o mesmo que já se tinha utilizado anteriormente, utilizando-se o evento referente a um tempo de retorno de 5 anos.

4.4.2 Síntese das características geométricas das soluções de controlo na origem introduzidas no modelo SWMM

No capítulo 4.3.5 definiram-se várias soluções geométricas possíveis com diferentes eficácias e custos. Para que se possa estudar a influência que este tipo de alteração na malha urbana pode ter no sistema de drenagem, escolheu-se a solução que apresentava melhor relação eficácia/custo. Neste caso, a solução escolhida é a que está identificada pelo número 3 (solução óptima) no Quadro 4.10.

Para que se tenha uma melhor percepção da área total de ocupação dos BMP e volume total de armazenamento que esta solução permite, apresenta-se de seguida um quadro síntese das principais características geométricas da solução óptima.

Quadro 4.13 – Consolidado dos principais parâmetros dos BMP da solução escolhida

BMP	Lado (m)	Volume (m ³)	Volume total (m ³)	% de área ocupada na bacia
Bacia 1	78	12776	55661	0,76%
Bacia 2	90	17010		
Bacia 3	111	25874		
BMP	Lado (m)	Área (m ²)	Área total (m ²)	% de área ocupada na bacia
Pavimento Poroso 1	27	729	6273	0,18%
Pavimento Poroso 2	6	36		
Pavimento Poroso 3	12	144		
Pavimento Poroso 4	60	3600		
Pavimento Poroso 5	42	1764		
BMP	Lado (m)	Área (m ²)	Área total (m ²)	% de área ocupada na bacia
Trincheira de infiltração 1	183	384	2287	0,07%
Trincheira de infiltração 2	333	699		
Trincheira de infiltração 3	522	1096		
Trincheira de infiltração 4	51	107		
BMP	Nº total de unidades	Área de uma unidade (m ²)	Área Total (m ²)	% de área ocupada na bacia
Telhados Verdes	125	300	37500	1,08%

As várias soluções de controlo na origem são introduzidas através do módulo interno que o SWMM dispõe, à exceção das bacias de detenção que são modeladas como unidades de armazenamento. Neste caso, as características geométricas destas unidades são as mesmas já referidas para as bacias de detenção nos capítulos anteriores. Mais à frente é melhor explicado como se faz esta introdução. Refira-se ainda que para esta solução temos um custo de implantação de 35,4 milhões de Euros.

4.4.3 Caracterização dos vários cenários

Como já explicado no capítulo 4.2, para que se possa avaliar a influência que as soluções de controlo na origem têm no sistema de drenagem urbana, definiram-se quatro cenários diferentes. De seguida, faz-se um resumo das características gerais de cada cenário.

- Cenário 1 – Situação atual

Este é o cenário que representa a situação em que vivemos atualmente. A malha urbana tal como ela está e o evento de precipitação e nível de maré sem qualquer tipo de alteração. Como já referido, o evento pluviométrico que se utilizou foi o já identificado nos capítulos anteriores, mas para um tempo de retorno de 5 anos. Já o nível de maré, considerou-se constante e com o valor de 1,9 metros.

- Cenário 2 – Situação atual com soluções de controlo na origem

Neste cenário pretende-se modelar a malha urbana já com as soluções de controlo na origem definidas num ambiente em que não estão representadas as alterações climáticas, ou seja o nível de maré e a intensidade de precipitação mantém-se iguais ao cenário anterior.

- Cenário 3 – Situação futura com soluções de controlo na origem

Este cenário pretende representar a situação futura que se espera que possa vir a ocorrer com as alterações climáticas, neste caso havendo um aumento da intensidade de precipitação de 20% e um aumento do nível de maré de 0,5 m. Com a introdução das soluções de controlo na origem nestas condições climáticas, pretende-se verificar se neste cenário futuro se consegue mitigar o risco de inundações urbanas

- Cenário 4 – Situação futura sem aplicação de soluções de controlo na origem

O quarto e último cenário, apresenta-se com as mesmas condições climáticas que o anterior, no entanto não se aplicam as soluções de controlo na origem. Assim, consegue-se ter uma percepção de como é que toda esta problemática poderá evoluir caso não se tomem quaisquer medidas.

4.4.4 Introdução e modelação das soluções de controlo na origem no SWMM

Para que se possa analisar a influência que as soluções de controlo na origem têm no sistema de drenagem, introduziram-se as soluções com as dimensões já calculadas no SUSTAIN, e apresentadas no Quadro 4.13, no modelo SWMM. Para tal utilizou-se o módulo interno LID do SWMM, já referido no capítulo 3.2.2, para as soluções de controlo na origem como as trincheiras de infiltração, pavimentos porosos e telhados verdes. As bacias de detenção foram modeladas como unidades de armazenamento.

4.4.4.1 Bacias de detenção

O módulo LID do SWMM não dispõem de bacias de detenção, no entanto estas são facilmente modeláveis através de unidades de armazenamento. As dimensões geométricas são as que já foram definidas e obtidas através do modelo SUSTAIN. Apresenta-se de seguida na Figura 4.20, do lado esquerdo, a representação paralelepípedica que o SWMM assume quando introduzidos os dados geométricos para cada bacia. Para que se possam introduzir as bacias na rede de drenagem como unidades de armazenamento, é necessário definir a cota de soleira, para tal subtrai-se à cota da conduta de entrada na bacia, o valor da profundidade da bacia, que neste caso já tinha sido definido como parâmetro fixo, no Quadro 4.3, assumindo um valor de 2,1 metros. Na Figura 4.20, no lado direito, apresentam-se os perfis de cada uma das bacias.

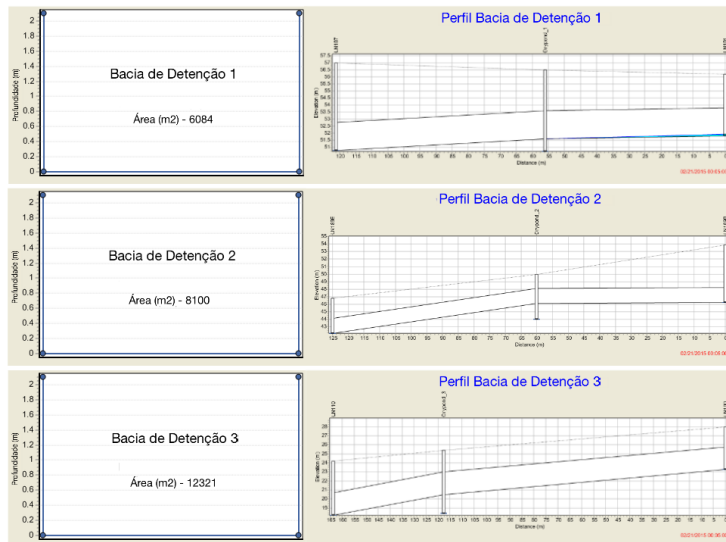


Figura 4.20 – Representação geométrica e perfil das bacias de detenção no SWMM

4.4.4.2 Telhados verdes, Trincheiras de infiltração; Pavimentos Porosos

A utilização do módulo LID do SWMM é bastante simples e em tudo análoga à do SUSTAIN, visto que os parâmetros a definir são os mesmos. Neste caso, para cada uma destas soluções colocaram-se exatamente os mesmos parâmetros já definidos no capítulo 4.3.4, parâmetros esses referentes ao tipo de solo. De seguida definiu-se a percentagem de área que cada conjunto de BMP representaria na bacia, é esta percentagem que define as características geométricas dos BMP. Exemplifique-se para os telhados verdes, definiram-se as características das várias camadas constituintes, tipo de solo, condutividade hidráulica, sucção na frente de humedecimento, porosidade, espessura das camadas, etc. (parâmetros já definidos anteriormente). De seguida, verifica-se qual o número óptimo de unidades de telhados verdes obtido, neste caso foram 125 unidades pois a solução que se escolheu foi a solução óptima para um tempo de retorno de 5 anos (Ver Quadro 4.13). Finalmente, insere-se no SWMM a percentagem que o total de unidades representa da área total da bacia, no caso dos telhados verdes representam 1,08%.

4.4.5 Apresentação de resultados

Neste capítulo pretende-se fazer a apresentação dos resultados que o modelo de SWMM nos fornece e comparar os resultados dos vários cenários. Começa-se por fazer uma análise geral ao sistema de drenagem na sua totalidade, de modo a que se identifiquem pontos críticos, nomeadamente nós que entrem em carga (*Node Flooding*). De seguida, faz-se a análise em dois troços específicos do sistema. Neste caso, o troço a jusante da última solução de controlo na origem (Troço 1) e o troço mais a jusante do sistema (Troço 2). A escolha destes pontos permite que se avaliem, com maior especificidade, os resultados do sistema, avaliando a redução que as várias soluções de controlo na origem produzem. Na Figura 4.21 apresentam-se estes troços identificados a vermelho.



Figura 4.21 – Identificação dos troços a jusante que se vão avaliar

4.4.5.1 Identificação de pontos críticos no sistema de drenagem.

Começa-se por analisar um perfil do sistema de drenagem da bacia em estudo, desde o ponto mais a montante até ao ponto mais a jusante, neste caso o descarregador no rio. Para o sistema de drenagem da bacia Av. Almirante Reis, existem três nós de cabeceira, pelo que poder-se-ia analisar 3 perfis diferentes, no entanto todos eles têm uma parte em comum a jusante, sendo esta a zona mais crítica para todos eles. Assim, faz-se uma breve análise apenas ao troço que se identifica em planta na Figura 4.22.

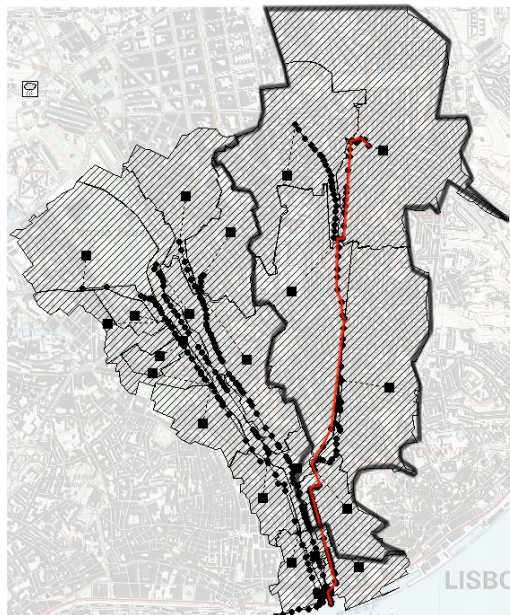


Figura 4.22 – Identificação em planta do perfil do sistema de drenagem.

Na Figura 4.23 representa-se o perfil para os diferentes cenários (No Anexo 5, representa-se esta figura em maiores proporções para mais fácil visualização). Ressalva-se que os perfis que são apresentados são referentes ao período mais desfavorável do sistema de drenagem, ou seja são imagens do período em que o sistema é mais solicitado.

Analisando o perfil referente ao cenário 1, é perceptível que a situação atual não tem problemas de

maior, não havendo, para este evento pluviométrico, nenhum nó em carga. No entanto, ao se analisar o perfil do cenário 4, verifica-se que com as alterações climáticas que se definiram e que se preveem que venham a ocorrer, a situação piora. Muitas condutas nas zonas mais a jusante, têm o seu escoamento com a secção cheia, havendo até alguns nós em carga. Assim, é seguro considerar que num cenário futuro, o sistema de drenagem atual terá os seus problemas de drenagem agravados, como seria de esperar.

Verificando agora os perfis dos cenários 2 e 3, cenários em que estão contempladas as soluções de controlo na origem, consegue-se verificar uma melhoria nos problemas já referidos, nomeadamente nas condutas mais a jusante, na zona do Troço 1. No entanto, verifica-se que nos pontos que são mais afectados pelo nível de maré e que já têm uma influência da bacia da Av. da Liberdade, nomeadamente o Troço 2, os resultados não são assim tão satisfatórios. Assim, analisam-se de seguida com mais especificidade os troços 1 e 2.

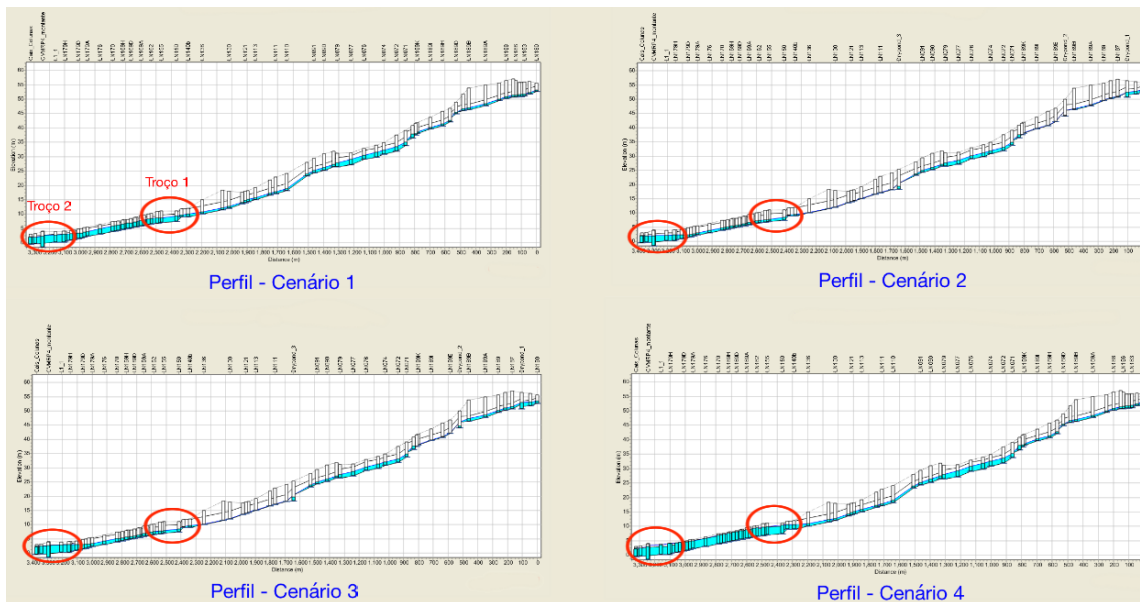


Figura 4.23 – Comparação entre os perfis do sistema de drenagem desde o nó de cabeceira até ao ponto mais a jusante, para os diferentes cenários definidos

Troço 1 – Conduta imediatamente a seguir à última solução de controlo na origem utilizada

Para que se possa fazer a análise de comparação entre os vários cenários, escolhem-se diferentes parâmetros para analisar (altura de escoamento, caudal, capacidade da conduta em análise). Começa-se por apresentar, na Figura 4.24 os perfis do Troço 1 para os diferentes cenários no período da chuvada mais desfavorável (No Anexo 6 representa-se esta figura em maiores proporções para mais fácil visualização).

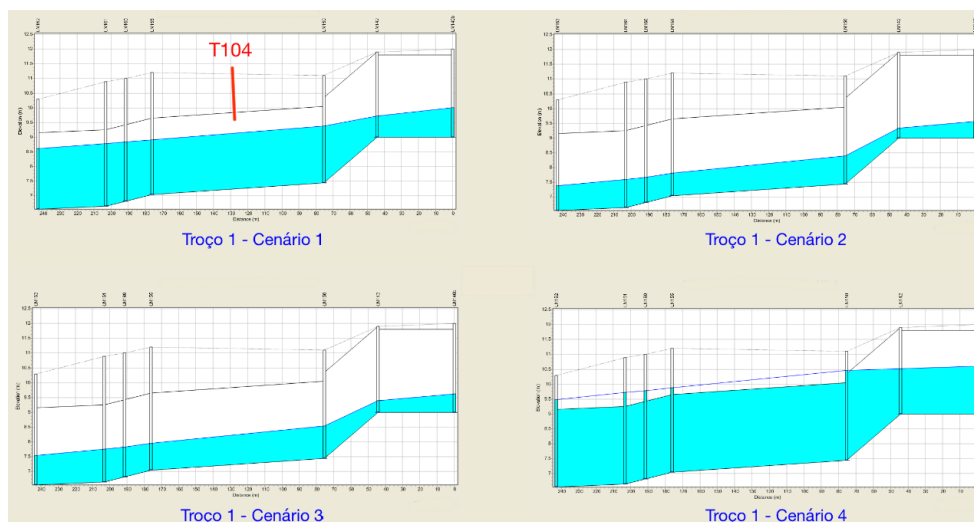


Figura 4.24 – Perfis do Troço 1 para os diferentes cenários considerados

Pela análise dos perfis, verifica-se que num cenário futuro este troço estará muito mais sobrecarregado. No entanto com a introdução das soluções de controlo na origem, a altura de escoamento reduz-se. Para que se possa ter uma ideia da evolução do escoamento ao longo de todo o período de simulação, apresenta-se na Figura 4.25 o gráfico da evolução do caudal para a maior conduta representada no perfil. Neste caso, a conduta em questão, é identificada pelo nome que tem no modelo SWMM, T104.

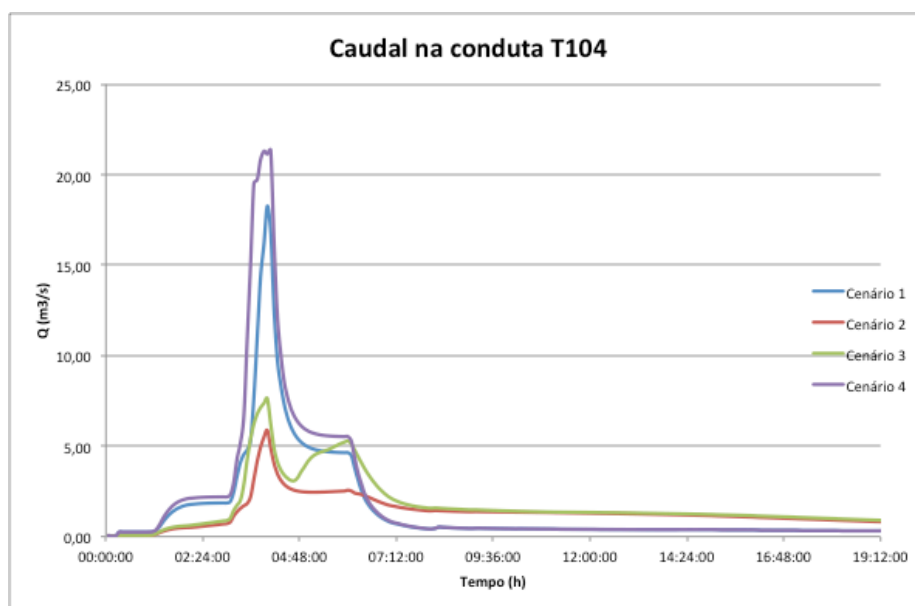


Figura 4.25 – Gráfico da variação do caudal, na conduta T104, para os diferentes cenários ao longo do período de simulação

Pela análise do gráfico verifica-se que os cenários 2 e 3 permitem uma redução significativa do caudal de ponta. Esta redução de caudal, resulta da detenção e infiltração que as soluções de controlo na origem permitem, sendo que as bacias de detenção têm um trabalho mais significativo.

Com a utilização das bacias de detenção, seria de esperar que houvesse uma diferença significativa na período de tempo em que o caudal máximo ocorre. No entanto, tal não acontece pois as bacias

não têm volume suficiente, enchendo rapidamente, levando a que o caudal de ponta ocorra sensivelmente no mesmo período temporal que as soluções sem BMP's. A redução de caudal que se verifica é em grande parte devido à detenção de água que as bacias permitem, levando a que o volume detido seja escoado, para jusante das bacias, mais lentamente ao longo do período de simulação. É devido a estas soluções que se verificam dois picos nas curvas dos cenários 2 e 3 (mais visível no cenário 3) e um caudal maior a passar na conduta para os períodos de simulação mais tardios. Repare-se que as curvas dos cenários 2 e 3 estão acima das dos cenários 1 e 4 para períodos após as 7 horas de simulação. Tal facto, mostra que grande parte do volume do escoamento superficial criado pelo evento pluviométrico, é apenas detido para mais tarde ser repostado no sistema, não havendo uma parcela de infiltração muito significativa.

Assim, para este ponto do sistema de drenagem, conseguem-se resultados bastante positivos em termos de redução do caudal máximo. Conseguindo-se até que num cenário futuro, com alterações climáticas, se reduza o caudal de ponta que passa na conduta para valores inferiores à situação atual. No entanto é importante referir que estes resultados são referentes apenas à bacia da Av. Almirante Reis, não havendo intervenção do resto do sistema de drenagem.

Troço 2 – Conduta mais a jusante de todo o sistema de drenagem

Mais uma vez, começa-se por visualizar os perfis deste Troço para os diferentes cenários no intervalo de tempo em que o sistema de drenagem está na sua máxima carga. Faz-se a ressalva que os resultados deste Troço são influenciados pelo sistema de drenagem da Av. da Liberdade e pelo nível de maré, que se considerou como uma agravante climática nos cenários 3 e 4.

Como se pode ver pela observação do perfil referente ao cenário 1, na Figura 4.26 (No Anexo 7, representa-se esta imagem em proporções maiores para mais fácil visualização), a influência do nível de maré neste troço toma uma importância acrescida, fazendo com que para o período representado as condutas estejam já quase no limite das suas capacidades.

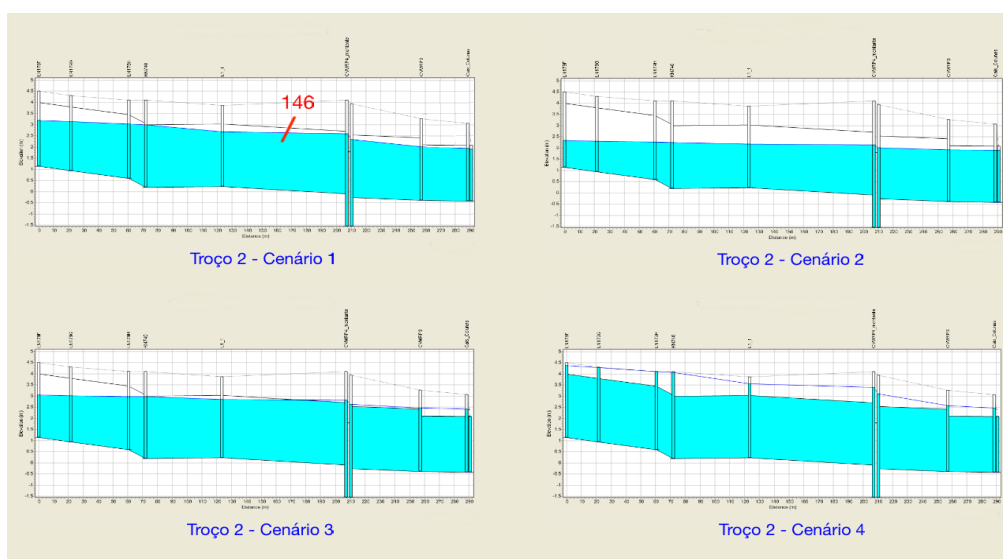


Figura 4.26 – Perfis do Troço 2 para os diferentes cenários considerados

As diferenças entre cenários neste Troço não são tão significativas como no anteriormente avaliado, principalmente em termos de altura de escoamento. No entanto é perceptível uma redução entre os cenários que consideram as mesmas condições climáticas, neste caso entre os cenários 1 e 2 e os cenários 3 e 4. Ao se comparar o cenário 1 com o cenário 4, verifica-se um agravamento significativo da capacidade das condutas deste Troço. Na verdade, no cenário 4 os nós mais a montante entram em carga, o que na prática significa que existem extravasamentos. Ao se olhar para o cenário 3, esta situação já não ocorre. Tal facto, permite concluir que houve uma clara melhoria neste aspecto devido à implantação das soluções de controlo na origem.

Analise-se agora com mais detalhe a evolução do escoamento da conduta identificada na Figura 4.26. Apresentam-se de seguida os gráficos da evolução do caudal e da capacidade da conduta 146, ao longo do tempo de simulação.

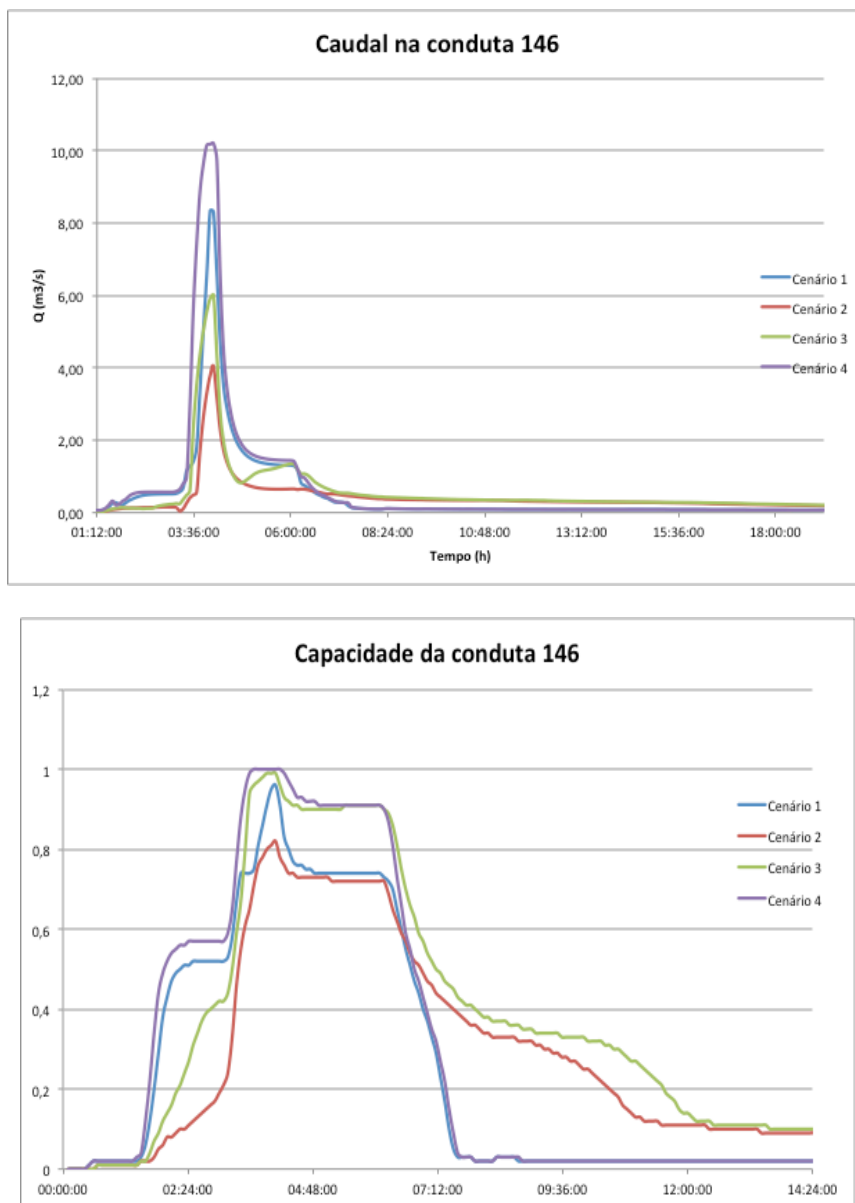


Figura 4.27 – Gráficos representativos do escoamento na conduta 146. Em cima, gráfico da evolução do caudal na conduta ao longo do tempo de simulação. Em baixo, gráfico da evolução da capacidade da conduta

Mais uma vez, pela análise do gráfico representativo do caudal, as reduções de caudal dos cenários 2 e 3 face aos cenários 1 e 4 são bastante visíveis. Não havendo uma diferença muito significativa deste gráfico em comparação com o gráfico já ilustrado na Figura 4.25, como já seria de esperar.

No entanto, apesar de haver uma redução de caudal, ao se olhar para o gráfico referente à capacidade da conduta, é perceptível que no momento mais gravoso da chuvada a capacidade da conduta para os diferentes cenários é sempre bastante elevada (entre 80% e 100%). Na verdade, nos cenários em que se utilizam as soluções de controlo na origem, 2 e 3, verifica-se que a evolução da capacidade da conduta ao longo do tempo de simulação não é tão abrupta quanto nos cenários 1 e 4. Tal facto deve-se, mais uma vez, à utilização das bacias de detenção que permitem a acumulação de água para mais tarde ser restituída no sistema, não se verificando assim uma clara redução, por infiltração, na quantidade de água que chega ao sistema. Apesar disto, verifica-se uma redução significativa do cenário 1 para o cenário 2, no entanto os cenários 3 e 4 atingem ambos a capacidade máxima da conduta verificando-se parecenças claras entre ambos os cenários para o período mais crítico da chuvada. Assim, apesar de haver uma redução de caudal que chega às condutas mais a jusante, as alterações climáticas consideradas e o caudal da bacia hidrográfica da Av. da Liberdade, levam a que a capacidade do sistema de drenagem a jusante esteja sempre perto do máximo para os períodos mais críticos dos eventos pluviométricos. Faz-se a ressalva que a influência, nestes troços mais a jusante, das bacias da Av. Almirante Reis e Av. da Liberdade está repartida igualmente. Quer isto dizer que cada bacia tem uma influência de, aproximadamente, 50% sobre o sistema de drenagem nas zonas mais a jusante.

Os resultados obtidos para este troço, não são tão satisfatórios quanto os do Troço 1. Na verdade, neste troço as alturas de escoamento, nos períodos críticos das chuvadas, estão sempre no máximo não se conseguindo aliviar a carga a que o sistema de drenagem está exposto. Tal significa que a influência do nível de maré e das restantes bacias de cabeceira da área metropolitana de Lisboa, afectam muito o sistema de drenagem mais a jusante, o que influencia a eficácia das soluções de controlo na origem. Refira-se ainda que apenas se estão a considerar as bacias da Av. Alm. Reis e Av. da Liberdade, mas sem soluções de controlo na origem, havendo outras bacias mais a montante, Lumiar, Benfica, que descarregam parte dos escoamentos superficiais neste sistema de drenagem. Tal facto, iria agravar ainda mais os resultados já apresentados.

4.5 Considerações finais

Com os modelos utilizados, conseguiu-se definir uma distribuição de soluções de controlo na origem óptima, tendo em conta o índice custo/eficácia, e analisar a influência que essas soluções têm no sistema de drenagem da bacia em estudo. É importante referir, que o estudo que foi feito nesta dissertação é de um cenário futurista e de implementação improvável. Pretendeu-se apenas estudar, a nível académico, as vantagens que poderiam surgir da implementação em larga escala de soluções de controlo na origem.

Com os resultados obtidos, chega-se à conclusão que a utilização de medidas que promovam a

detenção e infiltração das águas pluviais em bacias com índices de impermeabilização muito elevados, permite uma redução no caudal de ponta e volume de escoamento, no entanto não apresenta um custo/eficácia que permita a utilização exclusiva deste tipo de medidas. A utilização de soluções de controlo na origem, face ao seu custo de implantação e eficácia que proporcionam, é vista como uma medida complementar aos sistemas tradicionais, largamente implementados, e não como uma total alternativa. Na verdade, pelos resultados obtidos e face à realidade que os centros urbanos representam hoje em dia, este tipo de medidas não deve ser considerada como uma alternativa total. Em muitas cidades já totalmente desenvolvidas, em que a percentagem de impermeabilização é muito elevada, este tipo de medidas será sempre um complemento aos sistemas já implementados, permitindo aumentar a longevidade em termos de dimensionamento dos sistemas tradicionais já implementados.

Perante as várias opções que estão à disposição para se solucionar os novos desafios que surgem, a câmara de Lisboa está a estudar várias hipóteses de implementação. Neste caso, soluções de controlo na origem, reforço e reabilitação de colectores, separação e controlo de caudais, criação de reservas de armazenamento e criação de túneis para desvio de caudais das zonas baixas. Perante as várias soluções apresentadas, a solução de criação de túneis para desvio de caudais é aquela que possivelmente avançará. Esta solução, acaba por ser a mais eficaz face ao custo de implantação, tendo um custo social e político bastante mais controlado em comparação com as soluções de controlo na origem. Esta escolha prova que as soluções de controlo na origem ainda não apresentam competitividade económica perante soluções mais tradicionais. No entanto, as soluções de controlo na origem apresentam uma componente ambiental que muitas das soluções mais tradicionais não dispõem. Permitem a recarga de aquíferos, pois promovem a infiltração; o facto de serem soluções que se servem muito da infiltração, permite retirar certos poluentes da água; visto que são soluções em que muitas vezes se utilizam “infraestruturas verdes”, permitem uma renaturalização do terreno permitindo a redução do efeito de ilha das cidades; a utilização de algumas soluções permite criar espaços verdes e lúdicos e ao mesmo tempo servir as necessidades hidrológicas e hidráulicas do sistema de drenagem. As preocupações ambientais são um tema cada vez mais influente nas agendas políticas dos países, pelo que, a escolha de soluções que complementem os sistemas tradicionais com benefícios tanto ambientais como de redução de caudais pluviais é cada vez mais uma prioridade.

A complexidade dos sistemas de drenagem urbanos, com colectores de diversas idades, materiais e configurações, e que servem bacias contributivas em constante evolução, associado às incertezas e variações do clima, torna o desafio de controlo de inundações e poluição dos meios de controlo uma tarefa difícil. Não só devido a todos os factores já descritos, mas por ser necessário a intervenção de várias entidades de tão diferentes objetos de estudo. Assim, a necessidade de se adoptarem medidas de adaptação de diferentes técnicas, como soluções de controlo na origem e medidas mais tradicionais, complementando-se uma à outra e ao sistema de drenagem já implantado, é imperativo.

5 Síntese e Conclusões

Neste capítulo faz-se uma breve síntese do trabalho realizado nesta dissertação e descrevem-se as principais conclusões.

Ao crescimento urbano que se tem assistido ao longo dos anos está sempre associado o aumento de áreas impermeáveis. Estas alterações ao uso do solo acarretam diversos problemas para os centros urbanos, nomeadamente o aumento de escoamentos superficiais e consequentes inundações urbanas, poluição das superfícies das bacias de drenagem, contaminação dos escoamentos superficiais e eventual poluição dos meios receptores. As alterações climáticas que se fazem sentir cada vez mais, nomeadamente aumento de eventos extremos e subida do nível médio do mar, vêm potenciar estes problemas. Todas estas problemáticas acabam por criar uma cada vez maior pressão sobre os sistemas de drenagem das cidades, levando muitas vezes ao seu subdimensionamento. Assim, a solução para estes novos desafios urbanos, passa por adaptar e requalificar os sistemas de drenagem de maneira a que possam acompanhar o desenvolvimento urbano e as alterações climáticas, para que continuem a dar a resposta apropriada.

Existem várias soluções e formas que já foram estudadas para melhorar o desempenho dos sistemas de drenagem. Soluções mais resilientes e flexíveis, como é o caso das soluções de controlo na origem e o controlo em tempo real de sistemas de drenagem, ou soluções não tão “sustentáveis” como o aumento geral da capacidade dos colectores. Idealmente, a combinação das várias formas de requalificação é a melhor solução, não só por algumas destas medidas não se poderem aplicar em certos locais, como permite uma maior resiliência do sistema. Com estes novos desafios e formas de atuação, a maneira como a cidade é planeada pode e deve ter influência na aplicação das soluções e na maneira como o escoamento pluvial é tratado, pelo que um planeamento urbano sustentável, que seja virado para a problemática em questão, é também uma solução que deve ser integrada na aplicação das restantes soluções.

Perante a necessidade de adaptação dos sistemas de drenagem das cidades a estes novos desafios, muitos foram os estudos e desenvolvimentos de *software* para apoiarem a decisão de quais as melhores soluções de adaptação que se poderiam utilizar e quais os resultados que poderiam ter. Nesta dissertação são utilizados diferentes modelos e *softwares*, aplicando-os ao caso de estudo da bacia da Av. Almirante Reis, por forma a avaliar a eficácia de estratégias de beneficiação dos sistemas de drenagem baseadas em soluções de controlo na origem.

Começou-se por definir os parâmetros necessários para que se conseguisse modelar, com o programa SUSTAIN, as condições do terreno e meteorológicas com a melhor fiabilidade. De seguida escolheram-se quais os BMP que iriam ser utilizados e sua distribuição, sendo que esta solução poderia ser otimizada em termos de número de telhados verdes e área ocupada pelas restantes soluções de controlo na origem. Assim, através do SUSTAIN, foram aferidas quais as dimensões e

número de unidades ótimas de cada tipo de solução, que permitem melhores resultados face ao custo de implantação.

Dos resultados que se obtêm deste modelo, conclui-se que a relação custo/eficácia não é linear, sendo que as soluções mais onerosas podem não ser necessariamente as que compensam mais face à eficácia de redução de volume de escoamento que apresentam. Conclui-se ainda, como seria de esperar, que para eventos pluviométricos com um tempo de retorno mais alto a eficácia das soluções de controlo na origem tende a descer. O aumento da intensidade do evento pluviométrico faz com que a capacidade de infiltração de certos BMP se esgote muito rapidamente, reduzindo a sua eficácia. Das soluções de controlo na origem escolhidas, aquelas que acabam por apresentar melhor relação custo/eficácia são as bacias de retenção. No entanto, faz-se a ressalva que este tipo de solução acaba por ser das mais difíceis de implantar em centros urbanos já desenvolvidos, pois implica muito mais espaço e volume de implantação que as restantes medidas. Pelo que a coordenação entre as várias entidades políticas, económicas e técnicas é mais difícil, dificultando todo o processo.

Definidas as dimensões das soluções de controlo na origem, escolhe-se a solução ótima, neste caso a solução que apresenta melhor relação custo/eficácia, para um tempo de retorno de 5 anos. Introduzem-se as dimensões das soluções de controlo na origem no modelo SWMM, através do módulo específico para BMP que este software tem. Com este modelo do sistema de drenagem, já feito em SWMM, pretende-se perceber quais as reais vantagens que as soluções de controlo na origem trazem para o sistema de drenagem da bacia em estudo. Para tal, criam-se 4 cenários diferentes, em que se modelam as soluções de controlo na origem e as condições climáticas futuras. Assim, consegue-se comparar as vantagens que este tipo de medidas pode trazer atualmente e num cenário futuro.

Avaliam-se essencialmente, dois troços no sistema de drenagem. Os dois troços escolhidos são ambos, a jusante do último BMP que se coloca. Assim, os resultados têm em conta o trabalho das várias soluções de controlo na origem aplicadas. Dos resultados que se tiram deste modelo, conclui-se em primeira instância, que caso não se tomem quaisquer medidas de adaptação os problemas de falta de capacidade das condutas, principalmente dos troços mais a jusante, agravar-se-ão. Verifica-se ainda que nos troços em que o nível de maré tem uma maior influência, os benefícios em termos de redução da altura de escoamento não são muito satisfatórios.

Perante os resultados obtidos, a necessidade de se tomarem medidas num futuro próximo é uma realidade. No que toca à capacidade de resolução do problema da parte das soluções de controlo na origem, conclui-se que este tipo de medidas permite uma redução do caudal de ponta, principalmente devido à retenção das águas pluviais nas bacias de retenção. No entanto, o uso exclusivo deste tipo de medidas não parece ser suficiente, principalmente nas zonas ribeirinhas.

Existem vários projetos e soluções em estudo para esta problemática na cidade de Lisboa. O uso de soluções de controlo na origem, não é a solução mais eficaz comparativamente com o custo de implantação, no entanto este tipo de medida é a mais sustentável, com uma componente ambiental mais forte, que traz alguns benefícios de tratamento dos escoamentos pluviais. Com as

preocupações ambientais que cada vez mais assumem um papel central nas agendas políticas e económicas dos países, é muito importante pensar em soluções que consigam conciliar os valores ambientais com a eficácia e custo de implantação. A aplicação destas infraestruturas verdes consegue conciliar melhor estes temas que muitas das soluções que se apresentam para a cidade de Lisboa.

Conclui-se assim que, as soluções de controlo na origem podem ser uma solução a utilizar, mas que poderão surtir muito mais efeito quando aplicadas conjuntamente com outras medidas menos sustentáveis, garantindo assim uma maior longevidade em termos de dimensionamento dos sistemas de drenagem urbanos. Para além disso têm uma vantagem ambiental, não quantificável, face a outras soluções de controlo na origem.

5.1 Sugestões para futuros desenvolvimentos

Apresenta-se de seguida algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros dentro da mesma temática desta dissertação.

Como já referido o SUSTAIN permite analisar a evolução das cargas poluentes no escoamento superficial. A utilização desta componente como meio para avaliar se as soluções de controlo na origem permitem uma redução das cargas poluentes, suficiente para aumentar a produtividade das ETAR, principalmente nas descargas de *first-flush* com altos níveis de poluentes, pode contribuir para a aplicação deste tipo de medidas e resolver alguns problemas de poluição dos meios receptores.

O estudo feito nesta dissertação foi referente a uma zona da cidade já desenvolvida, sendo a sua aplicação e planeamento de implantação difícil. No entanto, este tipo de soluções quando aplicadas e pensadas desde o início de um empreendimento, podem resultar muito mais eficazmente. O estudo da aplicação deste tipo de soluções numa fase preliminar de um novo empreendimento, pode levar a que a drenagem desse mesmo empreendimento seja diferente e até, possivelmente, menos onerosa em relação à quantidade de materiais necessária para construção das condutas. Permitindo assim que se defina um guião para aplicação deste tipo de medidas em empreendimentos novos.

Neste estudo considerou-se o nível de maré fixo, no entanto esta condição de fronteira é variável e este facto tem grande influência nos resultados. Assim, a realização de um estudo em que as condições a jusante não fossem estacionárias, poder-se-ia obter resultados diferentes. Na verdade, poder-se-iam considerar novos cenários com e sem esta característica comparando-se e verificando-se as diferenças e influência que esta aspecto poderá ter.

As soluções de controlo na origem têm a vantagem de trazer inúmeras vantagens tanto ambientais como sociais, apesar destes aspectos não serem mensuráveis, a avaliação dos mesmos é de extrema importância para o bem estar das sociedades. Assim, a realização de uma avaliação mais aprofundada sobre os benefícios sociais e ambientais que este tipo de soluções pode trazer poderá ajudar a quantificar todos os benefícios que este tipo de soluções acarretam.

Referências Bibliográficas

Albert, L. (2010). *Love the Earth, plant a roof - Earth Day Photo Contest*. Obtido em 2015, de green roofs: <http://www.greenroofs.com/content/2010earthday-photocontest.htm>

Almeida, I. M. (1991). *Características Geotécnicas dos Solos de Lisboa*. Lisboa.

Antunes, C. (2012). *Variação do nível do mar em Cascais. IV Jornadas - Engenharia Geográfica IPG-2012*. Instituto Dom Luis.

Axler, R., Kleist, C., Host, G., Hagley, C., Lonsdale, H., Reed, J., et al. (2009). *Lake Superior Streams - Tools for Stormwater Management - Green Roofs*. Obtido em 2015, de Lake Superior Streams: <http://lakesuperiorstreams.org>

Azzout, Y., Cres, F., Barraud, S., & Alfakih, E. (1994). *Techniques alternatives en assainissement pluvial. Choix, conception, réalisation et entretien*. (T. & Doc., Ed.) Paris.

Barbosa, A. E., Fernandes, J. N., & David, L. M. (2012). Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water Research* , 46, 6787-6798.

Berndtsson, J. C. (2009). *Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review*. Lund University, Department of WaterResources Engineering. Ecological Engineering.

Borsányi, P. (2008). Modelling real-time control options on virtual sewer systems. *J. Environ. Eng. Sci.* , 7, 395-410.

Câmara Municipal de Lisboa. (2010). *Relatório Síntese de Caracterização Biófica de Lisboa*. Lisboa: Câmara Municipal de Lisboa.

Carvalho, T. A. (2012). *Aplicação de um Sistema de Apoio à Decisão (SUSTAIN) para a Minimização dos Caudais Pluviais numa Bacia Urbana de Lisboa*. Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico.

Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. M., & Davison, J. B. (2010). *Green Roofs; building energy savings and the potencial for retrofit*. Energy and Buildings.

Chesapeake Stormwater Network. (2014). *Swales*. Obtido em 2015, de Chesapeake Stormwater Network: <http://chesapeakestormwater.net>

Darsono, S., & Labadie, J. W. (2007). Neural-optimal control algorithm for real-time regulation of in-line storage un combined sewer systems. *Environmental Modelling & Software* 22 , 1349-1361.

Davis, A. P., Shokouhian, M., Sharma, H., & Minani, C. (1998). *Optimization of Bioretention Design for Water Quality and Hydrologic Characteristics*.

De Korte, K. (2009). RTC simulations on large branched sewer systems with SmARControl. *Water*

Science & Technology , 475-482.

De Toffol, S., Laghari, A. N., & Rauch, W. (2009). Are extreme rainfall intensities more frequent? Analysis of trends in rainfall patterns relevant to urban drainage systems. *Water Science & Technology* , 59 (9).

Dias, J. M., & Taborda, R. P. (1988). Evolução recente do nível médio do mar em Portugal. *Anais do Instituto Hidrográfico* , 9, 83-97.

DWA. (2005). *Framework for Planning of Real Time Control of Sewer Networks, Advisory Leaflet DWA- M180E*.

EIVP. (2013). Runoff water management: Past, Present & Future. *Urban Water History in Paris: From Lutèce to the Greater Paris*. Paris: EIVP - École des Ingénieurs de la Ville de Paris.

Environmental Department of Düsseldorf. (2009). *Climate protection, naturally – green roofs in Düsseldorf: financial support and quantitative analysis of aerial photographs*. Obtido em 2015, de Green Roofs: <http://www.greenroofs.com/index.html>

Ferraz, A. B. (2013). *Modelação Matemática do Aumento de Volumes em Sistemas de Drenagem Durante Eventos de Chuva. Interceptor da Malveira*. Lisboa.

Ferreira, F. M. (1999). *Gestão Integrada de Águas Pluviais em Meio Urbano – Soluções de Controlo de Quantidade e Qualidade da Água*. Lisboa, Portugal: Universidade Nova de Lisboa.

Ferreira, F., & David, L. M. (2014). *Abordagens de simulação matemática e introdução à gestão em tempo real*.

Hiltner, R. N., Lawrence, T. M., & Tollner, E. W. (2008). *Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D*. Driftmier Engineering Center, University of Georgia, Department of Biological and Agricultural Engineering. *Journal of Hydrology*.

Huffman, D. (2008). *Pervious Pavement - An infiltration BMP*. United States of America: National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA).

IPCC. (2013). *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

Katsman, C. A. (2011). Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta - the Netherlands as an example. *Climatic Change* (109), 617-645.

Larsen, A. N., Gregersen, I. B., Christensen, O. B., Linde, J. J., & Mikkelsen, P. S. (2009). Potential future increase in extreme one-hour precipitation events over Europe due to climate change. *Water Science & Technology—WST* , 60 (9), 2205-2216.

Leboeuf, Y., Fernandes, Z., Guimarães, J., Simões, J., Ribeiro, P., Ferreira, F., et al. (2015). *Plano Geral de Drenagem de Lisboa 2016-2030*. Lisboa: CML - Câmara Municipal de Lisboa.

Lee, J. Y., Moon, H. J., Kim, T. I., Kim, H. W., & Han, M. Y. (2013). Quantitative analysis on the urban flood mitigation effect by the extensive green roof system. In *Environmental Pollution*.

Lee, S., & Yigitcanlar, T. (2010). Sustainable urban stormwater management: water sensitive urban

design perceptions, drivers and barriers. In T. Yigitcanlar, *Rethinking Sustainable Development: Urban Management, Engineering, and Design* (pp. 26-37). Brisbane, Queensland, Australia: IGI Global.

Machado, R. M. (2014). *Controlo em Tempo Real de Sistemas de Drenagem Urbanos*. Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico.

Maidment, D. R. (1993). *Handbook of Hydrology*.

Marlow, D. R., Cook, S., Moglia, M., & Beale, D. J. (2013). Towards sustainable urban water management: A critical reassessment. *Water Research*, 47, 7150-7161.

Matos, J. M., & Ferreira, F. M. (2011). *Drenagem Urbana*. Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico; Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane.

Matos, M. R. (1999a). Controlo na Origem de Águas Pluviais: Objectivos, Soluções Técnicas e Experiência internacional. *Estratégias Para Beneficiação e Reabilitação de Sistemas Públicos de Drenagem e Águas Residuais*. Lisboa: FUNDEC, IST.

Meysignac, B., & Cazenave, A. (2012). Sea level: A review of present-day and recent-past changes and variability. *Journal of Geodynamics* (58), 96-109.

Millán, M. M. (2014). Extreme hydrometeorological events and climate change predictions in Europe. *Journal of Hydrology*, 518, 206-224.

Nasvik, J. (12 de Agosto de 2010). *Public Works*. (I. Hanley Wood Media, Editor) Obtido em 3 de Janeiro de 2016, de pvmag: http://www.pvmag.com/concrete/designing-pervious_3.aspx

Oliveira, D. F. (2013). *O risco de Inundação Urbana nas Frentes de Água de Deltas e Estuários em Cenários de Alterações Climáticas*. Lisboa, Portugal: Instituto Superior de Agronomia.

Oliveira, P. E., & Ramos, C. (2002). Inundações na cidade de Lisboa no século XX e seus factores agravantes. *Finisterra*, 37 (74), 33-54.

Oliveira, R. P., & Cunha, L. V. (2013). *Estratégia Setorial de Adaptação aos Impactos das Alterações Climáticas Relacionados com os Recursos Hídricos*. Lisboa, Portugal: Agência Portuguesa do Ambiente.

Olsson, G., & Newell, R. B. (1999). *Wastewater Treatment Systems - Modelling, Diagnosis and Control*. London: IWA Publishing.

Pabst, M. (2011). *ADESBA - A new general global control system applied to the Hildesheim sewage system*. Porto Alegre.

Paupério, F. M. (2011). *Estudo dos impactos das alterações climáticas na qualidade dos recursos hídricos superficiais em Portugal*. Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico.

Price, C., Yair, Y., Mugnai, A., Lagouvardos, K., Llasat, M. C., Michaelides, S., et al. (2011). The FLASH Project: using lightning data to better understand and predict flash floods. *Environmental Science & Policy* (4), 898-911.

Prince George's County - Department of Environmental Resources. (1999). *Low-Impact Development*

Design Strategies. United States of America.

Prince George's County Department of Environmental Resources (PGDER). (1993). *Design Manual for Use of Bioretention in Storm water Management*.

PSMSL - Permanent Service for Mean Sea Level. (s.d.). *Relative Sea Level Trends*. Obtido em 18 de Março de 2015, de PSMSL - Permanent Service for Mean Sea Level: <http://www.psmsl.org/products/trends/>

Rauch, W., & Harremoës, P. (1999a). On the potential of genetic algorithms in urban drainage modelling. *Urban Water* , 79-90.

Roesner, L. A., Fellow, P., Bledsoe, B. P., & Brashear, R. W. (2001). Are Best-Management-Practice Criteria Really Environmental Friendly? *Journal of Water Resources Planning and Management* , 127, 150-154.

Schütze, M. (2008). Sewer system real time control supported by the M180 guideline document. *Urban Water Journal* , 67-76.

Schiermeier, Q. (2011). Increased flood risk linked to global warming. *Nature* , 470, 316.

Schilling, W. (1989). *Real-Time Control of Urban Drainage Systems. The State of the Art*. London: IAWPRC Task Group on Real-Time Control of Urban Wastewater Systems.

Schutze. (2004). Real time control of urban wastewater systems - where do we stand today? *Journal of Hydrology* , 299, 335-348.

Sebastião, A. (2005). *Trabalho Final de Curso: Monitorização e Gestão Avançada de Sistemas de Drenagem Urbana*. Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico.

Stinson, M. K. (2005). *Benefits of Sewerage System Real-Time Control*. United States of America: United States Environmental Protection Agency.

Susca, T., Gaffin, S. R., & Dell'Osso, G. R. (2011). Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution* , 159, 2119-2126.

USEPA. (1995). *Dry Detention Ponds*. Obtido em 2015, de United States Environmental Protection Agency: <http://www.epa.gov>

USEPA. (2000). *Estimating Hydrology and Hydraulic Parameters for HSPF*.

USEPA. (2006). *Real Time Control of Urban Drainage Networks*. Washington D.C, United States of America: EPA.

USEPA. (2005). *Storm Water Management Model. User's Manual Versio 5.0*. Cincinnati, United States.

USEPA. (1999). *Storm Water Technology Fact Sheet - Bioretention*. United States of America.

USEPA. (1999). *Storm Water Technology Fact Sheet - Infiltration Trench*. United States of America.

USEPA. (2009). *SUSTAIN— A Framework for Placement of Best Management Practices in Urban*

Watersheds to Protect Water Quality. U.S. EPA, National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S.EPA , Cincinnati.

Vanrolleghem, P. A. (2005). Modelling and real-time control of the integrated wastewater system. *Environmental Modelling Software* 20 , 427-442.

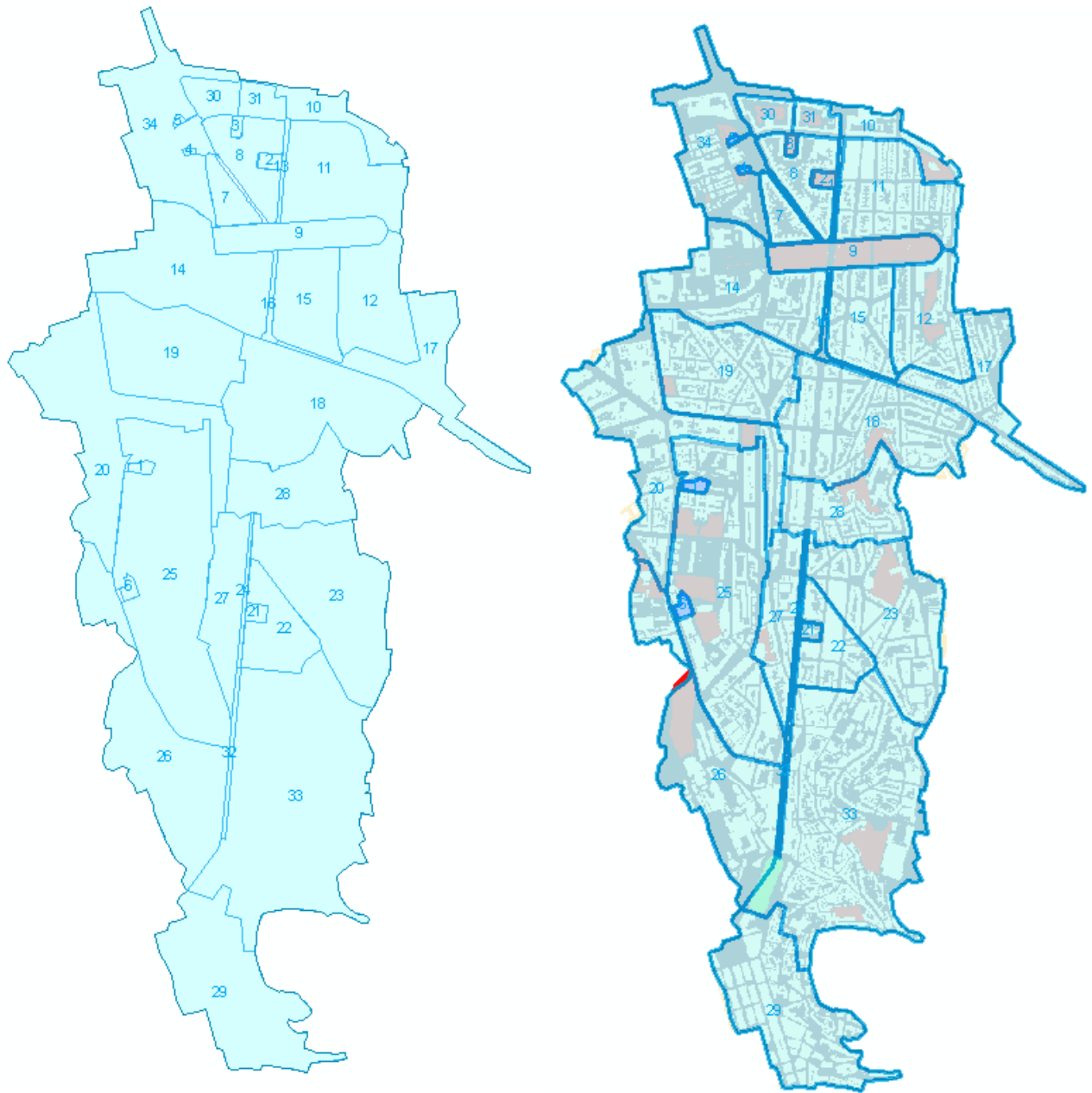
Voskamp, I. M., & Van de Ven, F. H. (2015). Planning support system for climate adaptation: Composing effective sets of blue-green measures to reduce urban vulnerability to extreme weather events. *Building and Environment* , 83, 159-167.

Water by Design. (2009). *Concept Design Guidelines for Water Sensitive Urban Design Version 1*. Brisbane: Healthy Waterways.

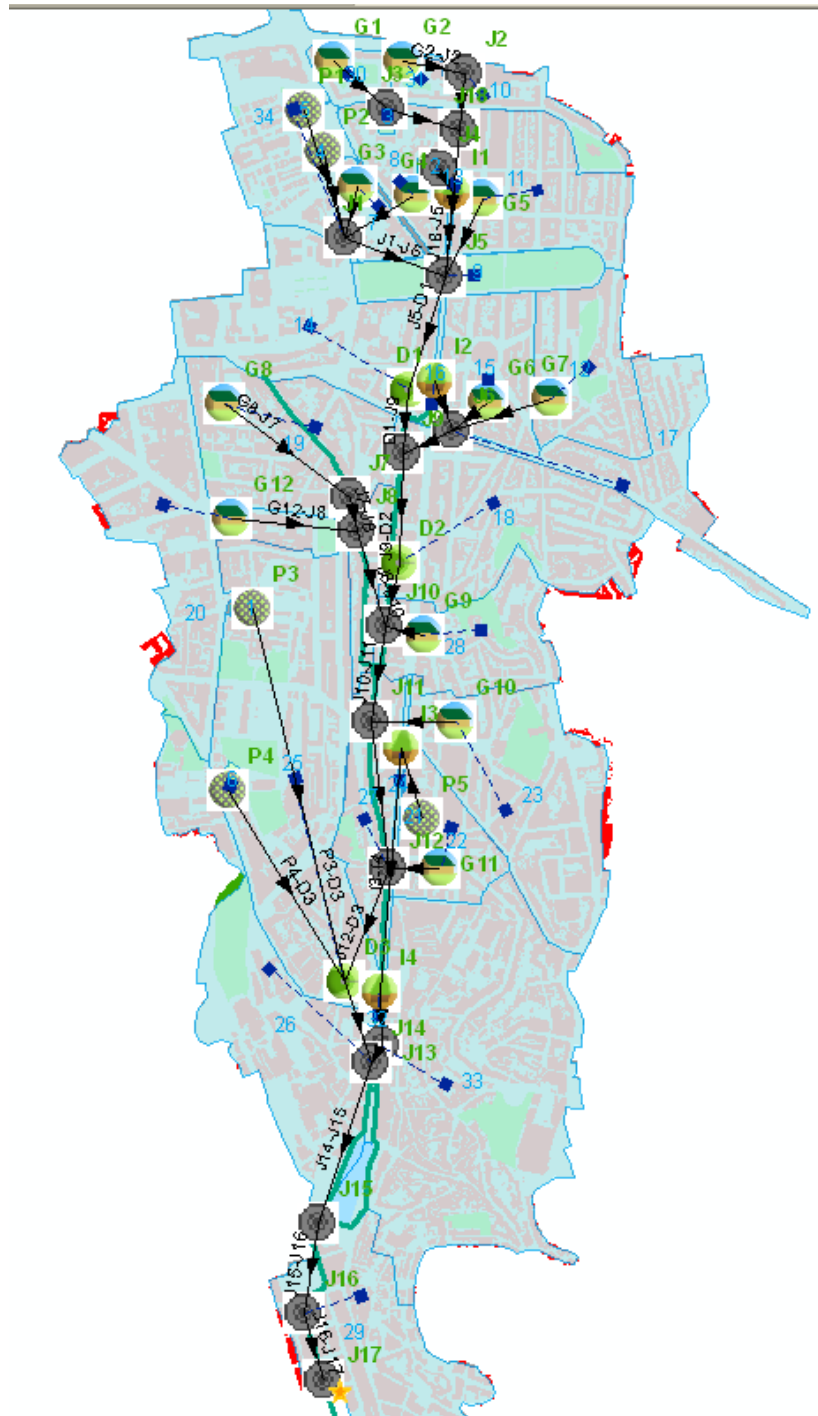
Zacharof, A., Butler, D., Schütze, M., & Beck, M. B. (2004). Screening for real-time control potential of urban wastewater systems. *Journal of Hydrology* (299), 349-362.

Anexos

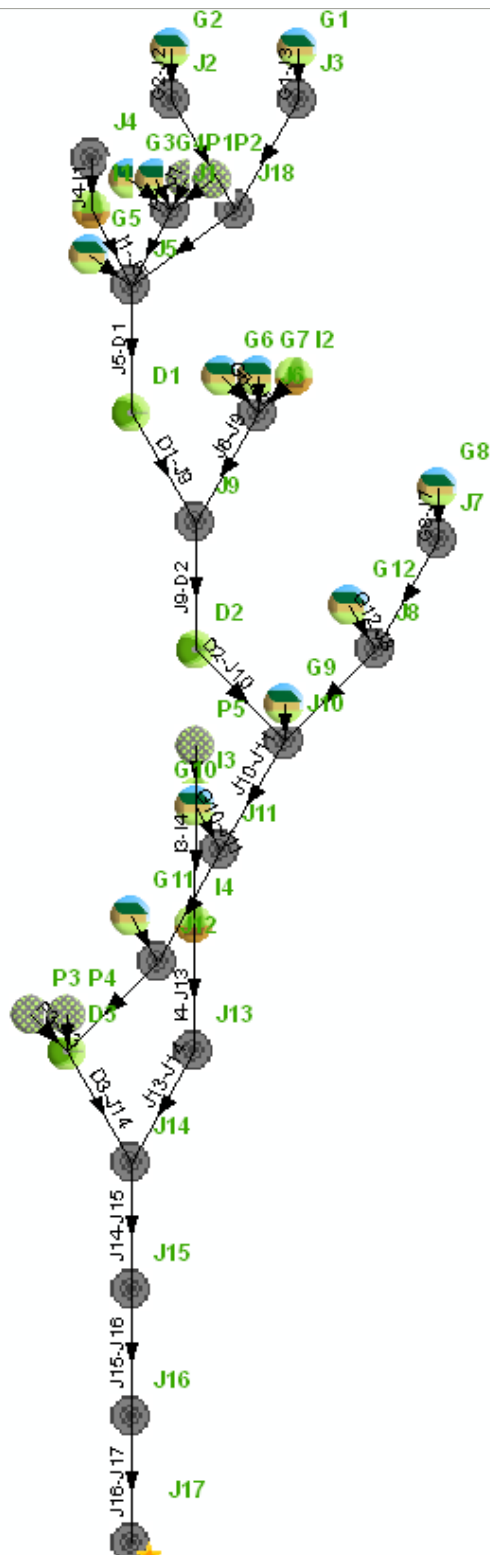
Anexo 1 – Representação final da divisão em sub-bacias



Anexo 2 – Representação final do modelo no SUSTAIN



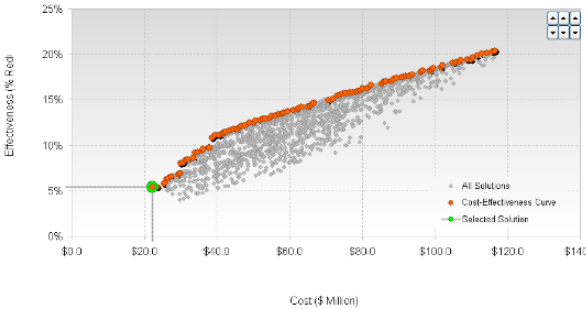
Anexo 3 – Esquema do modelo final do SUSTAIN



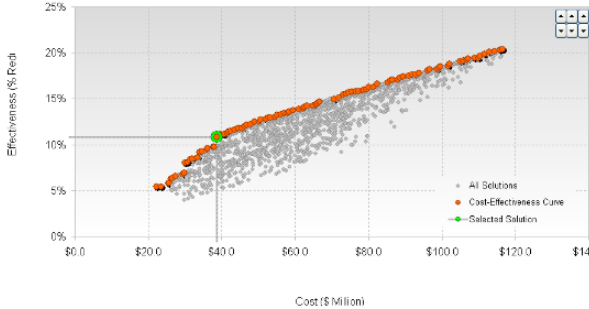
Anexo 4 – Resultados para os diferentes tempos de retorno

- Resultados para T5

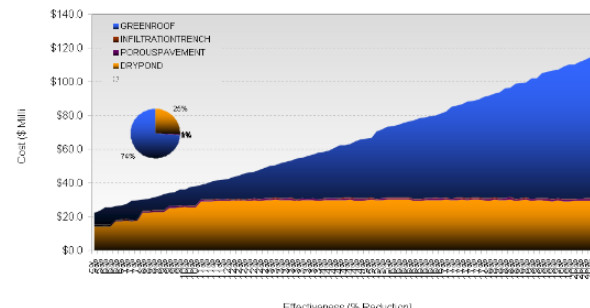
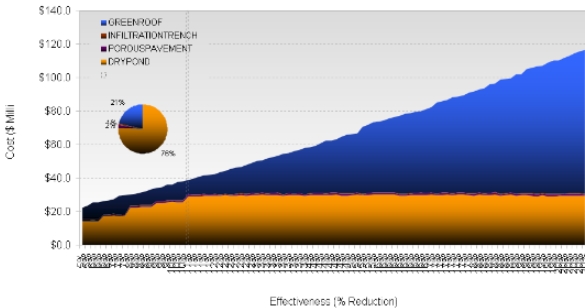
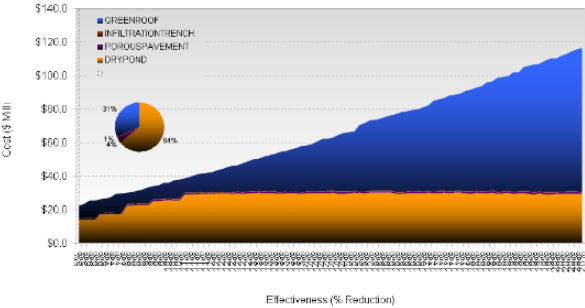
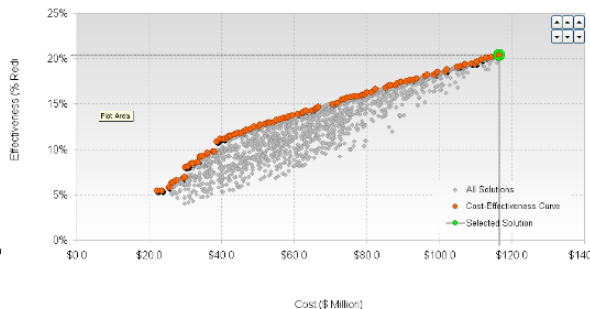
Solução 1 - Mínimo



Solução 3 - Óptima



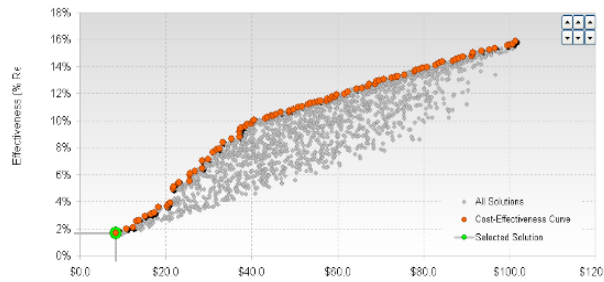
Solução 5 - Máximo



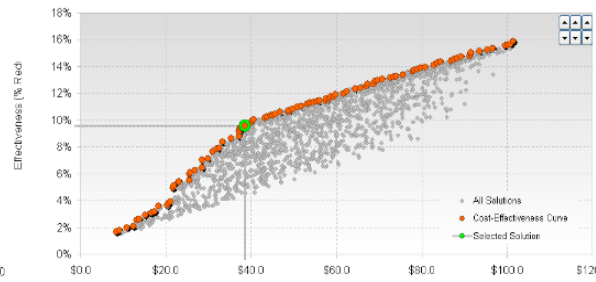
BMP	Parâmetros Variáveis		Solução					
	Tipo de Parâmetro	Intervalo de Valores		1 - Min	2	3 - Ótima	4	5 - Máx
		Mínimo	Máximo					
Bacia 1	Comprimento	0	81	6	3	78	78	75
Bacia 2	Comprimento	0	93	3	90	90	93	93
Bacia 3	Comprimento	0	114	111	111	111	111	114
Telhado Verde 1	Número de unidades	0	25	5	5	10	5	10
Telhado Verde 2	Número de unidades	0	20	5	0	0	5	10
Telhado Verde 3	Número de unidades	0	35	5	15	15	15	25
Telhado Verde 4	Número de unidades	0	70	10	5	10	40	60
Telhado Verde 5	Número de unidades	0	240	20	30	20	40	210
Telhado Verde 6	Número de unidades	0	140	0	0	0	80	140
Telhado Verde 7	Número de unidades	0	100	0	0	0	60	60
Telhado Verde 8	Número de unidades	0	240	10	10	20	10	220
Telhado Verde 9	Número de unidades	0	120	10	20	20	30	90
Telhado Verde 10	Número de unidades	0	220	10	10	0	190	210
Telhado Verde 11	Número de unidades	0	90	10	10	10	50	80
Telhado Verde 12	Número de unidades	0	200	20	20	20	180	180
Pavimento Poroso 1	Comprimento	0	32	15	30	27	15	9
Pavimento Poroso 2	Comprimento	0	32	6	6	6	6	6
Pavimento Poroso 3	Comprimento	0	60	42	12	12	36	30
Pavimento Poroso 4	Comprimento	0	63	51	51	60	18	24
Pavimento Poroso 5	Comprimento	0	66	18	42	42	30	48
Trincheira de Infiltração 1	Comprimento	0	381	111	99	183	333	252
Trincheira de Infiltração 2	Comprimento	0	342	60	339	333	276	243
Trincheira de Infiltração 3	Comprimento	0	576	459	195	522	453	75
Trincheira de Infiltração 4	Comprimento	0	639	63	201	51	585	468

• **Resultados para T10**

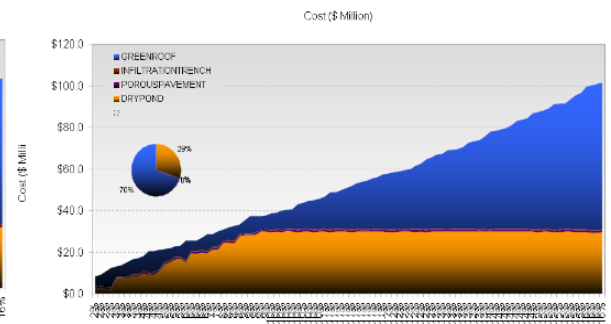
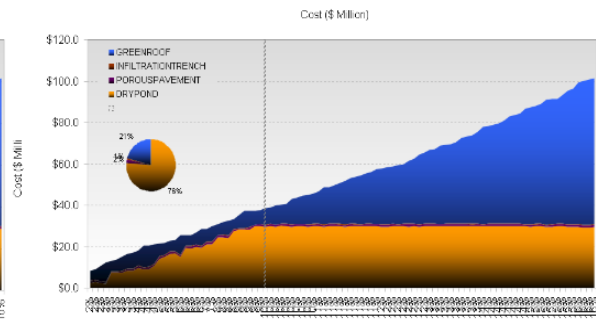
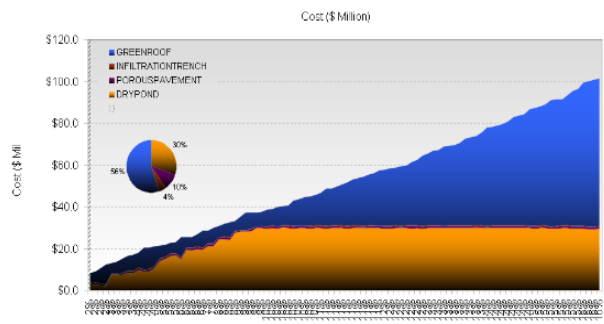
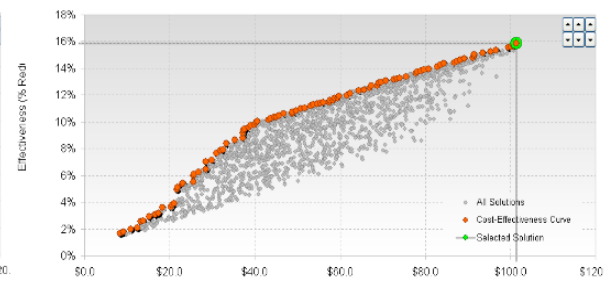
Solução 1 - Mínimo



Solução 3 - Óptima



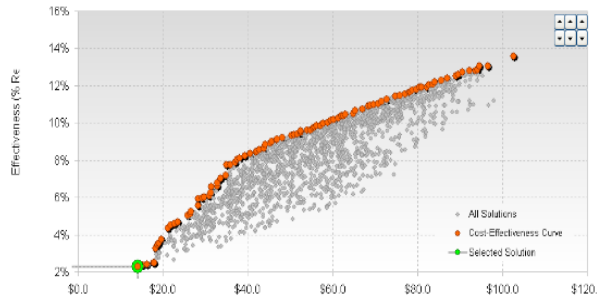
Solução 5 - Máximo



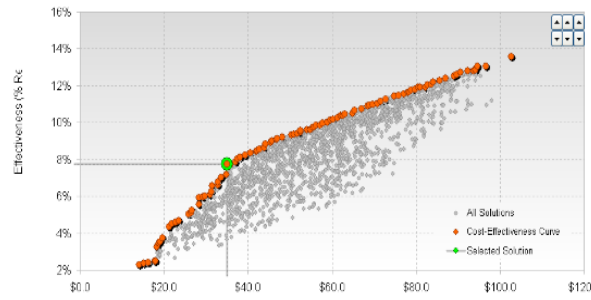
BMP	Parâmetros Variáveis		Solução					
	Tipo de Parâmetro	Intervalo de Valores		1 - Min	2	3 - Ótima	4	5 - Máx
		Mínimo	Máximo					
Bacia 1	Comprimento	0	81	18	81	81	81	81
Bacia 2	Comprimento	0	93	6	9	90	90	93
Bacia 3	Comprimento	0	114	3	99	111	114	111
Telhado Verde 1	Número de unidades	0	25	10	0	10	10	15
Telhado Verde 2	Número de unidades	0	20	0	15	0	10	15
Telhado Verde 3	Número de unidades	0	35	0	0	30	30	30
Telhado Verde 4	Número de unidades	0	70	10	20	10	25	20
Telhado Verde 5	Número de unidades	0	240	10	0	10	110	230
Telhado Verde 6	Número de unidades	0	140	10	10	10	50	100
Telhado Verde 7	Número de unidades	0	100	10	20	20	20	40
Telhado Verde 8	Número de unidades	0	240	0	0	0	20	150
Telhado Verde 9	Número de unidades	0	120	0	0	0	30	110
Telhado Verde 10	Número de unidades	0	220	0	0	0	30	80
Telhado Verde 11	Número de unidades	0	90	20	20	20	80	90
Telhado Verde 12	Número de unidades	0	200	0	0	10	130	180
Pavimento Poroso 1	Comprimento	0	32	30	27	21	18	3
Pavimento Poroso 2	Comprimento	0	32	18	30	18	18	27
Pavimento Poroso 3	Comprimento	0	60	12	15	39	45	48
Pavimento Poroso 4	Comprimento	0	63	60	57	42	63	57
Pavimento Poroso 5	Comprimento	0	66	27	27	21	21	12
Trincheira de Infiltração 1	Comprimento	0	381	252	258	210	318	312
Trincheira de Infiltração 2	Comprimento	0	342	198	231	189	90	144
Trincheira de Infiltração 3	Comprimento	0	576	435	84	87	537	543
Trincheira de Infiltração 4	Comprimento	0	639	591	582	588	633	612

• **Resultados para T20**

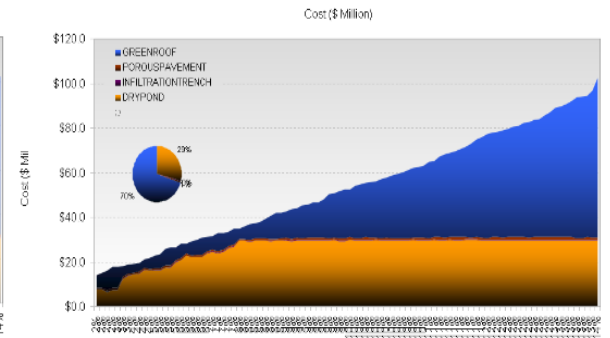
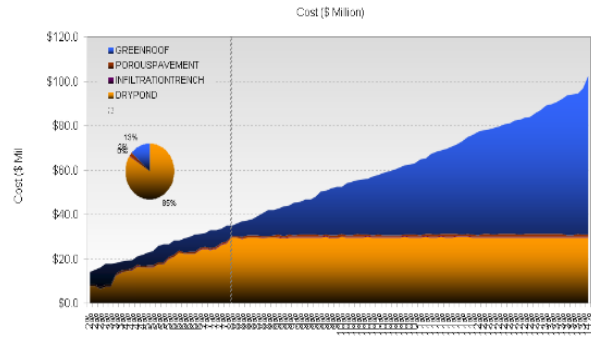
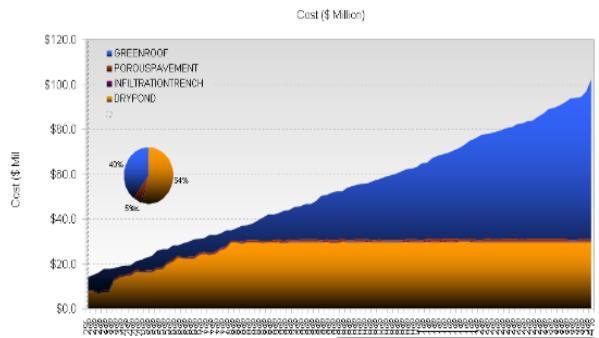
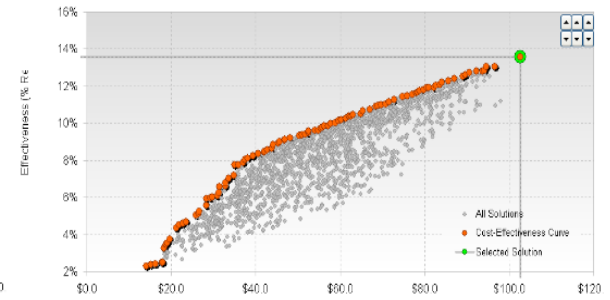
Solução 1 - Mínimo



Solução 3 - Ótimo

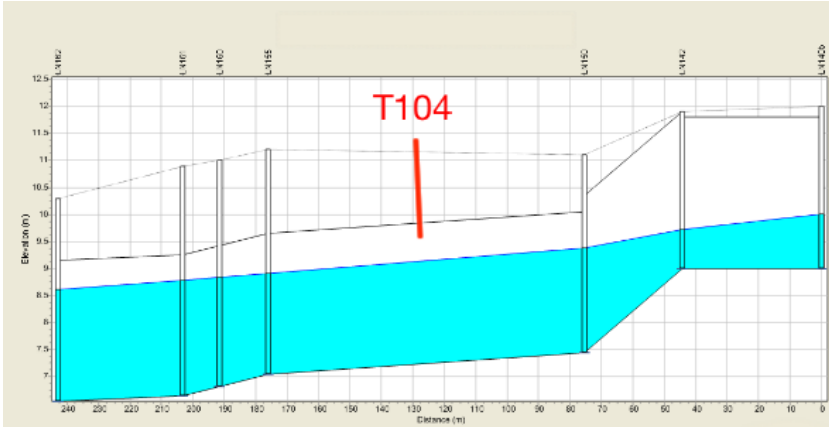


Solução 5 - Máximo

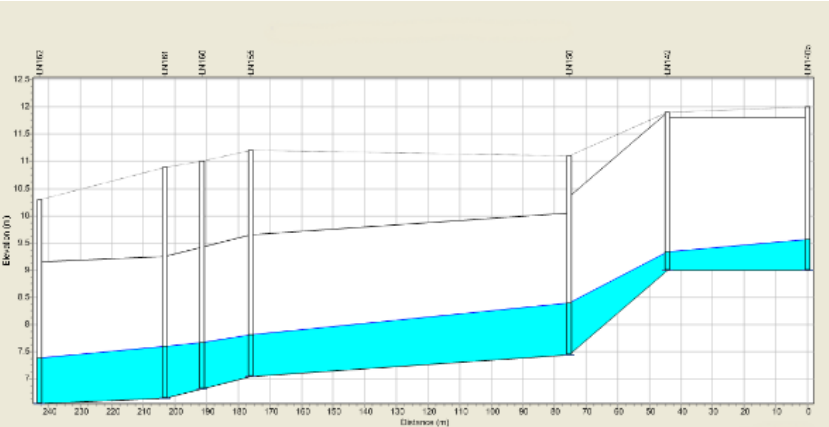


BMP	Parâmetros Variáveis		Solução					
	Tipo de Parâmetro	Intervalo de Valores		1 - Min	2	3 - Ótima	4	5 - Máx
		Mínimo	Máximo					
Bacia 1	Comprimento	0	81	21	81	81	81	81
Bacia 2	Comprimento	0	93	15	12	87	87	87
Bacia 3	Comprimento	0	114	36	96	114	114	114
Telhado Verde 1	Número de unidades	0	25	20	20	15	5	0
Telhado Verde 2	Número de unidades	0	20	5	5	5	10	0
Telhado Verde 3	Número de unidades	0	35	0	0	0	0	5
Telhado Verde 4	Número de unidades	0	70	10	10	20	40	65
Telhado Verde 5	Número de unidades	0	240	0	10	0	140	230
Telhado Verde 6	Número de unidades	0	140	0	0	0	80	30
Telhado Verde 7	Número de unidades	0	100	10	10	0	90	90
Telhado Verde 8	Número de unidades	0	240	0	0	10	40	230
Telhado Verde 9	Número de unidades	0	120	20	10	0	60	110
Telhado Verde 10	Número de unidades	0	220	0	0	0	40	170
Telhado Verde 11	Número de unidades	0	90	10	10	10	20	30
Telhado Verde 12	Número de unidades	0	200	10	10	10	40	120
Pavimento Poroso 1	Comprimento	0	32	15	9	6	24	12
Pavimento Poroso 2	Comprimento	0	32	15	9	0	30	30
Pavimento Poroso 3	Comprimento	0	60	45	54	45	54	21
Pavimento Poroso 4	Comprimento	0	63	33	33	63	60	60
Pavimento Poroso 5	Comprimento	0	66	9	36	3	9	51
Trincheira de Infiltração 1	Comprimento	0	381	108	108	99	279	288
Trincheira de Infiltração 2	Comprimento	0	342	30	9	6	288	339
Trincheira de Infiltração 3	Comprimento	0	576	63	432	105	561	534
Trincheira de Infiltração 4	Comprimento	0	639	372	114	198	312	402

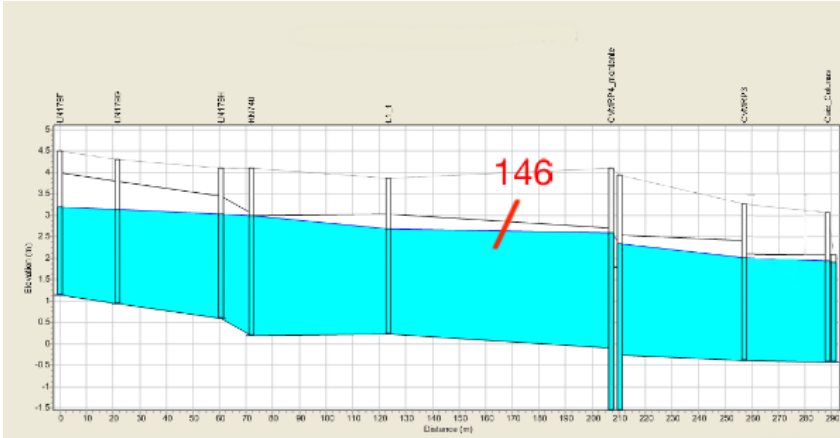
Anexo 6 – Comparação entre os vários cenários para o perfil do Troço 1



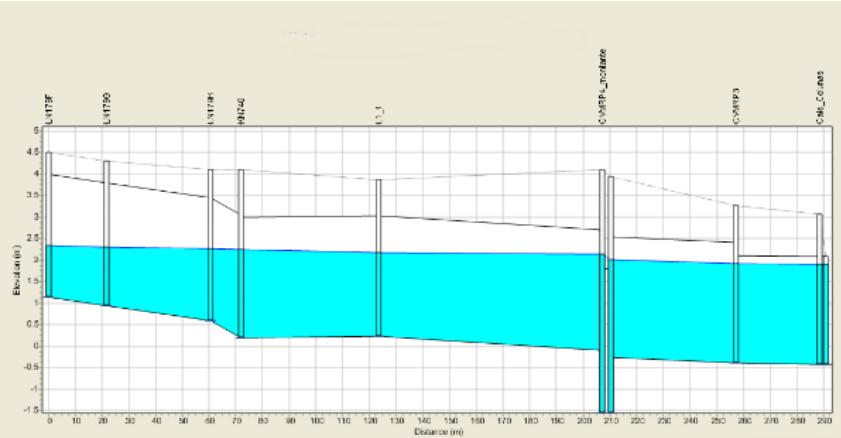
Troço 1 - Cenário 1



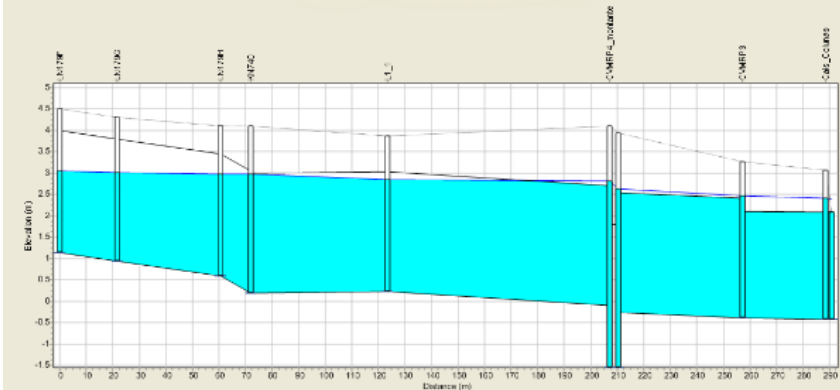
Anexo 7 – Comparação entre os vários cenários para o perfil do Troço 2



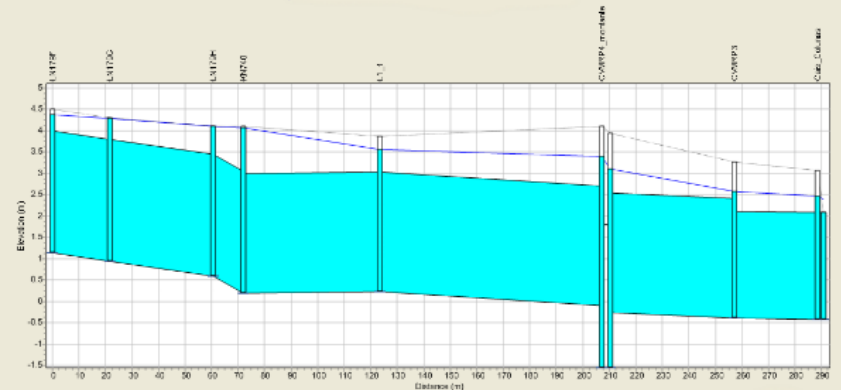
Troço 2 - Cenário 1



Troço 2 - Cenário 2



Troço 2 - Cenário 3



Troço 2 - Cenário 4