

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA BACIA DE DRENAGEM DO LAVRADIO

Carlos Manuel Rodrigues Pimenta

**Mestrado em Engenharia Civil
Área de Especialização: Estruturas
Dissertação**

ORIENTADOR: Doutor Nelson Jorge Gaudêncio Carriço

Junho de 2021

Dissertação submetida no Instituto Politécnico de Setúbal

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS
NA BACIA DE DRENAGEM DO LAVRADIO**

Mestrado em Engenharia Civil

DECLARAÇÃO DE AUTORIA DO TRABALHO

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Carlos Manuel Rodrigues Pimenta

(assinatura)

DIREITOS DE CÓPIA OU COPYRIGHT

© **Copyright:** Carlos Manuel Rodrigues Pimenta

O Instituto Politécnico de Setúbal tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“Com o tempo e com a água, tudo muda.”

Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Doutor Nelson Carriço, meu orientador, pela disponibilidade demonstrada e pelo valiosíssimo apoio dado em todos os momentos do desenvolvimento desta dissertação, desde a definição do âmbito do trabalho até à revisão do documento final.

Às Engenheiras da Câmara Municipal do Barreiro, Eng.^a Rita Isidro e Eng.^a Manuela Sobral, pelo papel determinante na definição do tema deste trabalho, pelo interesse demonstrado e pela cedência de todos os dados relativos à bacia de drenagem, e cadastro do sistema, os quais serviram como base do trabalho desenvolvido.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia, e em particular ao programa Verão com Ciência, que facultou também meios indispensáveis ao trabalho de pesquisa e investigação desenvolvido.

Por fim, aos meus amigos, colegas de mestrado e à minha família. Foram um imenso apoio e fonte de inspiração e motivação durante todo o meu percurso académico.

A todos, o meu sincero reconhecimento e gratidão.

RESUMO

As inundações em meio urbano estão na origem de pesados encargos para a sociedade e economia, como revelam dados divulgados pela comissão europeia. Fenómenos como a impermeabilização de terrenos devido à sua urbanização, que para além do acréscimo de volume de escoamento aumentam também a velocidade do escoamento superficial, provocam reduções nos tempos de concentração e de resposta das bacias hidrográficas originando inundações. Atualmente é ainda necessário considerar fatores derivados das alterações climáticas visto que, com o aumento da temperatura média no planeta e conseqüente derretimento das calotas polares, prevê-se a subida do nível médio das águas do mar colocando em risco territórios costeiros a cotas reduzidas. Também a alteração e disrupção dos regimes de precipitação, nos quais se constata uma diminuição do número de fenómenos e um aumento da sua intensidade, passará a ser cada vez mais comum, o que agrava a problemática das inundações.

Neste contexto, o presente trabalho consiste na avaliação do impacto das alterações climáticas no sistema de drenagem urbana do Lavradio, no município do Barreiro. Este sistema inclui uma bacia de retenção e a jusante desta, uma vala que descarrega no estuário do rio Tejo. A sua localização pode tornar o sistema suscetível de sofrer eventos extremos, com efeitos gravosos para a população, quando existe simultaneidade da subida da maré com picos de pluviosidade mais intensos. Assim, caracterizou-se esse sistema, com o apoio e disponibilização de dados por parte da Câmara Municipal do Barreiro, e estudou-se uma parte desse sistema constituída por três sub-bacias hidrográficas que descarregam, através de coletores e de uma vala a céu aberta, numa bacia de retenção. Considerou-se, para efeitos de avaliação do impacto das alterações climáticas, a situação atual e também diferentes cenários de alterações climáticas, recorrendo, para tal, à recolha de dados associados à pluviosidade e procedendo-se à modelação, através do software SWMM, de forma a realizar um diagnóstico e a desenvolver uma solução de melhoria a apresentar à Entidade Gestora.

PALAVRAS-CHAVE: Alterações climáticas; Bacia de retenção; Drenagem pluvial; Inundações urbanas.

ABSTRACT

Floods in urban areas can cause heavy losses, both for civil society and for the economy, as shown by data released by the European Commission. Phenomena such as the waterproofing of ground due to urbanization, which, in addition to increasing the volume of runoff, also increase the speed of surface runoff, causing reductions in the concentration and response times of the hydrographic basins, which in turn causes flooding. Currently, it is still necessary to consider factors derived from climate change since, with the increase in the average temperature on the planet surface, and the consequent melting of the polar ice caps, an increase in the average sea level is expected to put coastal territories at low levels at risk. Also the change and disruption of precipitation regimes, in which there is a reduction in the number of phenomena and an increase in their intensity, will become increasingly common, which aggravates the problem of flooding.

The present dissertation arises in the context previously described and consists in evaluating the impact of climate change on the Lavradio urban drainage system, in the municipality of Barreiro. This system includes a retention pond and, downstream is an open drain that discharges into the Tagus River estuary. Its location can make the system susceptible to suffering extreme events, with serious effects on the population, when there is a simultaneous rise in the tide with more intense rainfall peaks. Thus, the referred system was characterized, with the support of the Municipality of Barreiro technicians. In this work a part of the system consisting of three hydrographic sub-basins that discharge, through collectors and an open drain, in a retention pond was modelled and studied. The current situation and different climate change scenarios were considered in order to assess the impact of climate change. The collection of data associated with the terrain, the basin, and the rainfall regimes, were used for this purpose. With the aid of SWMM software it was possible to carry out a diagnosis to be presented to the system's Water Utility.

KEYWORDS: Climate change; Rainwater drainage system; Retention basin; Urban flooding.

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. SÍNTESE DE CONHECIMENTOS	5
2.1 BREVE ENQUADRAMENTO	5
2.2 RESENHA HISTÓRICA DA DRENAGEM URBANA	5
2.3 SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA	8
2.3.1 TIPOS DE SISTEMAS.....	8
2.3.2 SISTEMAS CONVENCIONAIS	9
2.3.3 SISTEMAS NÃO CONVENCIONAIS.....	10
2.4 IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NA DRENAGEM URBANA	11
2.5 IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA DRENAGEM URBANA.....	13
3. METODOLOGIA.....	17
3.1 BREVE ENQUADRAMENTO	17
3.2 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NO SISTEMA DE DRENAGEM PLUVIAL.....	17
3.2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	17
3.2.2 DADOS DE CADASTRO	17
3.2.3 DADOS HIDRÁULICOS	18
3.2.4 DADOS HIDROLÓGICOS.....	18
3.2.5 DADOS TOPOGRÁFICOS DA ÁREA DE IMPLANTAÇÃO DA BACIA E VALA EM ESTUDO	19
3.2.6 CENÁRIOS FUTUROS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS.....	19
3.3 MODELAÇÃO HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA	20
3.3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	20
3.3.2 PROCESSOS HIDROLÓGICOS	21
3.3.3 PROPAGAÇÃO DE ESCOAMENTO	21
3.3.4 SIMULAÇÃO DE DIFERENTES CENÁRIOS DE EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO EXTREMOS NO SWMM.....	21
3.3.5 MODELAÇÃO DA BACIA DE RETENÇÃO.....	22
3.4 DEFINIÇÃO DE AÇÕES DE ADAPTAÇÃO.....	22
3.4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	22
3.4.2 AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE.....	22
3.4.3 DEFINIÇÃO DE AÇÕES DE ADAPTAÇÃO	23
4. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	27
4.1 ENQUADRAMENTO	27
4.2 REDE HIDROGRÁFICA NATURAL DO MUNICÍPIO O DO BARREIRO.....	27
4.3 CARACTERÍSTICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DA VALA DAS RATAS	29

4.4	CARACTERÍSTICAS E OCUPAÇÃO DO SOLO	30
4.5	FUNCIONAMENTO DO SISTEMA HIDRÁULICO	32
5.	IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA BACIA DE RETENÇÃO EM ESTUDO	37
5.1	ENQUADRAMENTO	37
5.2	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	37
5.2.1	FORMULAÇÃO DO SCS	37
5.2.2	FORMULAÇÃO DE TEMEZ	40
5.2.3	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO DA BACIA EM ESTUDO	41
5.3	INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO	42
5.4	DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO	43
5.5	CÁLCULO DO CAUDAL DE PONTA DE CHEIA ATRAVÉS DE MÉTODOS CINEMÁTICOS	44
5.5.1	MÉTODO RACIONAL	45
5.5.2	MÉTODO DO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)	46
5.6	VOLUME DA BACIA DE RETENÇÃO SEGUNDO O MÉTODO HOLANDÊS E COMPARAÇÃO COM O VOLUME EXISTENTE	47
5.7.	MODELAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA COM O SWMM	48
5.7.1	CONSTRUÇÃO DO MODELO PARA ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL	48
5.7.2	CONSTRUÇÃO DO MODELO PARA DIFERENTES CENÁRIOS FUTUROS	52
5.8	DIAGNÓSTICO DO SISTEMA	56
5.8.1	RESULTADOS PARA A SITUAÇÃO ATUAL	56
5.8.2	RESULTADOS PARA OS DIFERENTES CENÁRIOS FUTUROS.....	59
	Cenário 1.....	59
	Cenário 2.....	62
	Cenário 3.....	64
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
6.1	CONCLUSÕES	69
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre hidrograma rural, semirrural e urbano (Adaptado de Butler e Davies, 2004)	12
Figura 2 – Alterações projetadas, em percentagem (%), na precipitação anual à esquerda e de verão à direita para o período de 2071–2100 (Adaptado de EEA, 2017).....	14
Figura 3 - Alterações projetadas de precipitações intensas para o Inverno e Verão no período de 2071-2100(Adaptado de EEA, 2017)	15
Figura 4 – Abordagens à avaliação da vulnerabilidade (Adaptado de Kirshen, 2015).....	23
Figura 5 – Localização das bacias de drenagem do concelho do barreiro relativamente à bacia hidrográfica do Rio Tejo (Extraído de Sécio, 2012)	27
Figura 6 – Principais eixos de drenagem do Barreiro (CMB, 2010)	28
Figura 7 – Bacia hidrográfica da Vala das Ratas Tejo (Extraído de Sécio, 2012).....	29
Figura 8 – Perfil longitudinal da Vala das Ratas (Sécio, 2012).....	31
Figura 9 – Sistema de drenagem pluvial da bacia hidrográfica da Vala das Ratas (CMB 2020).....	33
Figura 10 - Vista da bacia de retenção, desarenador e descarregador de saída.....	34
Figura 11 – Zonas de inundação do concelho do Barreiro (CMB & Engidro, 2010).....	35
Figura 12- Fator corretivo relativo às condições do escoamento (Correia, 1984)	40
Figura 13- Fator corretivo relativo à percentagem de área impermeável (Correia, 1984).....	40
Figura 14 – Regiões pluviométricas e parâmetros das curvas IDF (Decreto-Regulamentar nº 23/95, de 23 de agosto)	42
Figura 15 – Curva IDF obtida para o período de retorno de 100 anos	43
Figura 16 – Hietograma obtido através do método dos blocos alternados para um período de retorno de 100 anos considerando a intensidade atual	44
Figura 17 – Representação esquemática dos elementos do modelo criado em ambiente SWMM	49
Figura 18 – Hietograma obtido através do método dos blocos alternados para um período de retorno de 100 anos considerando a intensidade atual	50
Figura 19 – Representação gráfica do modelo desenvolvido em ambiente SWMM.....	52
Figura 20 – Alterações máximas para eventos climáticos extremos ao longo o para períodos de retorno entre 2 e 100 anos. (Adaptado de Monjo et al., 2018)	52
Figura 21 – Cenários médios multi-modelo de alterações em eventos extremos de precipitação horária para a região de Lisboa (Adaptado de R. Monjo et al, 2018)	53
Figura 22 - Hietogramas obtido através do método dos blocos alternados para um período de retorno de 100 anos considerando a intensidade prevista para os vários cenários futuros.....	54

Figura 23 – escoamento gerado pelo evento de precipitação com período de retorno de 100 anos para cada uma das sub-bacias hidrográficas que drenam para a bacia de retenção	57
Figura 24 - Caudal total escoado nas tubagens de ligação entre a bacia de retenção e a vala das Ratas para cada momento da simulação	58
Figura 25 - Profundidade de água no nó que representa a bacia de retenção em função do tempo decorrido na simulação em ambiente SWMM	58
Figura 26 – Altura de água entre a bacia de retenção e a Vala das Ratas	59
Figura 27 – escoamento gerado em cada uma das sub-bacias hidrográficas	60
Figura 28 – Caudal total escoado nas tubagens de ligação entre a bacia de retenção e a vala das Ratas para cada momento da simulação	61
Figura 29 – Profundidade de água no nó que representa a bacia de retenção em função do tempo decorrido na simulação em ambiente SWMM	62
Figura 30 – Altura de água entre a bacia de retenção e a Vala das Ratas	62
Figura 31 – escoamento gerado em cada uma das sub-bacias hidrográficas	63
Figura 32 – Caudal total escoado nas tubagens de ligação entre a bacia de retenção e a vala das Ratas para cada momento da simulação	63
Figura 33 – Profundidade de água no nó que representa a bacia de retenção em função do tempo decorrido na simulação em ambiente SWMM	64
Figura 34 – Altura de água entre a bacia de retenção e a Vala das Ratas	64
Figura 35 - escoamento gerado em cada uma das sub-bacias hidrográficas	65
Figura 36 - Caudal total escoado nas tubagens de ligação entre a bacia de retenção e a vala das Ratas para cada momento da simulação	65
Figura 37 - Profundidade de água no nó que representa a bacia de retenção em função do tempo decorrido na simulação em ambiente SWMM	66
Figura 38 – Altura de água entre a bacia de retenção e a Vala das Ratas	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos sistemas separativo.....	8
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos sistemas unitários.....	9
Tabela 3 – Ocupação do solo na Bacia da Vala das Ratas (Sécio, 2012.....	31
Tabela 4 – Tipos de solo em função das suas características para obtenção do CN, (Extraído de Correia, 1984).....	39
Tabela 6 – Valores de μ em função do grau de urbanização (JAE, 1998).....	41
Tabela 7 – Tempo de concentração da bacia em estudo segundo o SCS e Temez.....	41
Tabela 8 – Valores do coeficiente C da fórmula racional, retirado de (Portela et al., 2002).....	46
Tabela 9 – Resultados obtidos para o volume de armazenamento pelo método holandês.....	48
Tabela 10 – Área e percentagem impermeável de cada sub-bacia.....	50
Tabela 11 – Curva de armazenamento associada ao modelo da bacia.....	50
Tabela 12 – Previsões de alteração relativa de precipitação horária para eventos extremos em Lisboa (Adaptado de (Monjo et al., 2018)).....	53
Tabela 13 – Elementos de Marés (Instituto Hidrográfico, 2020).....	55
Tabela 14 – Análise da influência das marés na secção de referência à saída da bacia de retenção.....	55
Tabela 15 – Comparação dos resultados obtidos para os 3 cenários.....	66

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CO₂ – Dióxido de Carbono

EG – Entidade Gestora

SIG – Sistema de informação geográfica

CAD – Desenho assistido por computador

SCS – Soil Conservation Services

RCP – Representative Concentration Pathways

SWMM - Storm Water Management Model

CAT – Climate Adjustment Tool

EPANET - Environmental Protection Agency Network

NUTS - Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos

RH 5 - Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste

CMB – Câmara Municipal do Barreiro

K_f - Fator de forma segundo Horton (Adimensional)

K_c - Índice de compacidade segundo Gravellius. (Adimensional)

PGAS – Plano Geral de Águas e Saneamento do Concelho do Barreiro

ETAR – Estação de tratamento de águas residuais

t_c – Tempo de concentração (min)

t_i – Tempo de atraso (min)

i_{mb} – Declive médio da bacia hidrográfica (%)

L_b – Comprimento do curso de água principal (m).

S_{mr} – Capacidade máxima de retenção

i_m – Declive médio do curso de água principal da bacia (m/m);

t'_c – Tempo de concentração adaptado por Temez a bacias urbanas

μ – Parâmetro corretivo em função do grau de urbanização da bacia

CN – Número de escoamento, do inglês curve number

IDF - Curvas de Intensidade-Duração-Frequência

i - Intensidade de precipitação (mm/h)

Q_p - caudal de ponta de cheia (m³/s)

I_u – Intensidade de precipitação útil (mm/h)

V_a - Volume de armazenamento (m³)

q_s – Caudal específico efluente (mm/min)

ZH – Zero hidrográfico (m)

NMA - Nível médio do mar adotado (m)

$PM_{máx}$ - Preia-Mar Máxima (m)

BR - Bacia de retenção

VR – Vala das Ratas/Vala do Lavradio

ARH – Administração da Região Hidrográfica

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O conceito de alteração climática, refere-se a uma diferença no estado do clima, que se mantém por um período de tempo, passível de ser identificada e quantificada, por exemplo através da comparação de dados estatísticos (IPCC, 2013). As alterações climáticas, são resultado de emissões, de gases com efeito de estufa, causadas por diversas atividades humanas tais como a queima de combustíveis fósseis para produção de eletricidade, para transporte, na indústria e em atividades comerciais e residenciais, pela desflorestação, pelas práticas agrícolas entre outras

Segundo dados da Agência Europeia do Ambiente, mesmo que as emissões de CO₂ e de outros gases com efeito estufa num futuro próximo fossem reduzidas para níveis próximos de zero, o tempo de residência atmosférica destes gases e a dinâmica do sistema climático levaria a que as mudanças climáticas antropogénicas perdurassem por várias décadas ou até mesmo séculos (EEA, 2017). Como consequência, continuará a ocorrer o aumento da temperatura, do nível médio da água do mar e da frequência de eventos climáticos extremos, tais como, mudanças nos padrões de precipitação e a maior ocorrência de eventos pluviosos de intensidade extrema.

Atualmente, mais de metade da população mundial vive em regiões urbanas e este número continua a aumentar (Revi, *et al.*, 2014). Consequentemente, têm-se verificado efeitos nos sistemas urbanos de drenagem de águas pluviais. O processo de urbanização produz alterações significativas no escoamento superficial, o que obriga à criação de novos sistemas de drenagem de águas pluviais mais eficazes no controlo e encaminhamento das águas superficiais, ou à reabilitação dos sistemas existentes. A drenagem pluvial urbana é diretamente afetada pelas alterações climáticas, em particular pela maior intensidade dos eventos de precipitação e também pela subida do nível do mar, no caso de regiões costeiras. A manutenção do bom funcionamento destes sistemas, para além de uma necessidade, deve ser encarada como uma prioridade, visto que está diretamente ligada com fatores como a qualidade de vida e a segurança de pessoas e bens materiais.

A abordagem convencional na conceção de sistemas de drenagem pluvial considera o encaminhamento da água precipitada o mais rápido possível para o meio recetor, para fora do meio urbano. No entanto, este tipo de abordagem não considera os possíveis impactos a jusante, como por exemplo, a falta de capacidade dos sistemas de jusante em lidar com maiores volumes de água, e consequentes inundações. Devido ao crescimento da

urbanização, e aos problemas associados, esta abordagem de conceção dos sistemas encontra-se atualmente a ser substituída por soluções e técnicas mais sustentáveis onde se tenta identificar soluções que minimizam os impactos negativos, restabelecendo o ciclo hidrológico natural, ao mesmo tempo que produzem benefícios sociais, económicos e ambientais. (David, 2003; Pinto e Pinheiro, 2006).

Para uma adequada avaliação do impacto das alterações climáticas num sistema urbano de drenagem pluvial importa conhecer detalhadamente este sistema e realizar o respetivo diagnóstico, verificando a ocorrência de inundações, a sua magnitude e localização, tomando em consideração para tal previsões de alterações climáticas para o futuro.

1.2. OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

O objetivo principal desta dissertação de mestrado consiste em realizar uma avaliação do impacto das alterações climáticas numa bacia de amortecimento de cheia (ou bacia de retenção), localizada no sistema de drenagem do Lavradio, nomeadamente, considerando diferentes cenários futuros de forma a identificar a suscetibilidade de ocorrência de inundações devido a eventos extremos de precipitação. Pretende-se também propor soluções para a mitigação dos problemas encontrados.

Os objetivos específicos deste trabalho são os quatro que se apresentam em seguida:

- Diagnóstico da situação atual do sistema de drenagem pluvial da bacia de drenagem do Lavradio, que permitirá efetuar uma análise detalhada do problema e a identificação das áreas de atuação prioritária.
- Avaliação do desempenho hidráulico do sistema para diferentes cenários de alterações climáticas, recorrendo ao software de modelação SWMM.
- Identificação e avaliação de soluções ou ações de melhoria do sistema, tendo como objetivo a mitigação da problemática das inundações.
- Criação de recomendações de melhoria do sistema de drenagem urbana para a entidade gestora (i.e., Câmara Municipal do Barreiro).

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, seguidos das referências bibliográficas consultadas bem como dos anexos. Neste primeiro capítulo faz-se um breve enquadramento do tema, apresentam-se os objetivos definidos na realização desta dissertação e a estrutura seguida para os atingir. Depois deste capítulo introdutório, no Capítulo 2 faz-se a revisão bibliográfica, apresentando-se uma resenha histórica da

drenagem urbana, os tipos de sistemas de drenagem pluvial e ainda os impactos que a urbanização e as alterações climáticas têm nestes sistemas. No Capítulo 3 apresenta-se a metodologia seguida no presente trabalho para avaliar o impacto das alterações climáticas em bacias de drenagem enquanto no Capítulo 4 se expõe a caracterização física da bacia de drenagem do Lavradio, resumindo toda a informação existente, nomeadamente, dados de cadastro, de ocupação do solo e de precipitação. No Capítulo 5 por sua vez apresenta-se aplicação da metodologia previamente abordada à bacia de drenagem em estudo discutindo-se os resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 6, elaboram-se as considerações finais apresentando-se as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho e ainda as recomendações e sugestões para trabalhos futuros nesta área do conhecimento.

2. SÍNTESE DE CONHECIMENTOS

2.1 BREVE ENQUADRAMENTO

A drenagem urbana tem sido considerada, dependendo do contexto histórico e da localização geográfica, como um mecanismo de limpeza conveniente, um meio eficiente de transporte de resíduos, uma forma de prevenir inundações ou, quando mal realizada ou inexistente, uma fonte de incómodos e uma potencial forma de transmissão de doenças. Foram vários os fatores que em geral influenciaram a drenagem urbana tais como o clima, a topografia, a geologia, o conhecimento científico à época, as capacidades de engenharia e de processos construtivos, os valores da sociedade e até mesmo as crenças religiosas. Desde que os humanos começaram a construir cidades, todos estes fatores orientaram e restringiram o desenvolvimento de soluções de drenagem urbana.

Nos últimos 150 anos observou-se um progresso enorme nesta área motivado essencialmente pelos problemas e desafios criados pela crescente densidade populacional e aumento da pressão sentida sobre as zonas urbanas, fatores que estiveram no passado associados ao agravamento geral e extremo das condições ambientais e de salubridade, em particular da qualidade de água nos meios recetores e que, ao modificarem o funcionamento do ciclo hidrológico sobretudo no que diz respeito ao aumento do escoamento superficial nestas áreas, também contribuíram para a ocorrência de um outro fenómeno com potenciais prejuízos para as populações, as inundações.

Ao longo do presente capítulo será feito um enquadramento geral acerca dos sistemas de drenagem pluvial urbana, dos seus tipos e do que motivou a sua conceção e evolução. Serão abordadas vantagens e desvantagens de diferentes tipos de sistemas e por último será feito uma síntese dos efeitos, previstos para um futuro próximo, que as alterações climáticas poderão causar.

2.2 RESENHA HISTÓRICA DA DRENAGEM URBANA

Existem vestígios de várias técnicas de drenagem urbana interessantes e exclusivas em diferentes civilizações antigas, como por exemplo, na Egípcia, Persa ou do Vale do Indo (Burian e Edwards, 2002). No entanto, foi durante a época do Império Romano que, em toda a Europa e Ásia Ocidental, se deu a introdução de avanços tecnológicos significativos na área da drenagem urbana. Entre outros feitos da engenharia deve-se salientar a construção de um sistema de estradas e vias cuidadosamente planeado com superfícies adequadamente drenadas, a construção de grandes coletores subterrâneos ligados para

formar uma intrincada rede de saneamento e de drenagem urbana, como por exemplo, a Cloaca Máxima, em Roma (Hill, 1984).

Após a queda do Império Romano, grande parte das cidades europeias entrou em declínio e, em consequência, os sistemas de drenagem deterioraram-se. Durante este período praticamente não existiram avanços tecnológicos. A perspetiva pública predominante acerca da drenagem urbana era a de que se tratava de um serviço desnecessário (Burian e Edwards, 2002). Os sistemas de drenagem implantados na Europa regrediram até às técnicas utilizadas no período pré-romano, consistindo em simples valas abertas com traçado muitas vezes coincidente com linhas de água naturais ou também, comumente, direcionado ao longo do eixo das estradas (Kirby e Laurson, 1932) destinando-se principalmente a conduzir o escoamento de águas pluviais. No entanto, os canais abertos, também, se afiguravam como uma forma conveniente para a população se desfazer dos resíduos doméstico. Neste caso, se o fluxo nas valas fosse suficiente, os resíduos acumulados eram transportados até ao meio recetor, em caso contrário ficariam acumulados, criando condições propícias à insalubridade e à propagação de pragas e de doenças (Burian e Edwards, 2002).

No caso de Portugal, e Lisboa em particular, a partir do século XV, surgiu uma política de saneamento urbano e salubridade pública impulsionada pela falta de infraestruturas. O ano de 1486 parece marcar a conceção do primeiro sistema coerente e hierarquizado de saneamento. Esta rede materializou-se ao longo das primeiras décadas do século XVI, no âmbito do programa global de renovação de Lisboa empreendido por D. Manuel I. Este movimento iniciado em Lisboa rapidamente se expandiu pelo Reino e pelos espaços além-mar (Bugalhão e Teixeira, 2015). Posteriormente, com a destruição decorrente do sismo de 1755, e integrado no plano de reconstrução da cidade, investiu-se na criação de infraestruturas de drenagem urbana, nomeadamente na construção de coletores unitários dispostos em malha, e que descarregam no estuário do Tejo. No entanto, só mais tarde, durante o século XIX, é que a opinião pública acerca da drenagem urbana mudou deixando esta de ser considerada como algo insignificante e muitas vezes esquecido para se transformar num serviço essencial. Esta mudança de paradigma foi impulsionada por muitos fatores, sendo o mais importante provavelmente o reconhecimento científico da correlação entre diversas doenças infecciosas e a inexistência de sistemas de abastecimento e de saneamento de águas residuais e pluviais, capazes de garantir o acesso a água potável e condições mínimas de higiene à população, a par da observação de elevadas taxas de mortalidade e morbidade, nomeadamente infantil. Um pouco por toda a Europa e, também, nos Estados Unidos da América, os líderes municipais, deram início a projetos massivos de construção de sistemas de esgotos abrangentes nas maiores cidades. A maioria dos sistemas construídos até essa data não foi planeada ou projetada com recurso a cálculos numéricos, mas sim através de processos empíricos, que através de um processo de

tentativa-e-erro acabavam por produzir resultados. Foi fruto dos avanços científicos da época que se passou a incorporar as opiniões de especialistas técnicos na conceção dos projetos, como ocorreu, por exemplo, no caso do projeto do sistema de saneamento de Hamburgo (Matos, 2003).

Os contornos essenciais das políticas públicas de abastecimento e saneamento de águas modernas, em Portugal, começam a definir-se um pouco mais tarde em finais do século XIX. O processo de infraestruturação de aglomerados habitacionais com sistemas de abastecimento de água e de esgotos, tentou seguir os preceitos técnicos mais avançados que vinham sendo implementados em algumas cidades europeias e norte-americanas (Pato, 2011). Durante a segunda metade do século XIX, os métodos de projeto de esgoto foram otimizados com o desenvolvimento inicial do Método Racional. Mulvaney (1851) na Irlanda, Kuichling (1889) nos Estados Unidos e Lloyd-Davies (1906) na Grã-Bretanha escreveram sobre a prática de cálculos de escoamento e dimensionamento de tubagens de esgoto e contribuíram com conceitos como o tempo de concentração que posteriormente evoluiu para o atual Método Racional. No mesmo período em que esses engenheiros desenvolviam os fundamentos deste método, a perspetiva da drenagem urbana continuava em mudança à medida que se dava cada vez maior importância ao tratamento das águas residuais depois de surgirem vários problemas de saúde pública relacionados com descargas poluentes ou tóxicas nos meios recetores. Apesar disso o tratamento de águas residuais foi limitado na Europa e nos Estados Unidos durante a primeira parte do século XX, mesmo depois da comunidade científica provar a ligação entre descargas de águas não tratadas e a transmissão de doenças. Foram atingidos vários avanços na área da drenagem urbana nas primeiras décadas do século XX. Os engenheiros continuaram a melhorar conceitos e métodos de projeto e também foram promulgados os primeiros elementos legislativos tanto na Europa como nos Estados Unidos da América. Foram ainda feitos extensos esforços de monitorização destes sistemas, o que melhorou bastante a compreensão acerca do seu funcionamento e qualidade. Mais tarde, com o surgimento de ferramentas de modelação computadorizadas, assistiu-se a extraordinários avanços nos métodos utilizados para projetar e analisar sistemas de drenagem urbana (Burian e Edwards, 2002).

Nas últimas décadas, Portugal sofreu uma profunda reestruturação e modernização dos serviços, desde o reforço da infraestruturação, à empresarialização do sector e à introdução da regulação. Estes aspetos, juntamente com a disponibilidade de financiamento da União Europeia, e o esforço de centenas de entidades gestoras e de profissionais técnicos, propiciaram o desenvolvimento neste sector e uma significativa melhoria da prestação dos serviços de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais à população do País, tanto a nível da cobertura como na qualidade dos serviços prestados, mesmo que esta não tenha sido historicamente a realidade do País (Pato, 2011). Alguns fatores, tais como, legislação específica, monitorização, modelação computadorizada e ainda as preocupações

ambientais, vieram mais uma vez alterar a perspectiva da drenagem urbana para passar a incluir nos seus objetivos, para além das preocupações com a saúde pública e com os efeitos das inundações, a proteção de ecossistemas, a sustentabilidade urbana, (Burian e Edwards, 2002) e a sua resiliência face às alterações climáticas.

2.3 SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA

2.3.1 TIPOS DE SISTEMAS

De acordo com o estipulado pelo Artigo 116º do Decerto-Regulamentar n.º 23/95, de 23 de agosto, os sistemas de drenagem pública de águas residuais e pluviais podem ser classificados em sistemas:

- a) Separativos, constituídos por duas redes de coletores distintas, uma destinada às águas residuais domésticas e industriais e outra à drenagem das águas pluviais ou similares;
- b) Unitários, constituídos por uma única rede de coletores onde são admitidas conjuntamente as águas residuais domésticas, industriais e pluviais;
- c) Mistos, constituídos pela conjugação dos dois tipos anteriores, em que parte da rede de coletores funciona como sistema unitário e a restante como sistema separativo;
- d) Separativos parciais ou pseudo-separativos, em que se admite, em condições excepcionais, a ligação de águas pluviais de pátios interiores ao coletor de águas residuais domésticas.

Segundo Butler e Davies (2004), os sistemas unitários e separativos tanto apresentam vantagens como desvantagens, as quais são apresentadas nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos sistemas unitários

Vantagens	Desvantagens
Menor custo inicial	Descargas sem tratamento em caso de chuvadas intensas
Menor espaço de implantação necessário	Necessita de ETAR com maior capacidade
Drenagem doméstica mais simples e económica	Eventuais custos superiores com bombagem
Tratamento de parte da drenagem pluvial	Grande variabilidade do regime de escoamento

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos sistemas separativos

Vantagens	Desvantagens
Menor poluição do meio recetor em caso de chuvadas intensas	Mais dispendioso
Necessidade de ETAR com menor capacidade	Mais espaço requerido
Bombagem de água pluvial apenas se necessário	Risco de ligações indevidas
Escoamento em condições hidráulicas adequadas	Água pluvial sem qualquer tipo de tratamento

2.3.2 SISTEMAS CONVENCIONAIS

Os sistemas convencionais de drenagem de águas pluviais têm como objetivo principal encaminhar a água precipitada o mais rápido possível para o meio recetor, para fora do meio urbano. Esses sistemas são constituídos essencialmente pela rede de coletores e órgãos acessórios, podendo dispor ainda de órgãos especiais e outras instalações complementares. A rede de coletores é o conjunto das tubagens que transporta o caudal pluvial afluyente, desde os dispositivos de entrada até ao meio recetor, ou destino final. Em geral, são constituídos por coletores de betão de secção circular. Consideram-se órgãos acessórios os dispositivos de entrada, como sarjetas de passeio ou sumidouros, e as câmaras ou caixas de visita, destinadas a possibilitar o acesso, para observação e ações de limpeza, aos coletores. Entre os órgãos especiais e instalações complementares encontram-se os desarenadores, destinados a provocar a deposição de materiais incoerentes transportados nas águas pluviais; as bacias de retenção, destinadas a regularizar os caudais pluviais afluentes; câmaras drenantes, destinadas à retenção e infiltração das águas pluviais e as instalações elevatórias que devem ser evitadas devido aos custos acrescidos para manter o seu funcionamento e à grande variabilidade do escoamento nestes sistemas.

Nas áreas impermeáveis, como por exemplo, telhados, pátios e valetas de arruamentos, o escoamento das águas pluviais é inicialmente realizado à superfície, contudo rapidamente passa para os coletores subterrâneos, através das sarjetas e sumidouros, onde flui até ser devolvido aos cursos naturais de água. Este tipo de abordagem na conceção de sistemas de drenagem de águas pluviais é baseado na prioridade de escoar a água o mais rapidamente possível, sem considerar os possíveis impactos a jusante, como por exemplo, a falta de capacidade dos sistemas de jusante em lidar com maiores volumes de água, e consequentes inundações, ou a poluição que é transportada pelos escoamentos superficiais e que é descarregada nos cursos de água, afetando a qualidade da água e destruindo ecossistemas. Devido ao crescimento da urbanização, e aos problemas supramencionados, esta abordagem está a ser, atualmente, trocada por soluções e técnicas mais sustentáveis (Pinto e Pinheiro, 2006).

2.3.3 SISTEMAS NÃO CONVENCIONAIS

As estratégias utilizadas para resolver problemas de drenagem urbana estiveram, durante anos, voltadas para o rápido encaminhamento das águas pluviais para o meio recetor mais próximo, com consequências ambientais relevantes como o aumento da velocidade de escoamento e a transferência dos fenómenos de inundação para jusante, a eliminação de ecossistemas aquáticos, a aceleração dos processos erosivos nas margens dos cursos de água para além dos problemas derivados dos poluentes arrastados pelo escoamento superficial. Atualmente, as técnicas de drenagem pluvial urbana apontam na direção da preservação dos cursos de água, na sua despoluição e na manutenção das várzeas de inundação, de forma a minimizar a necessidade de obras estruturantes, conseguindo-se assim reduzir os custos de implantação e os problemas provocados pelas mesmas e ainda explorando o seu potencial urbanístico como áreas verdes e parques (Pinto e Pinheiro, 2006).

Enquanto a abordagem tradicional, tem como objetivo remover as águas pluviais de uma área definida, uma abordagem mais sustentável tenta identificar soluções que produzam benefícios sociais, económicos e ambientais ao mesmo tempo que são minimizados quaisquer impactos negativos. (David, 2003) A gestão das águas pluviais nesta perspetiva privilegia esforços no sentido de corrigir problemas existentes nos sistemas de drenagem tais como separar progressivamente águas pluviais de efluentes domésticos e industriais ou reduzir as descargas de efluentes poluentes do meio recetor. Tenta também implementar soluções locais que visam restabelecer o ciclo hidrológico natural, reduzindo as aflúncias aos sistemas de coletores, integrar a gestão das águas urbanas nos instrumentos de ordenamento do território e ainda melhorar a qualidade das infraestruturas para minimizar a infiltração de águas pluviais nas redes de águas residuais ou a exfiltração das águas residuais das respetivas redes (Pinto e Pinheiro, 2006)

A gestão sustentável das águas pluviais urbanas deve considerar as bacias hidrográficas nas quais a urbanização se estende e assim sendo os sistemas de drenagem não devem transferir os impactos para jusante, reduzindo impactos numa área em detrimento de outra (Pinto e Pinheiro, 2006; Matos, 2003). Deve promover-se o amortecimento e reutilização das águas pluviais e para tal devem ser privilegiados os espaços verdes que permitam a infiltração da água e conseqüente minimização do escoamento superficial, o que faz com que sejam desnecessárias medidas estruturais a jusante. Por outro lado, na conceção dos sistemas de drenagem deve ter-se em conta o horizonte de expansão da urbanização, através da gestão integrada das águas pluviais e planeamento do território, e não só as áreas urbanizadas no momento. Desta forma consegue-se mitigar efeitos da impermeabilização de superfícies a montante nos sistemas, evitando a criação de escoamento adicional que poderia causar inundações a jusante. (Chocat *et al.*, 2001)

A drenagem urbana sustentável, atribui importância à manutenção e recuperação de ambientes saudáveis tanto nas áreas urbanas como fora delas, usando técnicas apropriadas para cada situação sem ficar limitada ao uso das técnicas convencionais. As soluções não convencionais para a gestão das águas pluviais podem ter como vantagens o controlo de inundações, ao utilizar técnicas que promovem o amortecimento e a infiltração das águas pluviais reduzindo assim o volume de escoamento e o pico de cheia; o controlo da poluição, uma vez que ao adotar soluções que promovam a infiltração da precipitação o próprio solo acaba por funcionar como filtro através do processo de percolação; a proteção contra fenómenos erosivos uma vez que o uso de soluções mais sustentáveis que reduzem os volumes de cheia e a velocidade do escoamento evitando assim o risco de erosão e sedimentação e protegendo os ecossistemas mais frágeis nos cursos de água; Pode ainda ser uma fonte alternativa de água, coletada e reutilizada diretamente para usos não potáveis ou, após tratamento, para uso potável em locais onde a água doce é escassa reduzindo a dependência das fontes de água superficiais e subterrâneas. As soluções de infiltração das águas pluviais contribuem também para a recarga dos aquíferos, que podem ser uma importante fonte de água doce para o consumo humano; a valorização ambiental e recreativa, através da criação de bacias de retenção e outras soluções que envolvam planos de infiltração, e que vão contribuir para a preservação da biodiversidade ao mesmo tempo que propiciam novas alternativas de recreação e lazer; A adaptação às mudanças climática uma vez que uma abordagem sustentável na conceção de sistemas de drenagem, considerando soluções de infiltração para amortecimento do escoamento, proporciona uma maior capacidade para lidar com eventos extremos de pluviosidade; E por fim, maior economia visto que soluções que não envolvam a construção de infraestruturas tradicionais de drenagem, resultam em custos de construção e exploração menores e por outro lado, a separação de águas pluviais e esgotos domésticos ou industriais, permite a redução de custos com o tratamento de água, já que as águas pluviais podem ser tratadas por processos naturais ao não serem adicionadas aos caudais de águas residuais (Chocat *et al.*, 2001).

2.4 IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NA DRENAGEM URBANA

Atualmente, mais de metade da população mundial vive em regiões urbanas e este número continua a aumentar (Revi *et al.*, 2014) conseqüentemente, têm-se verificado efeitos nos sistemas de saneamento básico e, em particular, nos sistemas de drenagem de águas pluviais. O escoamento superficial sofre alterações significativas em meio urbano, que obriga a que o processo de urbanização seja acompanhado da criação de novos sistemas de drenagem de águas pluviais eficazes no controlo e encaminhamento das águas superficiais, ou pela análise e reabilitação dos sistemas existentes. A drenagem urbana, para além de uma necessidade, deve ser encarada como uma prioridade, visto que está

diretamente ligada com fatores como a qualidade de vida e segurança de pessoas e bens materiais.

A implantação de edifícios, vias de comunicação e outros elementos do meio urbano provocam uma maior impermeabilização dos terrenos, impedindo a água pluvial de se infiltrar no solo, o que provoca um aumento do volume escoado superficialmente, bem como da sua velocidade, e do caudal de ponta de cheia e, conseqüentemente uma maior frequência, e dimensão, de inundações. Para além, disso ocorre a conseqüente diminuição no tempo de concentração da bacia hidrográfica. De facto, este fenómeno tem-se verificado na maioria das cidades, onde o deficiente ordenamento do território, com ocupação das zonas ribeirinhas e a cota reduzida, também propicia situações de cheias (Lima *et al.*, 2013). Na Figura 1 pode ser vista a comparação dos hidrogramas de resposta de uma bacia hidrográfica antes e depois de esta ser urbanizada.

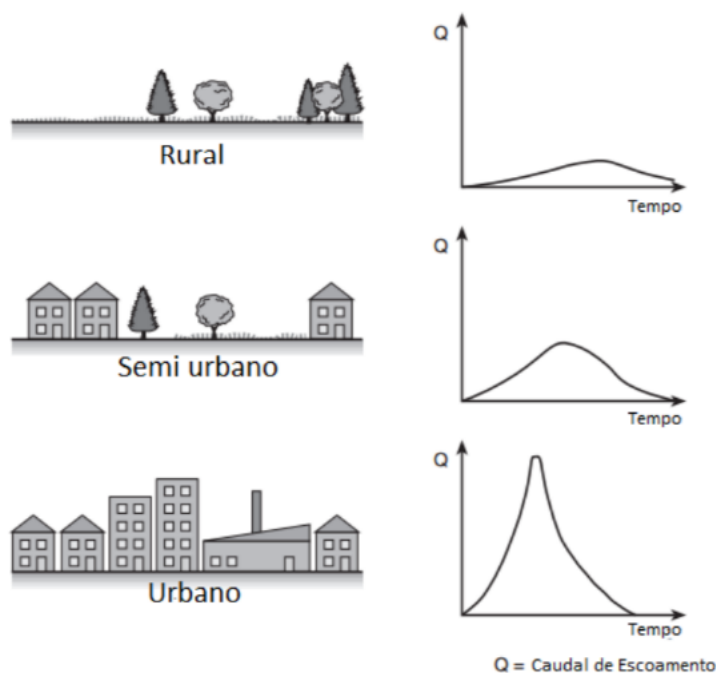


Figura 1 – Comparação entre hidrograma rural, semirrural e urbano (Adaptado de Butler e Davies, 2004)

A par com o aumento de caudais, surge o aumento de sedimentos e resíduos em suspensão, que podem provocar a deterioração da qualidade da água nos meios recetores. Por este motivo, as práticas de projeto e gestão destas infraestruturas deverão dar cada vez maior importância a encontrar soluções que promovam não só a segurança de pessoas e bens materiais, mas também a sustentabilidade técnica, económica e ambiental destes sistemas (Butler *et al.*, 2004).

2.5 IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA DRENAGEM URBANA

O conceito de alteração climática, refere-se a uma mudança no estado do clima que pode ser identificada e quantificada utilizando por exemplo dados estatísticos, e que persiste por um período de pelo menos algumas décadas (IPCC, 2013).

As alterações climáticas podem ter causa naturais, como por exemplo a atividade vulcânica, ou causas antropogénicas, onde se enquadram as alterações derivadas da mudança da composição da atmosfera, sendo que esta é a forma mais impactante pela qual os seres humanos estão a afetar o clima à escala global. As alterações climáticas, são resultado de emissões causadas por diversas atividades humanas tais como a queima de combustíveis fósseis para produção de eletricidade, para transporte, na indústria e em atividades comerciais e residenciais, pela desflorestação, pelas práticas agrícolas entre outras. O dióxido de carbono (CO₂) foi identificado como sendo o gás com efeito de estufa antropogénico com maior impacto no fenómeno de aquecimento global e a sua concentração atual na atmosfera é de cerca de 400 ppm. De referir que este é o nível mais elevado nos últimos 800.000 anos e superior em cerca de 40% aos níveis do período pré-industrial, ou seja, século XVIII (Dunn *et al.*, 2020).

Mesmo que as emissões de CO₂ e de outros gases com efeito estufa num futuro próximo baixassem para zero a sua concentração, o tempo de residência atmosférica destes gases e a dinâmica do sistema climático levariam a que as mudanças climáticas causadas pelo efeito da atividade humana continuassem a ocorrer durante várias décadas ou séculos (EEA, 2017). Como consequência, haveria aumento das temperaturas e da frequência de eventos climáticos extremos como ondas de calor, mudanças nos padrões de precipitação e secas ou a subida do nível médio do mar.

Cada uma das últimas três décadas tem sido sucessivamente mais quente à superfície da terra do que qualquer outra década precedente desde 1850, época em se iniciaram os registos destes parâmetros. No hemisfério norte o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climática (IPCC) considera, com moderada confiança, que o período entre 1983 e 2012 foi provavelmente o mais quente dos últimos 1400 anos.

Também os oceanos estão a tornar-se mais quentes, sendo que o seu aquecimento domina o aumento de energia armazenada no sistema climático global perfazendo mais de 90% da energia acumulada entre 1971-2010 (IPCC, 2013). O facto desta energia ficar acumulada na gigantesca massa de água tem, até certo ponto, camuflado o impacto que a atividade humana tem no clima. No entanto, existem dados que comprovam que entre 1971-2010 as camadas superficiais (0-700m) do oceano também estão mais quentes.

Com as constatações anteriores torna-se fácil compreender outros fenómenos que ocorrem ao nível global, nomeadamente o derretimento das calotes polares, que estão a perder massa de gelo ao longo das últimas décadas, a diminuição de extensão de gelo no mar Ártico e da cobertura de neve na primavera no hemisfério norte. Como consequência, constata-se que a razão do aumento do nível médio da água do mar desde a segunda metade do século XIX se apresenta superior à média para os últimos dois mil anos e que, para o período compreendido entre 1901 e 2010, esta subida foi de cerca de 0,19m (IPCC, 2013).

Para avaliar o impacto das alterações climáticas nos sistemas de drenagem pluvial importa compreender quais são as alterações que estão a ocorrer ao nível da precipitação. Relativamente à precipitação anual, desde 1960 que se observa uma tendência de aumento no norte da Europa, e uma diminuição deste valor nas regiões do Sul. A tendência é semelhante quando se observam a precipitação média de Verão aumentando nas zonas do norte da Europa e diminuindo a sul, conforme observado na Figura 2.

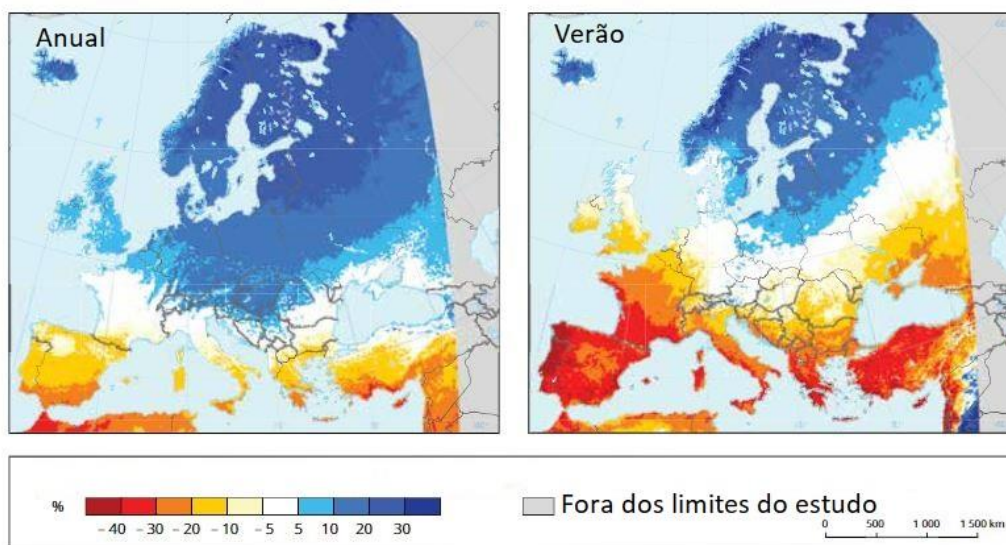


Figura 2 – Alterações projetadas, em percentagem (%), na precipitação anual à esquerda e de verão à direita para o período de 2071–2100 (Adaptado de EEA, 2017)

Para além das alterações supramencionadas na precipitação anual e de verão, prevê-se que o aquecimento global leve a que ocorram eventos de precipitação com uma maior intensidade e que os períodos de seca se tornem mais longos em partes da Europa (IPCC, 2013). Tal como a Figura 3 indica, projeta-se um aumento da precipitação máxima diária na Europa, no inverno, que poderá ser de até 35% em algumas zonas do norte da Europa durante o século XXI (EEA, 2017).

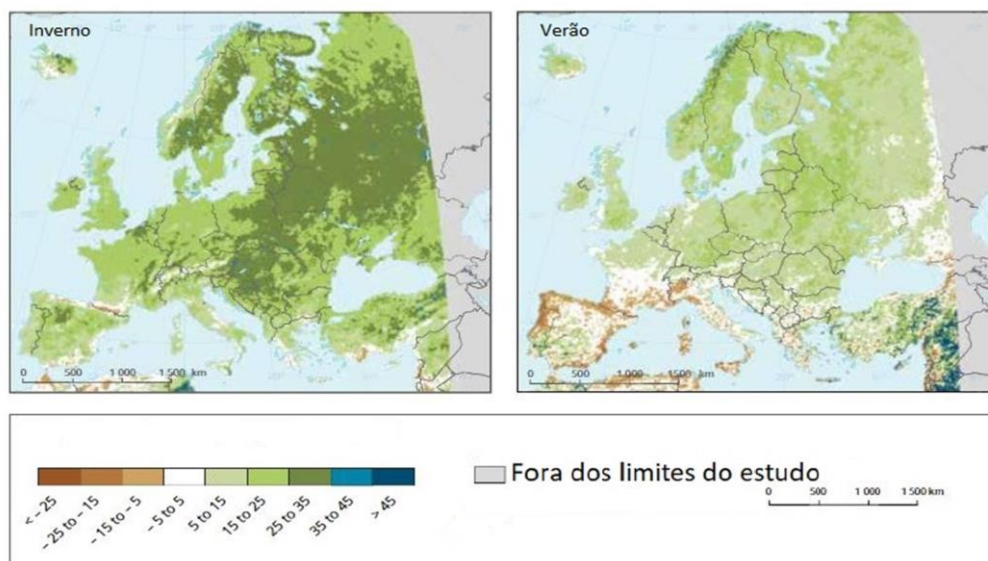


Figura 3 - Alterações projetadas de precipitações intensas para o Inverno e Verão no período de 2071-2100(Adaptado de EEA, 2017)

Estas últimas alterações nos padrões de precipitação, nomeadamente o aumento de intensidade de eventos extremos de precipitação, serão aquelas que maior impacto terão nos sistemas de drenagem urbana tornando-os mais suscetíveis a sofrer de inundações caso não sejam tomadas medidas preventivas no sentido de capacitar o sistema para lidar com o acréscimo de caudal escoado. Importa também referir que, dependendo da localização geográfica onde o sistema de drenagem urbana se insere, também será relevante avaliar, particularmente em zonas costeiras ou a cotas reduzidas, a influência da subida do nível do mar, uma vez que esta subida poderá comprometer a capacidade de vazão dos sistemas quando ocorrem em simultâneo fenómenos de precipitação extremos, preia-mar astronómica e marés de tempestade.

3. METODOLOGIA

3.1 BREVE ENQUADRAMENTO

No presente capítulo aborda-se a metodologia seguida na realização da avaliação do impacto das alterações climáticas na bacia de drenagem do Lavradio, passando pela recolha de toda a informação necessária para o trabalho. A complexidade dos processos envolvidos cria a necessidade de recorrer a um modelo de simulação hidrológica e hidráulica de forma a representar o comportamento do sistema de drenagem perante cenários baseados nas projeções de alterações climáticas que ocorrerão no futuro próximo. O modelo criado será posteriormente utilizado como base para a avaliação e estudo de soluções de adaptação, de forma a garantir que o sistema de drenagem satisfaça os requisitos para os quais está a ser avaliado.

3.2 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NO SISTEMA DE DRENAGEM PLUVIAL

3.2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A análise das condições climáticas, tais como a temperatura, dados de precipitação e humidade do ar, fisiográficas, ligadas às características físicas da bacia hidrográfica como o relevo, inclinação, tipos de solo e sua ocupação, e da rede de drenagem, tais como órgão constituintes e materiais utilizados, serão a base para a avaliação do sistema de drenagem pluvial urbana. As bacias hidrográficas devem ser consideradas unidades de análise para o projeto de sistemas de drenagem pluvial urbana. Assim sendo importa primeiramente caracterizar a bacia hidrográfica e o sistema de drenagem existente recolhendo para esse efeito toda a informação necessária.

3.2.2 DADOS DE CADASTRO

O cadastro de infraestruturas consiste essencialmente na representação gráfica digital de informações obtidas por meio de levantamentos no terreno de todos os componentes do sistema de drenagem pluvial urbana. A identificação, localização, dimensão, forma, profundidade, estado de conservação e materiais constituintes são algumas das informações mais pertinentes que poderão estar associadas ao cadastro de um sistema. De referir que as Entidades Gestoras (EG) dos sistemas de drenagem urbana possuem frequentemente esta informação seja na forma de peças escritas e desenhadas em papel ou em meios digitais, tais como, Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e/ou Desenho Assistido por Computador (CAD).

3.2.3 DADOS HIDRÁULICOS

Caracteriza-se o escoamento que ocorre no sistema de drenagem de águas pluviais pelas alturas de escoamento, ou carga piezométrica, que deve estar abaixo do nível de inundação ou transbordamento, e também pela velocidade do escoamento que deverá ser de tal ordem que evite a ocorrência, por um lado, processos de sedimentação nos canais e nas tubagens quando a velocidade é demasiado baixa, e por outro, a erosão precoce dos mesmos quando a velocidade é demasiado elevada (Batista e Boldrin, 2018).

Importa recolher todos os dados que vão influenciar tanto a altura de escoamento como a sua velocidade. Nomeadamente, informações acerca da geometria das secções das tubagens, valas ou canais, bem como os coeficientes de rugosidade associados a um determinado material constituinte. Para além dessas características importa ainda conhecer a inclinação das tubagens, valas e canais que compõem o sistema de drenagem pluvial.

3.2.4 DADOS HIDROLÓGICOS

Os fenómenos hidrológicos são extremamente complexos, no entanto, na ausência do conhecimento perfeito acerca deles, podem ser representados de uma forma simplificada (Chow, *et al.*, 1988) De forma a realizar a caracterização hidrológica de um sistema de drenagem de águas pluviais é necessário avaliar o comportamento do escoamento superficial, sendo que a principal grandeza que o caracteriza é a precipitação útil, ou seja aquela que, depois de ocorrerem os processos de evaporação, infiltração e retenção ou detenção superficial na bacia, atinge a rede hidrográfica. De forma a estimar o valor da precipitação útil importa recolher dados relativos à ocupação do solo para possibilitar a determinação da impermeabilização, que vai influenciar o escoamento superficial gerado. Este processo pode ser realizado através de um levantamento visual a partir de imagens de satélite com vista a identificar e quantificar as percentagens de áreas com maior (e.g., jardins, parques, hortas) e com menor (e.g., vias de comunicação, edifícios, parques de estacionamento, pavimentos) permeabilidade. Importa também definir a chuvada de projeto e para tal será criado um hietograma de projeto conforme descrito em (Chow, *et al.*, 1988) e (Portela, *et al.*, 2000). Utilizar-se-á como base as curvas Intensidade- Duração-Frequência (IDF), para a região em estudo, e para um período de retorno pré-estabelecido. Esta metodologia considera-se adequada para o estudo de bacias pequenas. O tempo de concentração da bacia hidrográfica, que irá ter influência na duração total do evento de precipitação de projeto, poderá ser calculado com base nas expressões desenvolvidas pelo Soil Conservation Service (SCS), (Correia, 1984)(Temez, 1978) de forma a encontrar o valor mais desfavorável a utilizar. Segundo Portela, *et al.*(2000) pode-se, igualar o tempo de concentração ao tempo de duração do evento de precipitação, chegar a valores de caudal de ponta mais baixos do que os que realmente se verificam, sendo portanto recomendada a

utilização de um evento com duração três vezes superior ao tempo de concentração da bacia de forma a obter um caudal de cheia pelo lado da segurança. O último passo para a definição do hietograma de projeto passará pela distribuição temporal da intensidade de precipitação ao longo do tempo de duração do evento. Um dos padrões de reorganização dos sucessivos incrementos de precipitação referidos na bibliografia é designado por padrão de blocos alternados e admite que a maior quantidade de precipitação no incremento de tempo considerado, ocorre sensivelmente a meio da duração do acontecimento pluviométrico. As restantes parcelas de precipitação são ordenadas por ordem decrescente e dispostas sequencialmente e de modo alternado em torno daquele bloco central. (Portela, *et al.*, 2000)

3.2.5 DADOS TOPOGRÁFICOS DA ÁREA DE IMPLANTAÇÃO DA BACIA E VALA EM ESTUDO

No estudo de um sistema com uma bacia de retenção existente é necessário definir a sua capacidade de armazenamento, e respetiva curva de vazão. Torna-se, portanto, essencial ter conhecimento das características topográficas desta área do sistema de drenagem pluvial em particular. Para tal, devem ser consultadas peças escritas e desenhos de projeto caso estes sejam disponibilizados, e onde seja possível constatar as cotas de entrada e de saída na bacia bem como toda a restante informação relativa à geometria e área de implantação. Essa informação poderia ainda ser complementada com maior detalhe e rigor considerando um levantamento visual do local e a um levantamento topográfico realizado com recurso a um veículo aéreo não tripulado (i.e., drone).

3.2.6 CENÁRIOS FUTUROS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Para avaliar o impacto das alterações climáticas é comum a utilização do conceito de cenários climáticos que segundo o Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas – IPCC – não são mais do que representações plausíveis, e muitas vezes simplificadas do clima futuro, utilizadas para investigar as potenciais consequências das alterações climáticas antropogénicas (IPCC, 2013). De referir que não sendo nem prognósticos nem previsões do futuro, são úteis para fornecer uma visão das implicações dos desenvolvimentos e das ações, servindo muitas vezes como entrada para modelos de impacto. Ainda segundo o IPCC (2013) os Cenários RCP (Representative Concentration Pathways) referem-se à porção dos patamares de concentração de CO₂ que se prolongam até 2100, para os quais os modelos de avaliação integrada produzem cenários de emissões de CO₂ correspondentes. Sendo, por exemplo, o RCP 4.5 um patamar de estabilização de emissões intermédio e o RCP 8.5 um patamar elevado, que assume que o nível de emissões aumenta de forma superior.

No presente trabalho será utilizada uma abordagem do tipo *top-down* onde as previsões de cenários do clima futuro global são utilizadas em conjunto com a modelação do sistema de drenagem para determinar o desempenho do sistema.

A avaliação do impacto das alterações climáticas no sistema de drenagem pluvial, será conseguida, mais concretamente, através da adaptação do hietograma de projeto aos vários cenários futuros. Para tal,recolher-se-á informação relativa às projeções climáticas para a zona em estudo, nomeadamente estimativas da variação da intensidade de precipitação, visto que este parâmetro terá uma influência direta no funcionamento do sistemas de drenagem pluvial, ao estar intrinsecamente ligado com a quantidade de água que a este aflui. Também será pertinente, particularmente em zonas costeiras, analisar o impacto que a subida do nível do mar terá no desempenho do sistema de drenagem pluvial.

3.3 MODELAÇÃO HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA

3.3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A utilização de modelos hidráulicos e hidrológicos de drenagem urbana é comum na investigação e na reabilitação ou exploração de sistemas complexos de drenagem de águas pluviais existindo vários programas que permitem a criação dos mesmos como o InfoWorks ou o MOUSE. Contudo estes têm associados custos elevados com licenças e formação, o que tem limitado a utilização generalizada deste tipo de programas. Como alternativa apresenta-se o SWMM que tem como grandes vantagens ser de distribuição gratuita e possuir diversos recursos disponíveis, como formação e tutoriais, online e assim acabar por ser de fácil utilização e acessível a entidades gestoras de menor dimensão, consultores, universidades e estudantes. Também a possibilidade de constituir uma ferramenta comum a diversas entidades na gestão de sistemas de drenagem urbana poderá promover a sua utilização, à semelhança daquilo que aconteceu com o programa EPANET, neste caso para os sistemas de abastecimento de água. (Cambez, *et al.*, 2008)

O SWMM é usado para a avaliação de eventos únicos ou em simulações de longo prazo da quantidade e qualidade do escoamento de água em áreas principalmente urbanas, embora também haja muitas aplicações que podem ser usadas para sistemas de drenagem em áreas rurais. Este *software* fornece um ambiente integrado para edição de dados de entrada da área de estudo, para a execução de simulações hidrológicas, hidráulicas e de qualidade da água e permite a visualização dos resultados em variados formatos. Isso inclui mapas de áreas de drenagem e condutas com códigos de cores, gráficos e tabelas de séries temporais, gráficos de perfil e análises estatísticas de frequência. O SWMM contém um conjunto flexível de recursos de modelação hidráulica usados para encaminhar escoamento e afluições através da rede do sistema de drenagem de tubagens, canais, unidades de

armazenamento ou tratamento e estruturas de desvio. Isso inclui a capacidade de realizar diversas operações, tais como:

- Modelação de redes de drenagem de tamanho ilimitado com grande variedade de formas de tubagens padrão, fechadas e abertas, bem como canais naturais.
- Modelação de elementos especiais, como unidades de armazenamento / tratamento, divisores de caudal, bombas, barragens e orifícios.
- Aplicação de afluências e entradas de qualidade de água de escoamento superficial, infiltração de água subterrânea, afluências dependentes da chuva, caudal em tempo seco e afluências definidas pelo utilizador.

3.3.2 PROCESSOS HIDROLÓGICOS

As sub-bacias, constituintes da bacia hidrológica em estudo, podem ser divididas em áreas impermeáveis e permeáveis. Nas áreas impermeáveis as perdas hidrológicas são apenas atribuídas à retenção superficial, enquanto nas áreas permeáveis também é possível modelar a infiltração, através dos modelos de Horton, de Green-Ampt ou do SCS. Em ambos os tipos de área, o escoamento superficial é propagado pela equação de Manning. O SWMM permite a descrição de outras características e processos na área de estudo, para aplicações mais específicas, designadamente as relacionadas com o escoamento sub-superficial, as águas subterrâneas nos aquíferos e a queda de neve e degelo (Cambez, *et al.*, 2008) embora estas últimas aplicações não sejam utilizadas no âmbito deste trabalho.

3.3.3 PROPAGAÇÃO DE ESCOAMENTO

A propagação do escoamento em canais e coletores é modelada pelas equações de conservação de massa e de quantidade de movimento (equações de Saint-Venant), para escoamentos permanentes gradualmente variados. É dada ao utilizador a decisão do nível de simplificação das equações a utilizar, designadamente entre: o modelo em regime permanente, o modelo da onda cinemática, e o modelo da onda dinâmica (Cambez, *et al.*, 2008).

3.3.4 SIMULAÇÃO DE DIFERENTES CENÁRIOS DE EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO EXTREMOS NO SWMM

O SWMM inclui uma extensão (*plug-in*) que permite incorporar na modelação de sistemas de drenagem pluvial projeções futuras de mudanças climáticas. A ferramenta de ajuste do clima, SWMM-CAT, fornece um conjunto de fatores de ajuste específicos, derivados dos modelos de mudanças climáticas globais do Programa Mundial de Pesquisa Climática, para

cada local para desta forma representar o impacto potencial das alterações climáticas futuras (Rossman, 2007).

Contudo, uma outra forma expedita para a criação dos diferentes cenários de precipitação extremos no SWMM, passa pela adaptação do hietograma de projeto obtido através das curvas IDF para a situação de projeto atual, considerando as projeções de variação da intensidade de precipitação para os cenários RCP.

3.3.5 MODELAÇÃO DA BACIA DE RETENÇÃO

O SWMM não permite a criação de bacias de retenção de uma forma direta e por este motivo torna-se necessário adaptar elementos existentes no software. Pode-se para tal começar por realizar a medição estimada da capacidade de armazenamento da bacia de retenção definindo-se intervalos de cotas correspondente à capacidade deste órgão, e associando a cada um a área correspondente de superfície de água. Criando-se assim uma curva de armazenamento, passível de ser inserida no modelo criado no SWMM quando associada a um nó de armazenamento localizado na zona da secção de referência e que simulará o corpo da bacia de retenção. Pode-se modelar, também simplificada, os dispositivos de entrada de água, que descarregam na bacia de retenção, como condutas com as características físicas e geométricas verificadas anteriormente. Por último de uma forma análoga aos dispositivos de entrada, também se pode modelar os descarregadores de fundo ou de superfície utilizando condutas no SWMM. Estas condutas têm a função de fazer a ligação entre o corpo da bacia e o meio recetor a jusante, seja ele uma vala, um rio ou o oceano.

3.4 DEFINIÇÃO DE AÇÕES DE ADAPTAÇÃO

3.4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O desenvolvimento de uma estratégia de adaptação inclui geralmente duas componentes principais sendo elas a realização de uma avaliação de vulnerabilidade e o planeamento de ações de adaptação.

3.4.2 AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE

A avaliação de vulnerabilidade fornece uma estimativa da suscetibilidade de um sistema e da sua capacidade em lidar com os efeitos das alterações climáticas. Inclui uma análise da exposição e sensibilidade a estas alterações e ainda a avaliação da sua capacidade adaptativa, ou seja, até que ponto os efeitos nocivos das alterações climáticas podem ser mitigados através da adaptação (Snover *et al.*, 2007).

Um dos maiores desafios ao planeamento proactivo de estratégias de adaptação às alterações climáticas é a incerteza associada ao clima futuro. Esta incerteza deriva do desconhecimento das possíveis emissões de gases com efeito de estufa combinados com a incerteza acrescida associada à resposta dos sistemas climáticos a estas emissões. Perante este nível de incerteza é comum utilizar-se uma abordagem baseada em cenários futuros que representam estados de clima plausíveis que poderão ocorrer a partir das condições que se verificam no presente (Kirshen *et al.*, 2015).

Os cenários futuros podem ser integrados num plano de adaptação quer através de uma abordagem *top-down* ou *bottom-up* (Figura 4). Na abordagem *top-down* são utilizados os cenários do clima futuro com modelação de sistemas para determinar os possíveis impactos num local em particular, a partir do conhecimento desses impactos a eficácia das ações de adaptação isoladas são subsequentemente testadas. Por outro lado, a abordagem *bottom-up* determina a sensibilidade crítica às alterações climáticas de um sistema e posteriormente foca-se na possibilidade de estas ocorrerem (Vogel e Smith, 2010). No âmbito deste trabalho será utilizada a primeira abordagem para, a partir dos cenários futuros, avaliar a vulnerabilidade atual e futura do sistema em estudo, em particular à ocorrência de fenómenos de inundação.

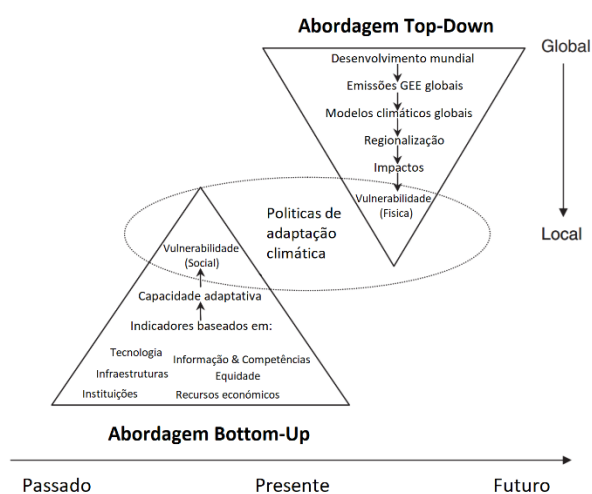


Figura 4 – Abordagens à avaliação da vulnerabilidade (Adaptado de Kirshen, 2015)

3.4.3 DEFINIÇÃO DE AÇÕES DE ADAPTAÇÃO

As ações de adaptação devem ser planeadas de forma a ajustar o sistema, artificial ou natural, e assim mitigar os danos resultantes das alterações climáticas expectáveis (Kiparsky *et al.*, 2012).

Estas podem integrar uma estratégia de adaptação que inclui o conjunto de ações locais e regionais, implementadas por organismos públicos e privados ao longo do tempo e do

espaço, de forma a gerir sistemas que são vulneráveis às alterações climáticas futuras. Consideram-se como três as principais classes de estratégias de adaptação para áreas urbanas ou outros meios construídos nomeadamente:

- Proteção – Criando uma barreira para mitigar os impactos das alterações climáticas, como por exemplo, um paredão marítimo para auferir proteção contra eventos de inundação costeira.
- Ajuste – Permitindo a ocorrência do impacto tentando, no entanto, mitigá-lo ao tomar ações específicas. Exemplos desta estratégia são a construção de edifícios elevados, à prova de inundações, o desenvolvimento de planos de evacuação, a criação de abrigos ou a contratação de seguros.
- Recuo ou Retirada – Distanciando a população do impacto previsto, por exemplo ao abandonar zonas onde as inundações são recorrentes ou migrando para climas mais amenos (Kirshen *et al.*, 2015).

Por sua vez, as estratégias de adaptação de infraestruturas podem ser classificadas em duas categorias: ações imediatas, e ações de preparação e monitorização. As ações imediatas são, normalmente, projetadas para áreas altamente ameaçadas ou para projetos novos, que devem ser concebidos de raiz para se adaptarem às alterações climáticas. As ações de preparação e monitorização adequam-se a áreas onde as ameaças atuais são baixas. Nestes casos justifica-se uma abordagem de planeamento e implementação faseada e progressiva de ações de adaptação. Sendo as ações realizadas apenas quando são atingidos certos valores, designados pontos críticos, sendo também eles parte integrante da estratégia de adaptação. (Kirshen *et al.*, 2015)

O sistema de monitorização pode incluir dados locais e globais, tais como redes de monitorização com sensores *in situ* ou remotos, e relatórios de avaliadores locais. Exemplos de conjuntos de dados relevantes incluem variáveis meteorológicas, medições de marés, condições socioeconómicas ou demográficas entre outros.

Uma estratégia de adaptação local eficaz deve consistir em ações robustas que funcionam aceitavelmente bem no contexto das incertezas e riscos futuros, e / ou flexíveis e ajustáveis de modo a poderem ser implementadas com sucesso à medida que as condições biofísicas e socioeconômicas mudam. Além disso, as ações de adaptação, de forma a integrarem uma estratégia de adaptação eficaz, devem:

- Acrescentar valor em qualquer cenário futuro, e mesmo que não ocorressem alterações climáticas.

- Integrar-se efetivamente no planeamento sustentável da região, para assim responder também a outras pressões sobre o território, como aumento populacional e alterações no uso do solo e mitigação de GEE.
- Considerar várias abordagens, que garantam diferentes níveis de segurança.

Uma vez que a adaptação é muitas vezes implementada a nível local, as partes interessadas (stakeholders) devem ser integradas no processo de planeamento. O desenvolvimento de uma estratégia de adaptação particular pode variar desde uma abordagem por tentativa-e-erro, com base na comparação do desempenho de várias estratégias de adaptação para um pequeno conjunto de cenários e critérios, até à utilização de métodos sofisticados, como escalada de decisão e tomada de decisão robusta (Kirshen *et al.*, 2015).

4. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

4.1 ENQUADRAMENTO

O caso de estudo incide sobre o sistema de drenagem pluvial da bacia de drenagem da Vala das Ratas, também designada por Vala Real do Lavradio, que se localiza no Município do Barreiro, mais concretamente na União de Freguesias do Barreiro e Lavradio. O Município do Barreiro localiza-se administrativamente na região NUTS II da Área Metropolitana de Lisboa, e sub-região NUTS III da Península de Setúbal.

4.2 REDE HIDROGRÁFICA NATURAL DO MUNICÍPIO DO BARREIRO

Na Figura 5 apresenta-se a rede hidrográfica natural no município do Barreiro. A área em estudo localiza-se na bacia hidrográfica do rio Tejo, pertencente à Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste (RH 5). O município do Barreiro possui uma série de pequenas bacias que drenam para o rio Tejo.

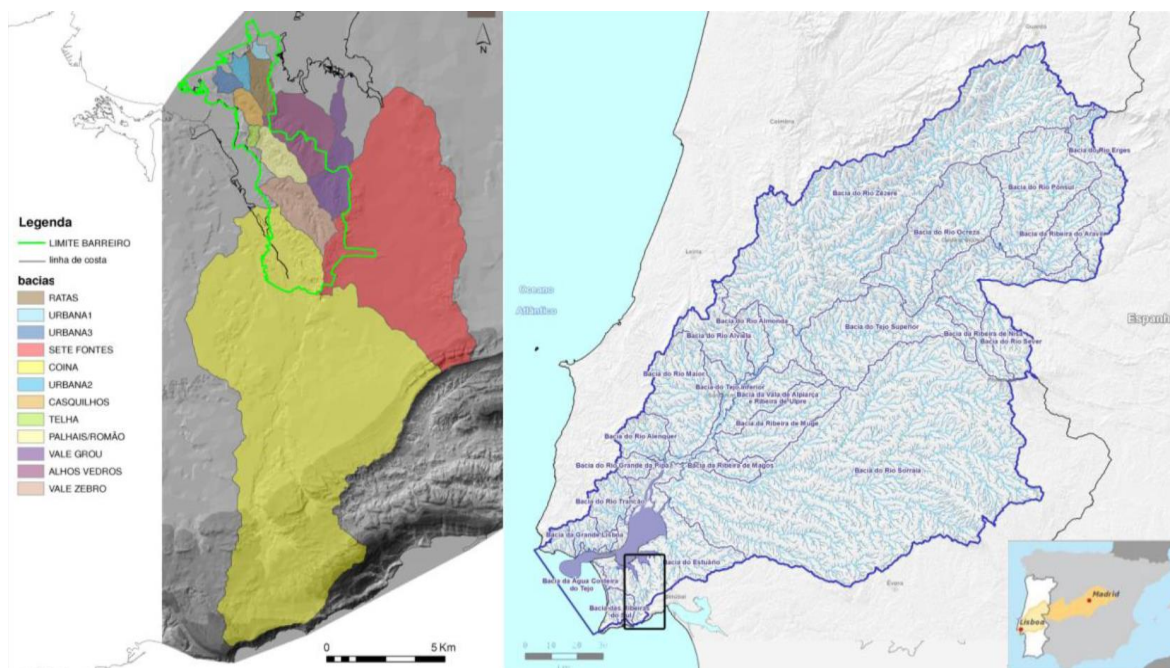


Figura 5 – Localização das bacias de drenagem do concelho do barreiro relativamente à bacia hidrográfica do Rio Tejo (Extraído de Sécio, 2012)

Na Figura 6 apresentam-se os principais eixos de drenagem do município do Barreiro. Pode-se observar a localização da bacia hidrográfica da Vala das Ratas, no extremo norte do

concelho, e a respetiva linha de água principal, a azul, com escoamento de sul para norte, tendo como meio recetor o rio Tejo.



Figura 6 – Principais eixos de drenagem do Barreiro (CMB, 2010)

4.3 CARACTERÍSTICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DA VALA DAS RATAS

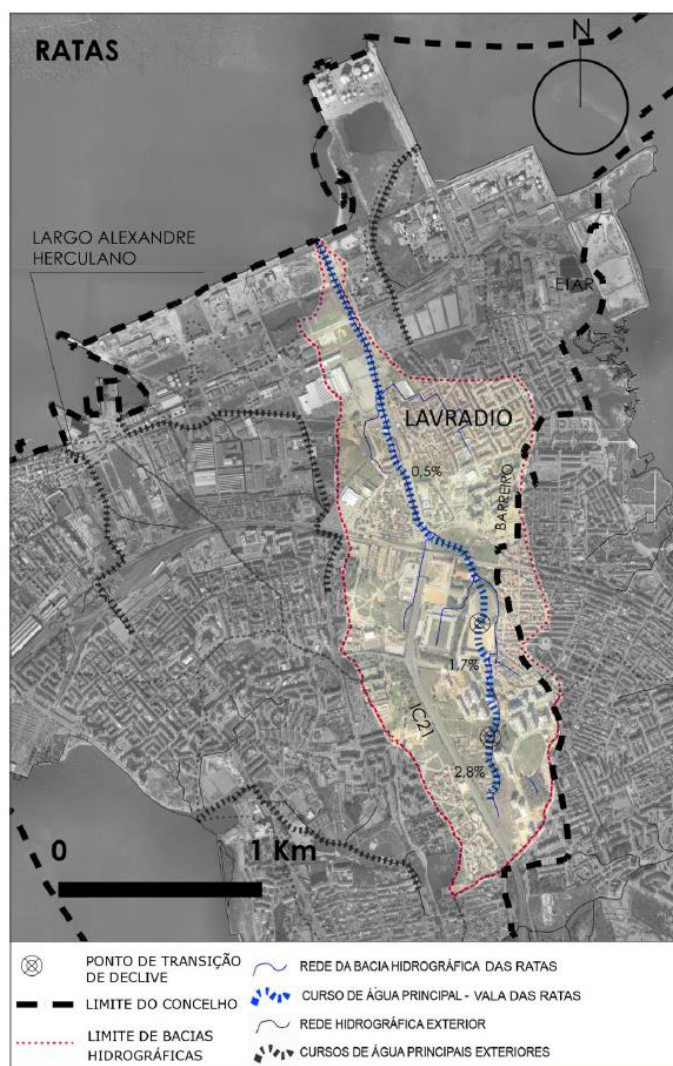


Figura 7 – Bacia hidrográfica da Vala das Ratas Tejo (Extraído de Sécio, 2012)

A área da bacia corresponde à componente geométrica de maior relevância uma vez que influência diretamente a quantidade de água que circula no sistema de drenagem, verificando-se que nas mesmas condições climáticas uma bacia com maior área obviamente produzirá um escoamento maior. A bacia hidrográfica da Vala das Ratas, representada na Figura 7, tem uma extensão de cerca de 2,08 km² e um perímetro, considerado como o interflúvio entre redes hidrográficas confinantes que drenam, cada uma, para um ponto específico a jusante, de cerca de 8.24 km, sendo considerada uma bacia de dimensão relativamente pequena.

A forma da bacia é também um fator fundamental para o seu comportamento hidrológico sendo que a sua análise permite antever a propensão à ocorrência de cheias, uma vez que

bacias longas e estreitas são menos suscetíveis a sofrer estes eventos quando comparadas com bacias de forma circular. A bacia hidrográfica da Vala das Ratas, segundo a fórmula de Horton (Eq. 1) e o índice de compacidade (Eq. 2), possui uma forma alongada, (Sécio, 2012) o que à partida indicaria uma capacidade de drenagem progressiva e uniforme, uma vez que vão confluindo ao longo do troço principal outos subsistemas de menor relevância. Desta forma os canais escoam a água proveniente da precipitação sem que exista uma acumulação exagerada do escoamento na confluência principal.

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (1)$$

$$K_f = \frac{2.08}{3^2} = 0.23$$

Sendo:

K_f - Fator de forma segundo Horton.

A – Área da bacia hidrográfica (km²).

L – Comprimento axial medido ao longo da linha de água principal (km).

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

$$K_c = 0.28 \frac{8.24}{\sqrt{2.08}} = 1,6$$

Em que

K_c - Índice de compacidade segundo Gravellius.

P - Perímetro da bacia hidrográfica (km).

A – Área da bacia hidrográfica (km²).

4.4 CARACTERÍSTICAS E OCUPAÇÃO DO SOLO

As características geológicas da bacia condicionam o tipo de solo presente e consequentemente a distribuição e o movimento da água na bacia. O regime de escoamento da bacia, considerando os restantes fatores idênticos, é mais constante quanto maior for a permeabilidade do solo e formações geológicas, isto ocorre porque é favorecido o armazenamento nos aquíferos, tornando-se, pelo contrário, mais irregular, quando a

permeabilidade é baixa. As características dos solos que mais condicionam o movimento da água na bacia são a sua capacidade de infiltração e de retenção. (Shahidian, et al., 2017)

A Vala das Ratas atravessa o substrato arenoso do Pliocénico (Areias de Santa Marta) com pente mais elevada (acima de 2%) suavizando-se, para jusante, quando atinge a acumulação aluvial lodosa do Rio Tejo (Figura 8). Dominam, portanto, as aluviões lodosas sobre as arenosas, o que corresponde ao substrato de uma parte da área do extremo norte do concelho (união de freguesias do Barreiro e do Lavradio) intrinsecamente ligada à dinâmica do Rio Tejo. (Sécio, 2012)

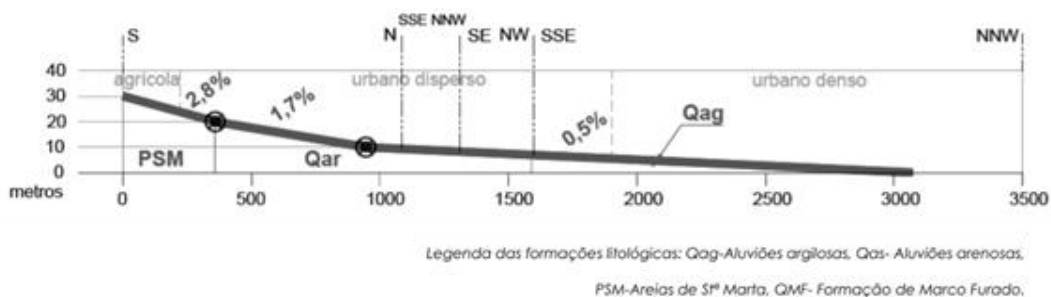


Figura 8 – Perfil longitudinal da Vala das Ratas (Sécio, 2012)

Na medida em que a população impermeabiliza o solo e acelera o escoamento através do encaminhamento da água em condutas e canais a quantidade de água que afluí ao mesmo tempo ao sistema de drenagem aumenta e, conseqüentemente, aumenta a probabilidade de ocorrência de inundações comparativamente a quando a superfície se encontra no seu estado natural e é mais permeável dando-se o escoamento pela inclinação natural do terreno. Segundo dados de 2005, o uso do solo na bacia hidrográfica da Vala das Ratas é maioritariamente urbano disperso, com uma percentagem de cerca de 62%, seguido de urbano denso com 30% e por último de uso agrícola, em 8% da área total de solo da bacia hidrográfica (Sécio, 2012) Como se pode constatar pela tabela 3, a bacia tem uma ocupação maioritariamente urbana.

Tabela 3 – Ocupação do solo na Bacia da Vala das Ratas (Sécio, 2012)

Tipologia	Urbano Denso	Urbano Disperso	Agrícola
Área (km ²)	0.63	1.29	0.16
Percentagem (%)	30	62	8

4.5 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA HIDRÁULICO

De acordo com o Plano Geral de Águas e Saneamento do Concelho do Barreiro (PGAS, 2011), a Vala das Ratas funciona como coletor, a céu aberto, de uma área que extravasa os limites da própria bacia e chegou no passado a integrar a rede de drenagem entubada indiferenciada (sistema de águas pluviais e residuais) de uma parte considerável do território da Quimiparque e grande parte da antiga freguesia do Lavradio. Com a entrada em funcionamento da ETAR Barreiro/Moita, situada no extremo nor-nordeste do concelho do Barreiro, esta situação alterou-se relativamente aos efluentes domésticos uma vez que estes passaram a ser descarregados, após tratamento, diretamente no estuário do Tejo, passando, portanto, o sistema a comportar apenas o caudal proveniente da drenagem pluvial. Considerando a forte influência da maré neste canal artificializado, há registos da incapacidade da rede em efetuar a descarga eficaz na vala nos momentos em que coincide um episódio de precipitação forte e continuada, com a preia-mar.

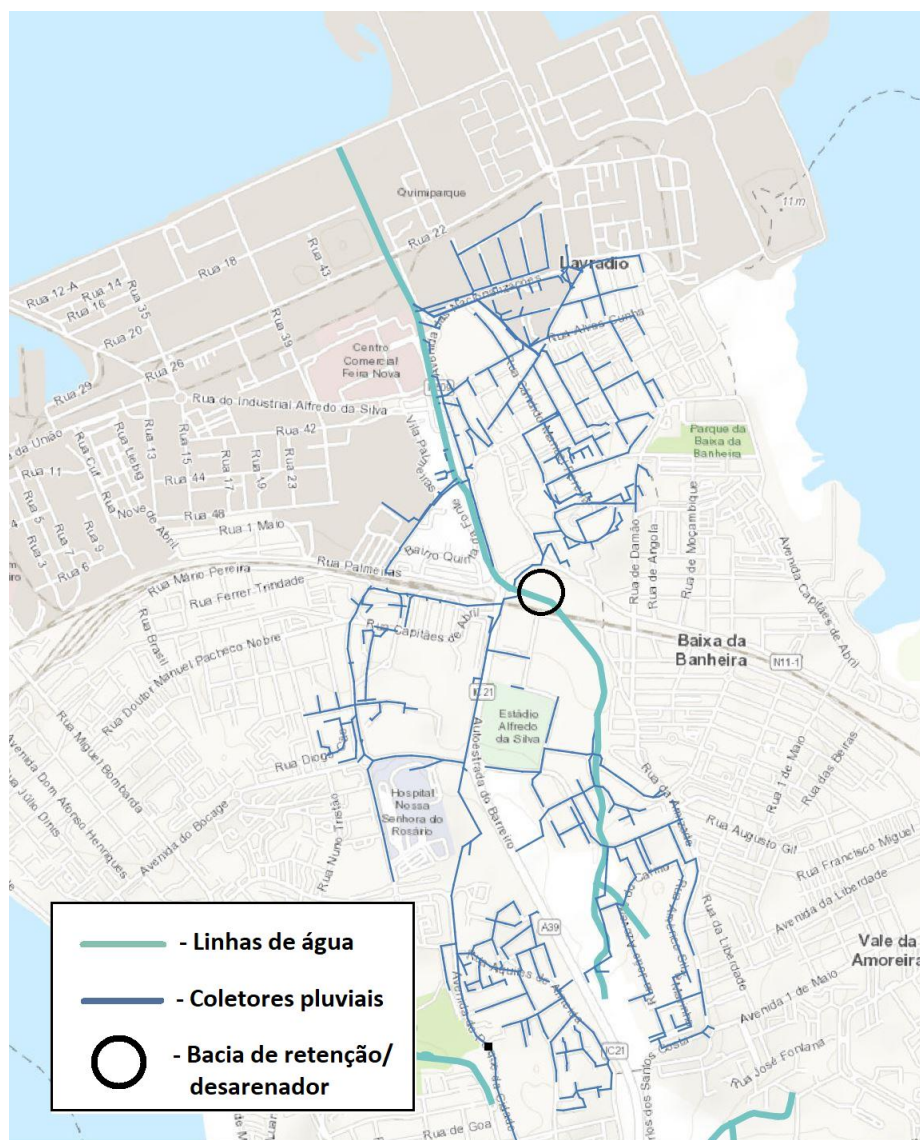


Figura 9 – Sistema de drenagem pluvial da bacia hidrográfica da Vala das Ratas (CMB 2020)

As inundações no concelho afetam cerca de 4.000 pessoas numa área de aproximadamente 10,5 hectares considerando-se dois motivos principais para a ocorrência destes eventos, a falta de capacidade hidráulica dos coletores unitários e pluviais e os efeitos da maré. Nas zonas marginais deste concelho, o escoamento dos coletores é potencialmente afetado pelo nível da maré, tendo-se considerado noutros estudos (CMB e Engidro, 2010) como áreas críticas as implantadas a cotas de terreno inferiores a 6 m, o que abrange um total de 580 ha. De facto, dada a sua altimetria, uma das características que condicionam o funcionamento do sistema de drenagem da bacia hidrográfica em estudo é precisamente a influência das marés, especialmente em tempo de chuva. Na Figura 11 pode-se observar que as zonas 5 e 6, rotunda do IC21 e Rua Cárcomo Lobo, integrantes no sistema da bacia

hidrográfica da Vala das Ratas, estão sinalizadas como zonas de inundação. (CMB & Engidro, 2010)

Salienta-se a existência de uma bacia de retenção e órgão desarenador, na zona adjacente à rotunda do IC21, representada com um círculo na figura 9, que visa a regularização dos caudais de ponta de cheia bem como impedir o assoreamento desta área. A jusante da referida bacia existe uma vala artificial onde o escoamento ocorre a céu aberto que atravessa a antiga freguesia do Lavradio e a Quimiparque até alcançar o meio recetor. De referir que a bacia de retenção possui três órgãos de entrada sendo um deles uma vala onde o escoamento ocorre a céu aberto com uma secção artificializada em taludes e dois coletores com secção circular em betão. Esta é uma bacia visitável, a céu aberto e a seco nos períodos em que não ocorre precipitação.



Figura 10 - Vista da bacia de retenção, desarenador e descarregador de saída.

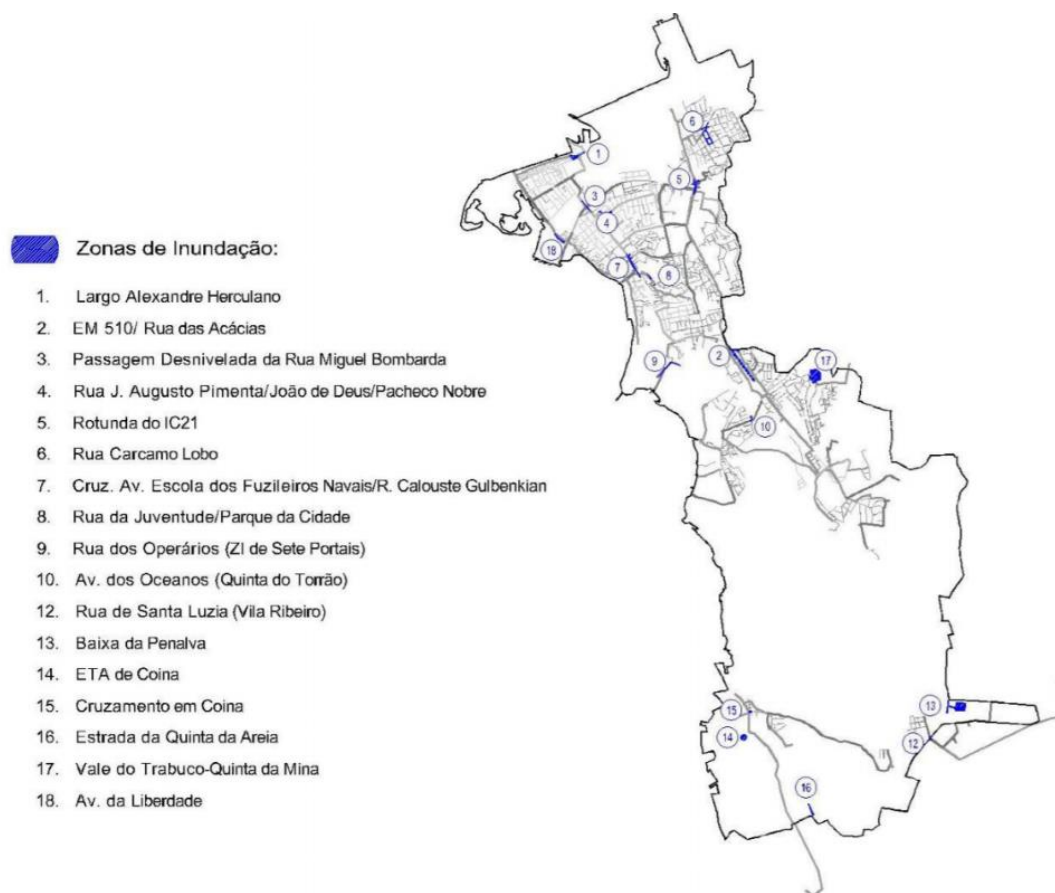


Figura 11 – Zonas de inundação do concelho do Barreiro (CMB & Engidro, 2010)

5. IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA BACIA DE RETENÇÃO EM ESTUDO

5.1 ENQUADRAMENTO

No presente capítulo procede-se ao estudo do impacto das alterações climáticas na bacia de retenção e órgão desarenador localizados na Vala das Ratas, entre as zonas 5 e 6 da Figura 11. Para tal, procede-se ao estudo hidrológico, nomeadamente, cálculos do tempo de concentração, da intensidade de precipitação, da distribuição temporal da precipitação e do caudal de ponta de cheia. Com base neste estudo, procede-se à modelação hidrológica e hidráulica recorrendo ao SWMM e, finalmente, simulam-se diferentes cenários de alterações climáticas e analisam-se os eventuais impactos na zona em estudo.

5.2 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

O tempo de concentração, t_c , é o tempo necessário para que a área total da bacia hidrográfica contribua para o escoamento superficial na secção de referência. Pode ser também definido como o tempo que uma gota de água que caia no ponto mais distante da bacia demora a escoar até à secção de referência. Considera-se como sendo uma característica de cada bacia hidrográfica, sendo, portanto, independente das características da chuvada, e é utilizado na determinação do caudal de ponta de cheia. O cálculo do tempo de concentração pode ser realizado recorrendo a diversas formulações, no entanto a aplicabilidade destas está normalmente limitada a determinadas características fisiográficas da bacia, como área, ou o tipo de solo e o grau de permeabilidade da sua cobertura. Em seguida apresentam-se duas formulações indicadas para bacias urbanas, nomeadamente, a do antigo Soil Conservation Service, mais conhecida simplesmente por SCS e a de Temez adaptada.

5.2.1 FORMULAÇÃO DO SCS

Seguindo a formulação SCS (Correia, 1984), o tempo de concentração é calculado pela seguinte expressão:

$$t_c = 1.67t_l \quad (3)$$

sendo:

t_l – tempo de atraso (também designado por tempo de resposta ou tempo de lag) (h)

De referir que o tempo de atraso é considerado como o tempo compreendido entre as ocorrências do centro de gravidade do hietograma da precipitação útil e da ponta do hidrograma. Este valor pode ser calculado a partir de hietogramas e hidrogramas observados ou, caso não existam esses registos, conforme a seguinte expressão:

$$t_l = \frac{L_b^{0,8} (S_{mr} + 1)^{0,7}}{734,43 i_{mb}^{0,5}} \quad (4)$$

sendo:

t_l – tempo de atraso

i_{mb} – declive médio da bacia hidrográfica (%).

L_b – comprimento do curso de água principal (m).

S_{mr} – capacidade máxima de retenção, igual a $S_{mr}=(25400/CN)-254$.

CN – número de escoamento (*curve number*).

A expressão anterior é apropriada para o cálculo do tempo de atraso em bacias rurais com área inferior a 8 km². No caso de bacias urbanas ou mistas torna-se necessário multiplicar o resultado por dois fatores corretivos, o fator corretivo relativo às condições do escoamento e o fator corretivo relativo à percentagem de área impermeável (Correia, 1984), caso contrário o resultado tende a ser sobrestimado, o que por sua vez resulta numa situação de projeto menos desfavorável. Estes dois fatores relacionam-se, como o próprio nome indica, com a percentagem do curso de água em que houve melhoria das condições de escoamento e com a percentagem de área impermeável na bacia hidrográfica sendo obtidos a partir do conhecimento acerca das características e tipo de solo, correspondente CN, ou Curve Number, e posteriormente recorrendo às figuras 11 e 12 respetivamente para através dos dados conhecidos extrair o seu valor.

Tabela 4 – Tipos de solo em função das suas características para obtenção do CN, (Extraído de Correia, 1984)

Tipo de solo	Características dos solos
Tipo A	Solos dando origem a baixo escoamento directo, ou que apresentam permeabilidade bastante elevada. Inclui areias com bastante espessura, e com pouco limo ou argila, e arenitos com bastante espessura e muito permeáveis.
Tipo B	Solos menos permeáveis que os do tipo A mas com permeabilidade superior à média. Inclui fundamentalmente solos arenosos menos espessos que os do tipo A e arenitos menos espessos e menos agregados que os do tipo A.
Tipo C	Solos originando escoamentos directos superiores à média e superiores aos originados pelos tipos anteriores. Inclui solos pouco espessos e solos com quantidades apreciáveis de argilas, se bem que menos do que os do tipo D.
Tipo D	Solos com argilas expansivas e solos pouco espessos, com sub-horizontes quase impermeáveis que originam elevado escoamento directo.

Tabela 5 – Valores do número de escoamento (CN) em função da utilização e tipo de solo (Extraído de Correia, 1984)

UTILIZAÇÃO OU COBERTURA DO SOLO	TIPO DE SOLO			
	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem medidas de conservação do solo	72	81	88	91
com medidas de conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou baldios: em más condições	68	79	86	89
em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais: cobertura má, sem "Mulch"	45	66	77	83
boa cobertura	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, cemitérios, etc.				
Boas condições: relva cobrindo mais de 75% da área	39	61	74	80
Condições razoáveis: relva cobrindo de 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios (85% de área impermeável)	89	92	94	95
Zonas industriais (72 % de área impermeável)	81	88	91	93
Zonas residenciais:				
Áreas médias dos lotes				
< 500 m ² 65 %	77	85	90	92
1000 m ² 38 %	61	75	83	87
1300 m ² 30 %	57	72	81	86
2000 m ² 25 %	54	70	80	85
4000 m ² 20 %	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e estradas:				
asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
gravilha	76	85	89	91
terra	72	82	87	89

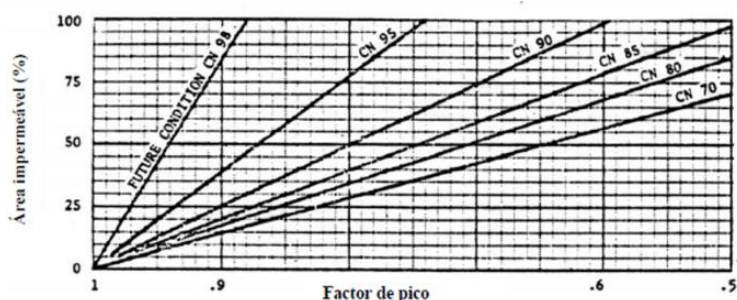


Figura 12- Fator corretivo relativo às condições do escoamento (Correia, 1984)

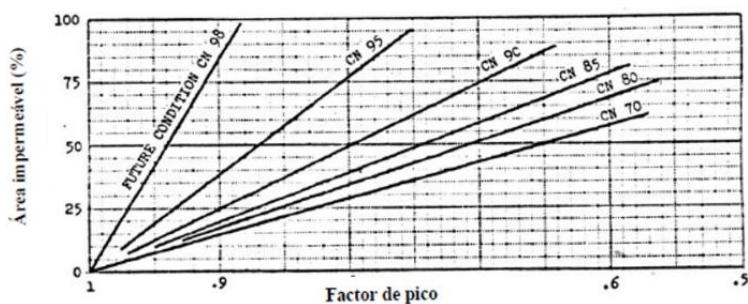


Figura 13- Fator corretivo relativo à percentagem de área impermeável (Correia, 1984)

5.2.2 FORMULAÇÃO DE TEMEZ

Temez no seu trabalho de 1978, com base na análise de várias bacias hidrográficas em Espanha, propôs a expressão que se apresenta em seguida, indicada para bacias naturais com áreas até 3000 km²:

$$t_c = 0,3 \left(\frac{L_b}{i_m^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (5)$$

sendo:

- i_m – declive médio do curso de água principal da bacia (m/m);
- L_b – comprimento do curso de água principal da bacia (km).

No caso de bacias urbanas:

$$t'_c = \frac{t_c}{1 + 3\sqrt{\mu(2 - \mu)}} \quad (6)$$

Em que:

- t'_c – tempo de concentração adaptado a bacias urbanas;
- μ – parâmetro em função do grau de urbanização da bacia.

No caso da formulação desenvolvida por Temez, considera-se a impermeabilização dos solos com recurso a um parâmetro qualitativo μ , que varia em função do grau de urbanização, conforme se pode observar na tabela 6.

Tabela 5 – Valores de μ em função do grau de urbanização (JAE,1998)

Grau de Urbanização	μ
Pequeno	$\mu < 0,05$
Moderado	$0,05 \leq \mu < 0,15$
Importante	$0,15 \leq \mu < 0,30$
Muito Desenvolvido	$\mu \geq 0,30$

5.2.3 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO DA BACIA EM ESTUDO

Na Tabela 6 apresentam-se os resultados obtidos para o tempo de concentração da bacia em estudo, utilizando os métodos atrás referidos.

Tabela 6 – Tempo de concentração da bacia em estudo segundo o SCS e Temez

Método	t_c (min)
SCS	16,9
Temez	17,6

Após análise dos resultados obtidos optou-se por utilizar aquele que produziria os resultados mais desfavoráveis, isto é, o tempo de concentração mais reduzido de 16,9 minutos obtido a partir da expressão desenvolvida pelo SCS.

5.3 INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO

A intensidade de precipitação é uma característica dependente da duração da chuvada e do tempo de retorno, ou seja, à partida quanto maior for o tempo de retorno maior será a intensidade de precipitação e quanto maior for a duração da chuvada considerada, menor será a intensidade de precipitação.

O regulamento português, nomeadamente o Decreto-Regulamentar nº 23/95, de 23 de agosto, estabelece que, para o cálculo da intensidade de precipitação, deve-se utilizar as curvas de intensidade-duração-frequência (IDF) que permitem, para vários períodos de retorno, obter um valor em função da duração do evento de precipitação. Estas curvas foram obtidas a partir de análise estatística de séries históricas de registos de precipitações recolhidos durante vários anos ou até mesmo décadas. Como tal, no presente trabalho, a intensidade média máxima de precipitação (mm/h) para a duração t (min) foi estimada com recurso aos dados presentes no Decreto-Regulamentar nº 23/95, de 23 de agosto, contudo poder-se-iam ter utilizado os dados resultantes do estudo de (Brandão e Rodrigues, 2000), para um período de retorno de 100 anos, conforme recomendado para este tipo de projetos pela ARH Tejo.

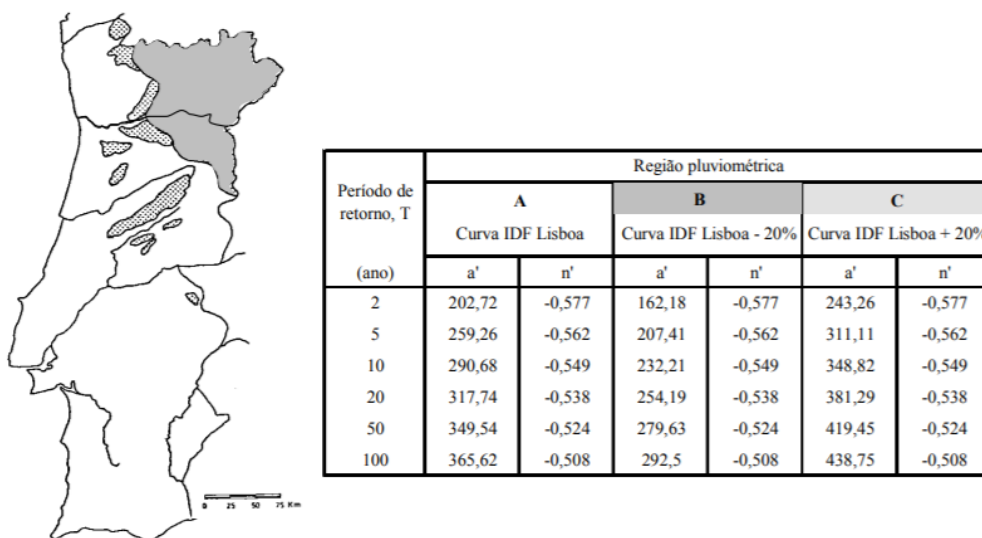


Figura 14 – Regiões pluviométricas e parâmetros das curvas IDF (Decreto-Regulamentar nº 23/95, de 23 de agosto)

$$I = at^b \quad (7)$$

Sendo:

I - intensidade de precipitação (mm/h)

t – tempo (min)

A partir da Equação 7, realizou-se o cálculo das curvas IDF para o período de retorno de 100 anos, representadas graficamente na Figura 15.

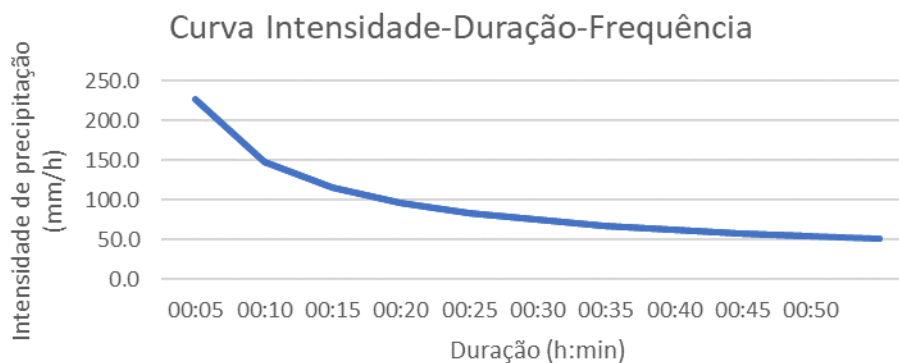


Figura 15 – Curva IDF obtida para o período de retorno de 100 anos

5.4 DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO

Importa definir a distribuição da precipitação no tempo para tal construiu-se o gráfico da variação temporal da precipitação, ou hietograma de projeto, fundamental para determinação do hidrograma de cheia. A forma mais simples, e também menos realista, de distribuir temporalmente a precipitação consiste em assumir uma distribuição uniforme do volume precipitado durante a chuvada, através de um hietograma de intensidade constante, sendo que a quantidade de precipitação resulta do produto da duração pela correspondente intensidade. Contudo é de supor que a intensidade de precipitação não seja constante ao longo da duração total de precipitação e por este motivo, recorrendo às curvas IDF é aconselhado obter o hietograma de projeto recorrendo ao método dos blocos alternados, uma vez que este conduzirá a um cenário mais desfavorável, e a um caudal de cheia mais elevado (Portela *et al.*, 2000).

A metodologia dos blocos alternados consiste em:

- Obter, a partir das curvas IDF para o período de retorno pretendido, as intensidades para cada duração Δt e correspondente precipitação;
- Estimar as diferenças entre intervalos de tempo sucessivos, determinando assim a precipitação em cada intervalo;
- Ordenar as precipitações de modo a centrar o maior valor e alternar os valores, à direita e à esquerda, por ordem decrescente.

De referir que o período total de duração do evento de projeto considerado foi de 55 minutos, igual a aproximadamente três vezes o tempo de concentração da bacia, visto que este período, t_c multiplicado por três, é considerado como sendo o mais desfavorável comparativamente com a utilização do tempo de concentração da bacia como a duração do evento pluvioso de projeto (Portela *et al.*, 2000).

Na Figura 16 apresenta-se o hietograma, de blocos alternados, obtido através do método descrito anteriormente e para um período de retorno de 100 anos.

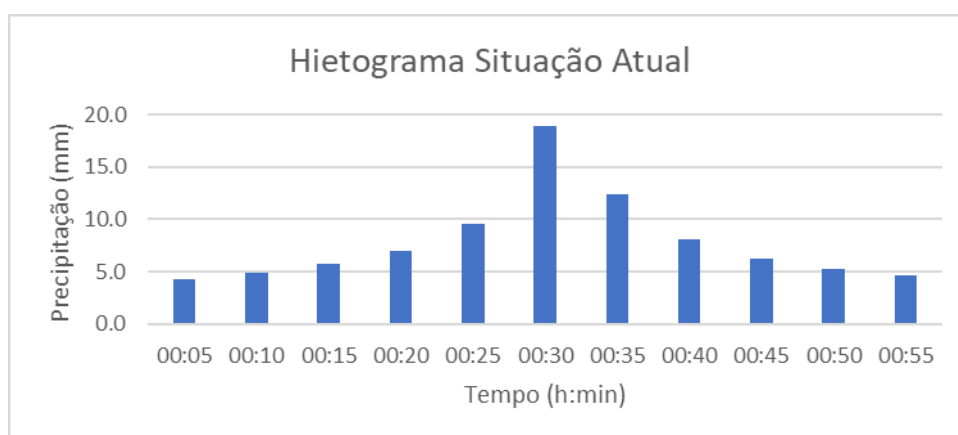


Figura 16 – Hietograma obtido através do método dos blocos alternados para um período de retorno de 100 anos considerando a intensidade atual

5.5 CÁLCULO DO CAUDAL DE PONTA DE CHEIA ATRAVÉS DE MÉTODOS CINEMÁTICOS

Por métodos cinemáticos entende-se aqueles que têm em consideração as características do movimento da água na bacia hidrográfica, e a sua relação com a chuvada que origina o escoamento, possibilitando o cálculo do caudal de ponta de cheia ou a totalidade do hidrograma de cheia associado, para o respetivo tempo de retorno definido. De referir que estes métodos permitem a consideração de algumas das características hidromorfológicas do solo. A sua aplicação pressupõe o cálculo prévio do tempo de concentração da bacia, e da intensidade de precipitação correspondente a uma chuvada crítica associada ao tempo de retorno definido, e também do coeficiente de escoamento. Sendo este último utilizado como forma de representar o grau de impermeabilização da superfície da bacia hidrográfica (Portela *et al.*, 2002).

De referir que os métodos que se apresentam em seguida foram aplicados a uma secção de referência localizada na saída da bacia de retenção/órgão desarenador adjacente à rotunda do IC21, de forma a estimar o caudal de ponta de cheia neste ponto, e não a toda a bacia hidrográfica.

5.5.1 MÉTODO RACIONAL

Existem várias metodologias simplificadas para calcular o caudal de ponta de cheia em pequenas bacias hidrográficas, no entanto, o método, ou fórmula, racional é reconhecidamente o de maior utilização e divulgação à escala mundial.

Ao contrário de outros métodos mais complexos, o facto da fórmula racional não necessitar de informação hidrométrica, mais dificilmente disponível, contribuiu para que em Portugal a sua aplicação à análise de cheias tenha sido prática corrente, tanto em fases preliminares de estudo ou no projeto de obras de pequena magnitude. Para aplicá-la é necessário ter apenas conhecimento acerca da intensidade média de precipitação com dado período de retorno e com duração igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica. Pela sua simplicidade, esta fórmula torna-se particularmente interessante na avaliação de caudais de ponta de cheia, contudo a sua utilização carece, de investigação adicional particularmente em países do sul da Europa nos quais podem ocorrer condições de cheias próximas às verificadas em Portugal (Portela *et al.*, 2002).

A fórmula racional é definida por:

$$Q_p = C I A \quad (8)$$

sendo:

Q_p - caudal de ponta de cheia (m^3/s)

C – coeficiente dependente do tipo e ocupação do solo, adimensional. Pode ser obtido através da Tabela 7

I – intensidade média de precipitação, para o tempo de retorno definido e duração igual ao tempo de concentração da bacia (m/s)

A – área da bacia hidrográfica (m^2)

Tabela 7 – Valores do coeficiente C da fórmula racional, retirado de (Portela et al., 2002)

Tipo de ocupação	Período de retorno, T (anos)						
	2	5	10	25	50	100	500
Zona urbana							
Asfalto	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
Betão/telhados	0,75	0,80	0,88	0,88	0,92	0,97	1,00
Relvados							
Ocupando menos de 50% da área							
Declive de 0 a 2%	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,58
Declive de 2 a 7%	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53	0,61
Declive superior a 7%	0,430	0,43	0,45	0,49	0,52	0,55	0,62
Ocupando de 50 a 75% da área							
Declive de 0 a 2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Declive de 2 a 7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Declive superior a 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Ocupando mais de 75% da área							
Declive de 0 a 2%	0,21	0,23	0,25	0,29	0,32	0,36	0,49
Declive de 2 a 7%	0,29	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46	0,56
Declive superior a 7%	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,51	0,58
Zona não urbana							
Terreno cultivado							
Declive de 0 a 2%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,57
Declive de 2 a 7%	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51	0,60
Declive superior a 7%	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61
Pastagem							
Declive de 0 a 2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Declive de 2 a 7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Declive superior a 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Floresta							
Declive de 0 a 2%	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Declive de 2 a 7%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,56
Declive superior a 7%	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52	0,58

5.5.2 MÉTODO DO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)

No método do Soil Conservation Service é considerado um fator adicional que, através das perdas iniciais de água no terreno, atribui maior importância às características hidromorfológicas do solo, simulando uma situação em que apenas depois de ocorrer a saturação do solo é que se inicia o escoamento superficial. Esta consideração afeta o amortecimento e atraso na ocorrência do caudal de ponta de cheia da bacia hidrográfica. De referir que alguns autores verificaram que o modelo de perdas do SCS conduz, em termos absolutos, a perdas de precipitação excessivas para Portugal Continental, tal facto decorre fundamentalmente das perdas contínuas que o modelo introduz ao longo da chuvada (Portela et al., 2000).

A fórmula proposta por Soil Conservation Service é definida pela Equação 9:

$$Q_p = \frac{I_u A K}{3.6} \quad (9)$$

sendo:

Q_p – o caudal de ponta de cheia (m^3/s)

I_u – intensidade de precipitação útil (mm/h) dada por, $I_u = \frac{P_u}{t_p}$ sendo P_u a precipitação útil (mm) e

t_p o tempo de crescimento ou tempo para a ponta (h) $t_p = \frac{t_r}{2} + 0.6t_c$ onde t_c , o tempo de concentração (h), e t_r , a duração da chuvada (h) dada por $t_r = t - t_0$ envolvendo t a duração total de precipitação no cenário mais gravoso (h) e t_0 o tempo que decorre até colmatar as perdas iniciais (h)

K – fator de ponta da bacia hidrográfica, podendo variar entre 1, para bacias extremamente declivosas, e 0,5 para bacias planas

A – área da bacia hidrográfica em km^2

5.6 VOLUME DA BACIA DE RETENÇÃO SEGUNDO O MÉTODO HOLANDÊS E COMPARAÇÃO COM O VOLUME EXISTENTE

Por ter sido posto em prática inicialmente na Holanda, onde a resolução dos problemas de extração de água dos “polders” tem grande relevância, este método ficou conhecido como método holandês. O método baseia-se nas curvas IDF para a zona de estudo, permitindo calcular o volume necessário para armazenar o caudal afluente resultante da precipitação crítica, para o período de retorno escolhido, garantindo um caudal constante q , correspondente à capacidade máxima de vazão da estrutura de drenagem a jusante. Por ser um método expedito e simplificado é particularmente adequado na fase de pré-dimensionamento de bacias de retenção, aliás como o próprio regulamento português Decreto-Regulamentar n.º 23/95 indica. A expressão proposta para o cálculo do volume de armazenamento, V_a (m^3), é a seguinte:

$$V_a = 10 \times \frac{-b \times q_s}{1+b} \times \left(\frac{q_s}{a \times (1+b)} \right)^{\frac{1}{b}} \times C \times A \quad (10)$$

sendo:

V_a - volume de armazenamento (m^3)

q_s – caudal específico efluente (mm/min) dado por: $q_s = \frac{6q}{CA}$ onde q é o caudal máximo efluente (m^3/s)

a, b – parâmetros da curva IDF

A – área da bacia hidrográfica (ha)

C – coeficiente de escoamento

Pela aplicação direta, utilizando os caudais máximos efluentes obtidos através dos dois métodos descritos anteriormente obtiveram-se os resultados presentes na Tabela 9, para o volume de armazenamento da bacia de retenção: Nos resultados obtidos constata-se uma diferença de cerca de $350 m^3$ entre o volume da bacia de retenção existente, estimado em cerca de $16.204 m^3$ a partir dos registos topográficos disponíveis, e o maior volume necessário obtido pelo método de pré-dimensionamento que consta no regulamento, que por sua vez teve como dados os caudais de ponta de cheia obtidos através da aplicação da fórmula racional e do método dos SCS..

Tabela 8 – Resultados obtidos para o volume de armazenamento pelo método holandês

Método	Volume de armazenamento (m^3)	
	T = 5 anos	T=100 anos
Racional	7.384	14.444
SCS	8.676	15.841

5.7. MODELAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA COM O SWMM

5.7.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO PARA ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL

Na construção do modelo hidráulico da bacia de drenagem do Lavradio, como referido anteriormente, foi necessário recolher e sistematizar informação diversa nomeadamente dados de cadastro, cedidos neste caso pela CMB, de onde foi possível extrair cotas do terreno e distâncias percorridas pelas linhas de água. Consultou-se também o projeto do órgão desarenador e coletores de entrada e saída da zona em análise, o que apoiou a realização deste estudo e a obtenção de dados hidráulicos que vão influenciar tanto a altura de escoamento como a sua velocidade, Nomeadamente, informações acerca da geometria das secções das tubagens, valas ou canais, bem como os materiais constituintes associados a um determinado coeficiente de rugosidade. Para além dessas duas características importou ainda conhecer a inclinação das tubagens.

Na Figura 17 apresenta-se a representação esquemática dos elementos do modelo hidráulico criado em ambiente SWMM.

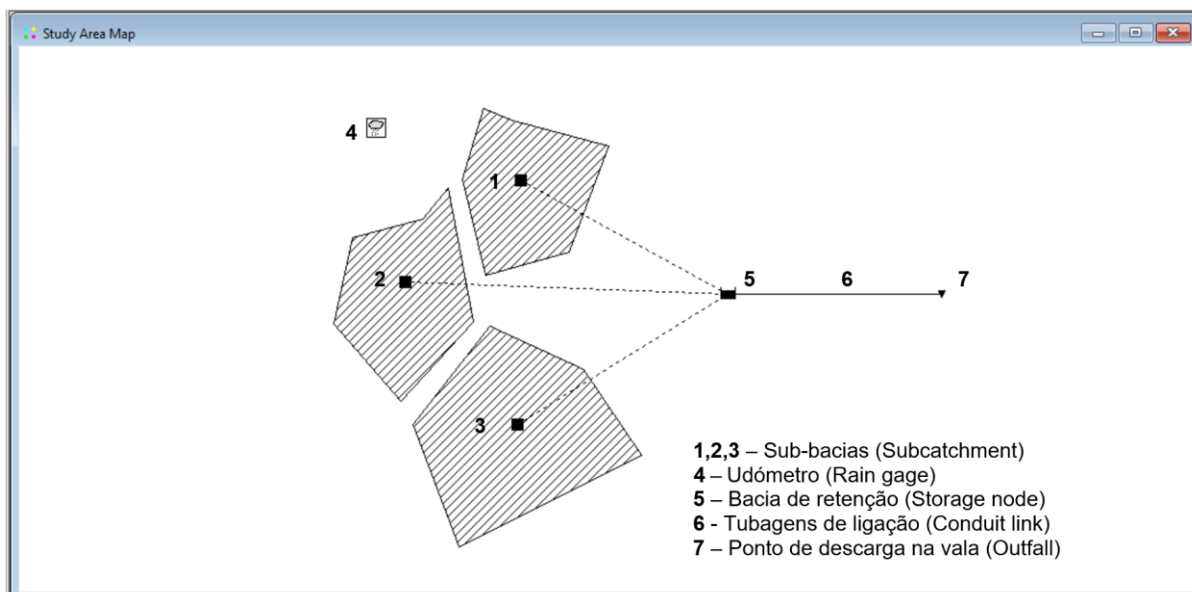


Figura 17 – Representação esquemática dos elementos do modelo criado em ambiente SWMM

Também se compilou os dados hidrológicos de forma a realizar a modelação da bacia de drenagem em estudo. Com vista a definir um hietograma de projeto passível de ser inserido no software SWMM conforme apresentado em (Chow, *et al.*, 1988) e (Portela, *et al.*, 2000) utilizou-se as curvas IDF, para a região de Lisboa, e para um período de retorno preestabelecido de 100 anos. Esta metodologia considera-se adequada para o estudo de bacias relativamente pequenas, como é o caso. Calculou-se o tempo de concentração da bacia hidrográfica com base nas expressões de Temez e SCS de forma a encontrar o valor mais desfavorável a utilizar. Tendo calculado o tempo de concentração da bacia hidrográfica procedeu-se à definição da duração do evento de precipitação de projeto. Segundo Portela, *et al.* (2000) criou-se um evento de precipitação com duração três vezes superior ao tempo de concentração da bacia de forma a obter um caudal de cheia pelo lado da segurança. O último passo para a definição do hietograma de projeto passou pela distribuição temporal da intensidade de precipitação ao longo do tempo de duração do evento e para tal utilizou-se o padrão de blocos alternados, admitindo que a maior quantidade de precipitação no incremento de tempo considerado, ocorre sensivelmente a meio da duração do acontecimento pluviométrico e ordenando as restantes parcelas de precipitação por ordem decrescente, sequencialmente e de modo alternado em torno daquele bloco central. (Portela, *et al.*, 2000). Posteriormente associou-se a informação deste hietograma, convertido em série temporal, 'Time Series', ao elemento 'Rain Gage' do software SWMM, que por sua vez será associado ao elemento 'Subcatchment' descrito em seguida.

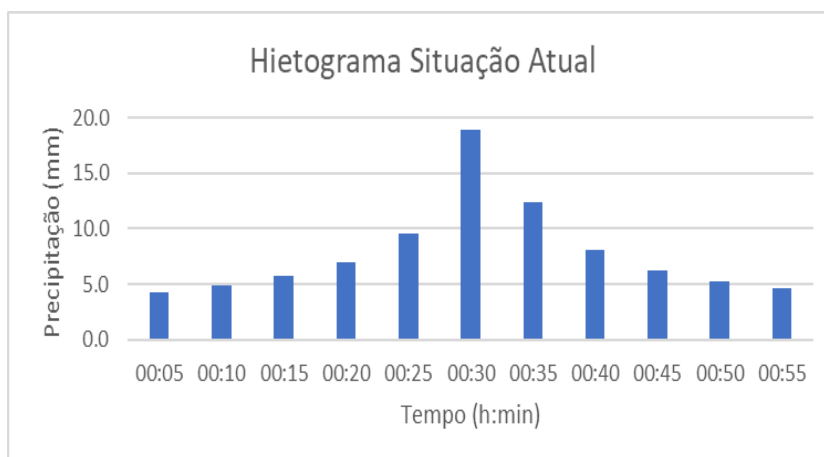


Figura 18 – Hietograma obtido através do método dos blocos alternados para um período de retorno de 100 anos considerando a intensidade atual

Para além dos dados relativos ao evento de precipitação de projeto, recolheram-se dados relativos à ocupação do solo para possibilitar a determinação do coeficiente de impermeabilização da bacia de drenagem, que vai também influenciar a precipitação útil e consequentemente o escoamento superficial gerado. Este processo realizou-se através de um levantamento visual a partir de imagens de satélite com vista a identificar e quantificar as percentagens de áreas com maior (jardins, parques, hortas, entre outros) e com menor (vias de comunicação, edifícios, parques de estacionamento, pavimentos, entre outros) permeabilidade (ver Tabela 9). A percentagem correspondente à parcela impermeável da superfície da bacia foi então associada aos elementos ‘Subcatchment’ no software SWMM.

Tabela 9 – Área e percentagem impermeável de cada sub-bacia

	Sub-bacia 1	Sub-bacia 2	Sub-bacia 3
Área total (m ²)	874.810	588.022	123.036
Área impermeável (%)	55,3	74,9	83,8

Por último, atribuiu-se a capacidade de armazenamento da bacia de retenção/órgão desarenador existente ao elemento criado no SWMM através da importação da curva de armazenamento correspondente, a qual está expressa na Tabela 10.

Tabela 10 – Curva de armazenamento associada ao modelo da bacia

Cota (m)	Área (m ²)
0	451,8
0,1	474,5
0,2	497,1
0,3	519,7
0,4	542,2
0,5	564,7
0,6	587,0
0,7	609,3
0,8	631,5
0,9	653,6
1,0	675,7
1,1	697,7
1,2	719,6
1,3	741,4
1,4	763,2
1,5	784,8

Para criar a curva de armazenamento consultaram-se as peças escritas e desenhos de projeto cedidas pela Câmara Municipal do Barreiro onde foi possível constatar as cotas de entrada e de saída na bacia bem como toda a restante informação relativa à geometria, área de implantação da bacia e zona envolvente.

Na Figura 19 pode ver-se a representação gráfica do modelo desenvolvido em ambiente SWMM e no qual foram inseridas todas as informações referidas ao longo deste Capítulo.



Figura 19 – Representação gráfica do modelo desenvolvido em ambiente SWMM

5.7.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO PARA DIFERENTES CENÁRIOS FUTUROS

A construção do modelo para avaliação do impacto das alterações climáticas, e para os diferentes cenários futuros, baseou-se na informação constante no relatório de previsão de eventos extremos elaborado por Monjo *et al.* (2018), para a região de Lisboa.

Na Figura 20 pode ver-se as alterações máximas para eventos climáticos extremos para essa região, onde o centro representa o estado atual e o limite corresponde a um aumento de 100% para todas as variáveis, exceto para dias de ondas de calor, onde o limite corresponde a um aumento de 1000%, para maré de tempestade onde este corresponde a mais 100 cm a e temperatura extrema, onde corresponde a mais 10 ° C. As linhas a negrito representam o cenário médio e a área sombreada corresponde à região de incerteza, de 5 a 95% (Monjo *et al.*, 2018).

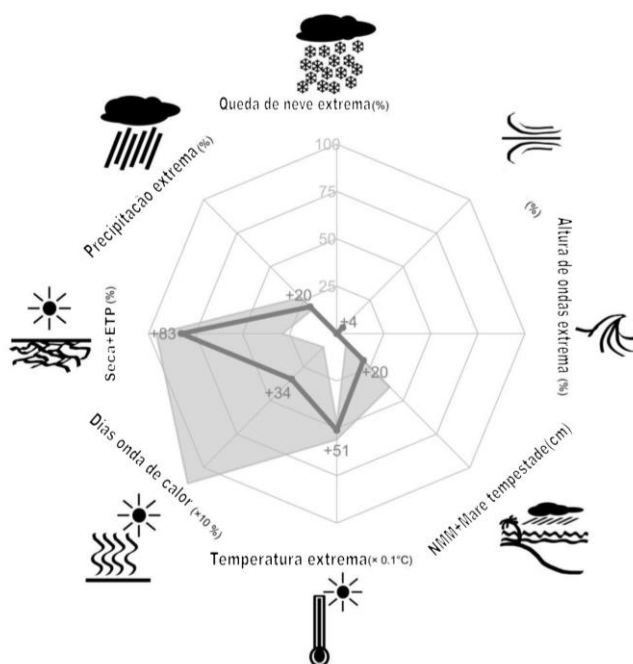


Figura 20 – Alterações máximas para eventos climáticos extremos ao longo o para períodos de retorno entre 2 e 100 anos. (Adaptado de Monjo *et al.*, 2018)

Na construção do modelo consideraram-se as alterações previstas em eventos extremos de precipitação de curta duração, onde se prevê uma tendência de aumento moderado, de 40mm para 45mm no periodo de 2041-2070 e que chega aos 47mm no periodo de anos entre 2071-2100, para um periodo de retorno de 100 anos. Isto corresponde a um aumento de cerca de 10% e 20% a meio e no final do século XXI respetivamente.(Monjo *et al.*, 2018)

Na Figura 21 ilustra-se os cenários de alterações em eventos extremos de precipitação horária para a região de Lisboa, para períodos de retorno de 2, 10 e 100 anos e para três períodos temporais futuros: 2011- 2040, 2041-2070 e 2071-2100, em relação ao período de referência 1986- 2015, na primeira coluna.

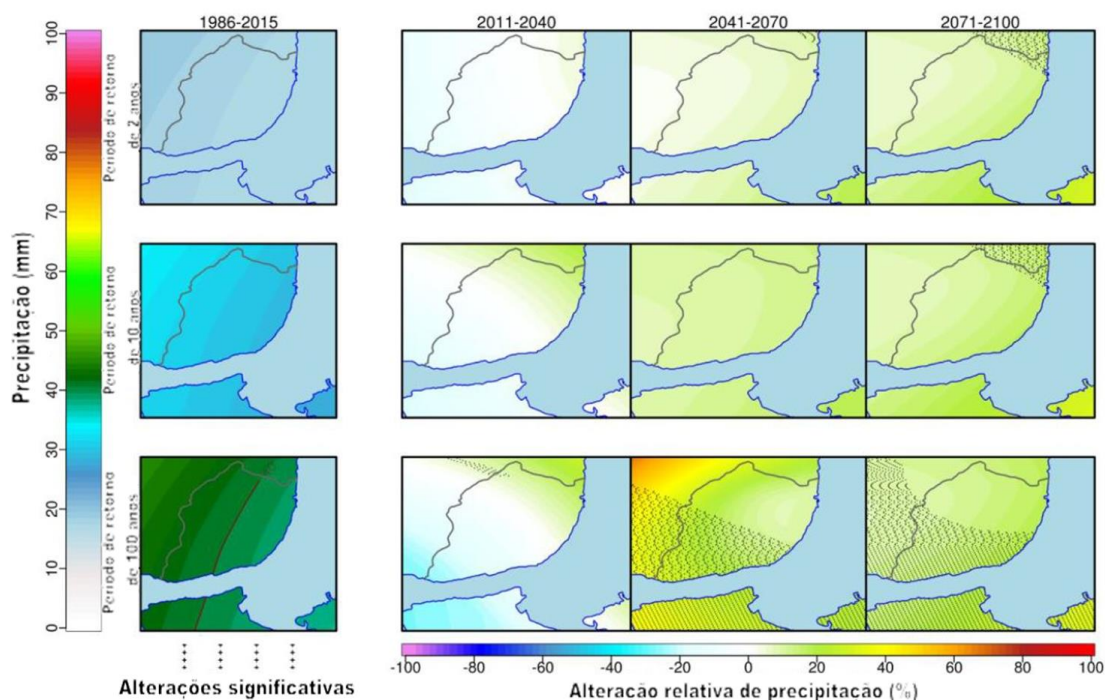


Figura 21 – Cenários médios multi-modelo de alterações em eventos extremos de precipitação horária para a região de Lisboa (Adaptado de R. Monjo *et al.*, 2018)

Tabela 11 – Previsões de alteração relativa de precipitação horária para eventos extremos em Lisboa (Adaptado de (Monjo *et al.*, 2018))

Período de retorno (Anos)	Alteração relativa (%)		
	2011-2040	2041-2070	2070-2100
2	8	10	14
10	7	14	17
100	8	15	19

Com base nos dados apresentados na Tabela 11 majorou-se o hietograma criado previamente de forma a ter-se em consideração a previsão de aumento relativo da

intensidade de precipitação. Considerou-se este parâmetro como o mais relevante para o estudo uma vez que este influenciará diretamente o funcionamento do sistema de drenagem pluvial, ao estar intrinsecamente ligado à quantidade de água que a ele aflui.

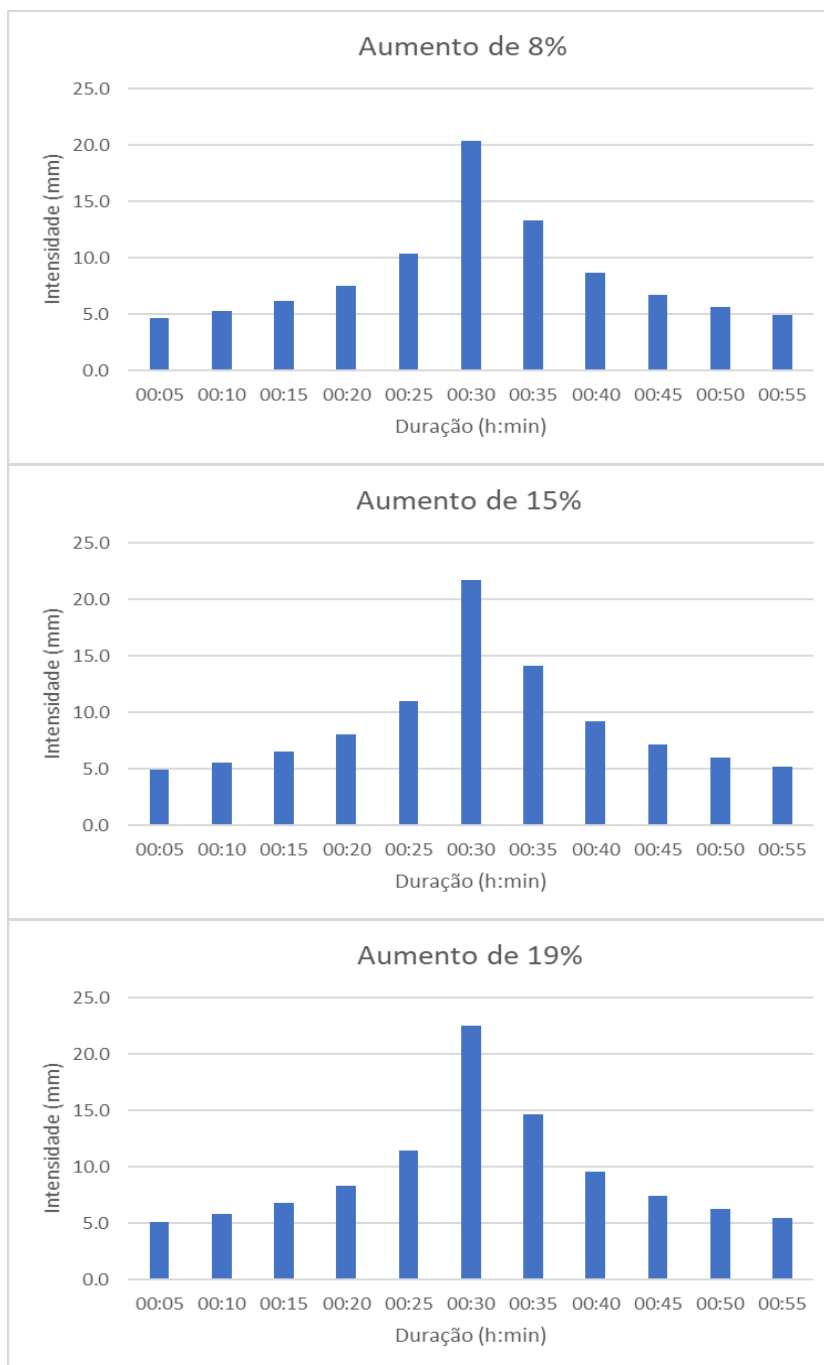


Figura 22 - Hietogramas obtido através do método dos blocos alternados para um período de retorno de 100 anos considerando a intensidade prevista para os vários cenários futuros.

De forma a analisar a influência que o nível da maré terá no sistema de drenagem pluvial em estudo consultaram-se as Tabelas de Marés do Instituto Hidrográfico (Tabela 12). O zero hidrográfico (ZH) por definição é a cota em relação à qual são referidas as previsões de altura de maré que são publicadas nas Tabelas de Marés do Instituto Hidrográfico. Nas cartas portuguesas situa-se abaixo do nível da maré astronómica mais baixa, para que as previsões de altura de maré sejam sempre positivas. Em Portugal continental o ZH. está estabelecido 2,00 m abaixo do nível médio do mar adotado (NMA), sendo caso de exceção o porto de Lisboa onde se considera o valor de 2,08 m (Instituto Hidrográfico,2020).

Tabela 12 – Elementos de Marés (Instituto Hidrográfico, 2020)

PORTO	PMmáx.	mês	dia	hora	min	PMAV.	PMAM.	NM.	BMAM.	BMAV.	BMmin.	mês	dia	hora	min
VIANA DO CASTELO	3.84	3	30	3	44	3.47	2.66	2.00	1.33	0.53	0.20	3	30	9	57
LEIXÕES	3.86	3	30	3	46	3.48	2.66	2.00	1.35	0.52	0.21	3	29	9	17
AVEIRO	3.65	3	30	4	9	3.33	2.63	2.00	1.38	0.63	0.35	3	29	9	17
FIGUEIRA DA FOZ	3.83	3	30	3	47	3.45	2.66	2.00	1.36	0.53	0.24	3	29	9	12
PENICHE	3.83	3	30	3	32	3.45	2.66	2.00	1.36	0.57	0.24	3	29	9	3
CASCAIS	3.84	3	30	3	22	3.48	2.70	2.08	1.48	0.69	0.37	3	30	9	31
LISBOA	4.14	10	7	15	50	3.79	2.95	2.20	1.46	0.62	0.27	3	29	9	28
SESIMBRA	3.71	3	30	3	20	3.39	2.62	2.00	1.39	0.63	0.26	3	30	9	30
SETÚBAL	3.78	3	30	3	54	3.45	2.67	2.00	1.35	0.53	0.23	3	30	10	1
SINES	3.75	3	30	3	20	3.39	2.62	2.00	1.38	0.62	0.30	3	29	8	50
LAGOS	3.79	3	30	3	11	3.44	2.64	2.00	1.38	0.56	0.27	3	29	8	40
FARO-OLHÃO	3.71	3	30	3	32	3.37	2.63	2.00	1.38	0.56	0.22	3	30	9	25
VILA REAL S. ^{TO} ANTÓNIO	3.83	10	7	15		3.39	2.64	2.00	1.39	0.64	0.37	3	1	10	5

Na análise à secção de referência, expressa na Tabela 13, observou-se na o valor da altura de água máxima que se prevê que possa ocorrer devido à maré astronómica ou seja a preia-mar máxima (PMmáx), a cota altimétrica a que se encontra o local de descarga da bacia de retenção para a Vala das Ratas e ainda a cota do zero hidrográfico, de forma a uniformizar o referencial distinto utilizado nos valores anteriores, obtendo-se então um valor de altura disponível de 0.3m, o que indica que, considerando apenas estes fatores, a maré não teria influência neste sistema.

Tabela 13 – Análise da influência das marés na secção de referência à saída da bacia de retenção

Análise Marés	
Cota de saída para a vala (m)	2,4
PMmáx Lisboa (m)	4,1
Zero Hidrográfico (m)	2,1

Altura disponível (m) 0,3

Contudo, é previsível, a incapacidade da rede em efetuar a descarga eficaz no meio recetor, dada a altimetria reduzida da secção da vala a jusante. Existe registo deste acontecimento a jusante da bacia de retenção, nos momentos em que coincide um episódio de precipitação forte e continuada com a preia-mar, no entanto não se procederá a uma análise detalhada do mesmo no âmbito deste trabalho.

5.8 DIAGNÓSTICO DO SISTEMA

5.8.1 RESULTADOS PARA A SITUAÇÃO ATUAL

Depois de criada e executada a simulação para o evento extremo de precipitação de duração determinada e baseado no hietograma pelo método dos blocos alternados que por sua vez foi criado para um tempo de retorno de 100 anos, obtiveram-se os valores de escoamento em metros cúbicos por segundo para cada uma das sub-bacias que se podem verificar na Figura 23. Estes valores são coerentes com o caudal escoado, a jusante, na Figura 24 que ilustra o escoamento nas tubagens que garantem a ligação da bacia de retenção à vala das ratas. Ainda na figura 22, pode-se observar que, como seria expectável, o caudal escoado em cada sub-bacia aumenta em função da sua respetiva área.

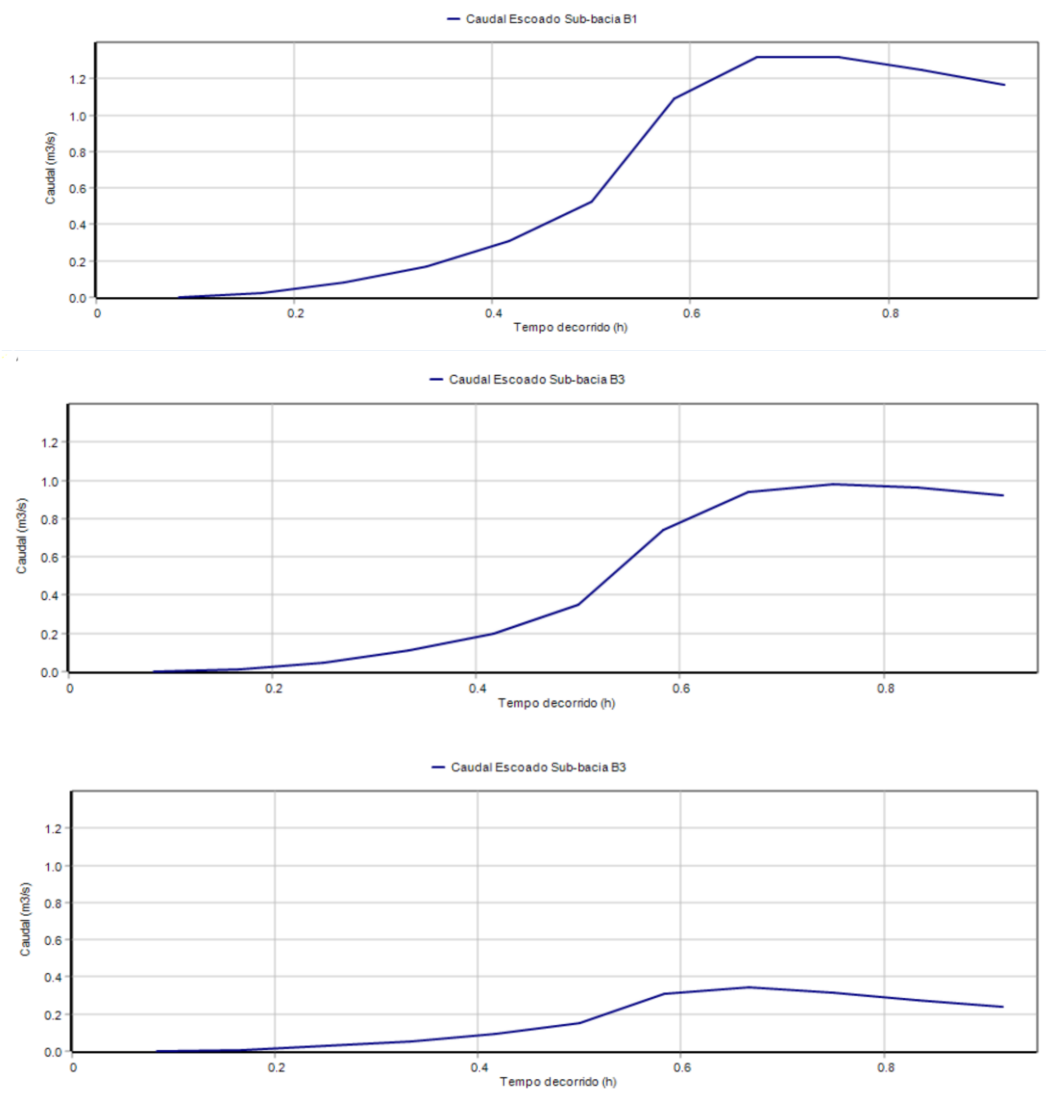


Figura 23 – Escoamento gerado pelo evento de precipitação com período de retorno de 100 anos para cada uma das sub-bacias hidrográficas que drenam para a bacia de retenção

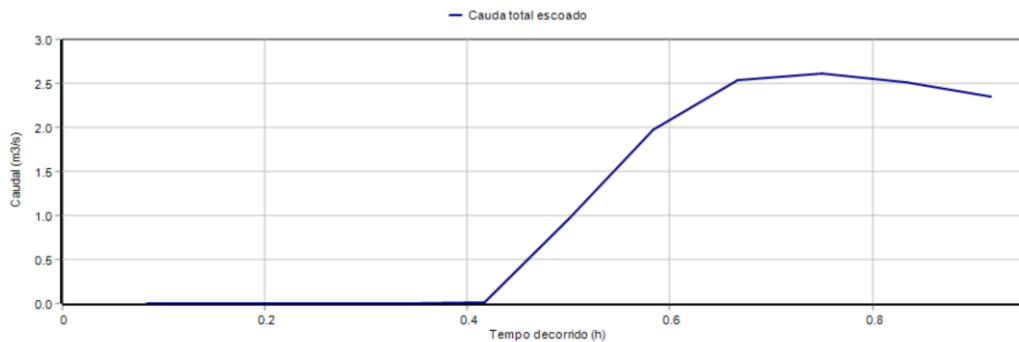


Figura 24 - Cauda total escoado nas tubagens de ligação entre a bacia de retenção e a vala das Ratas para cada momento da simulação

Para realizar o diagnóstico do sistema para a situação atual extraiu-se informação do modelo SWMM na forma gráfica relativamente à profundidade de água no nó representativo da bacia de retenção, de forma a avaliar se aqui ocorre algum fenómeno de inundação.

Foi possível verificar que o nível máximo de água é atingido a cerca de 40 minutos da simulação e ronda os 3,73 m (somando 1 m aos 2,73 m da cota de soleira da bacia) o que garante o correto funcionamento do sistema em todos os momentos da simulação, caso esteja garantido que as tubagens a jusante possuem capacidade de vazão de todo o caudal que aflui à bacia.

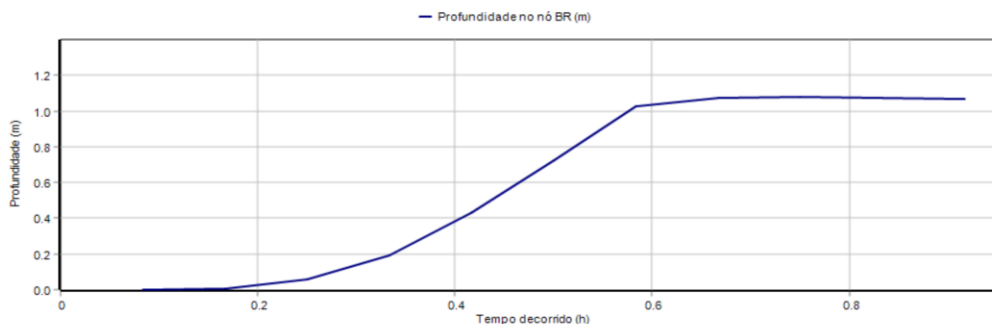


Figura 25 - Profundidade de água no nó que representa a bacia de retenção em função do tempo decorrido na simulação em ambiente SWMM

De igual forma, na Figura 26 observa-se a altura de água no perfil longitudinal entre a bacia de retenção (BR) e a Vala das Ratas (VR), obtida para o instante $t=40$ min, e é possível constatar o correto funcionamento do sistema face a uma chuvada gerada a partir das curvas IDF atuais, para um período de retorno de 100 anos.

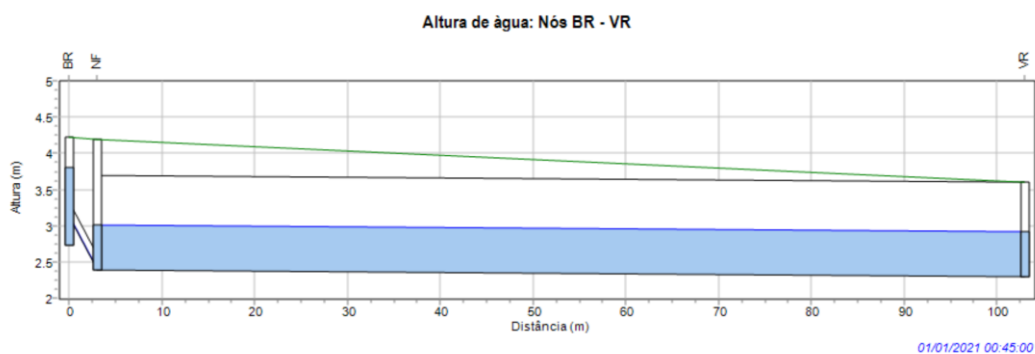


Figura 26 – Altura de água entre a bacia de retenção e a Vala das Ratas

5.8.2 RESULTADOS PARA OS DIFERENTES CENÁRIOS FUTUROS

Neste ponto apresentam-se os resultados obtidos através de simulações para três cenários distintos nos quais se considerou o mesmo período de retorno, 100 anos, e diferentes cenários de aumentos de precipitação para eventos extremos de curta duração, em diferentes horizontes temporais. De referir que também se considerou, arbitrariamente neste caso, um aumento da área impermeável da bacia hidrográfica de 0,1% por ano.

Cenário 1

No primeiro caso de simulação de evento futuro considerou-se para um horizonte temporal compreendido entre 2021-2040 um aumento relativo de precipitação de 8% e ainda um aumento da área total impermeável em 2%, como referido anteriormente na taxa de +0,1% ao ano.

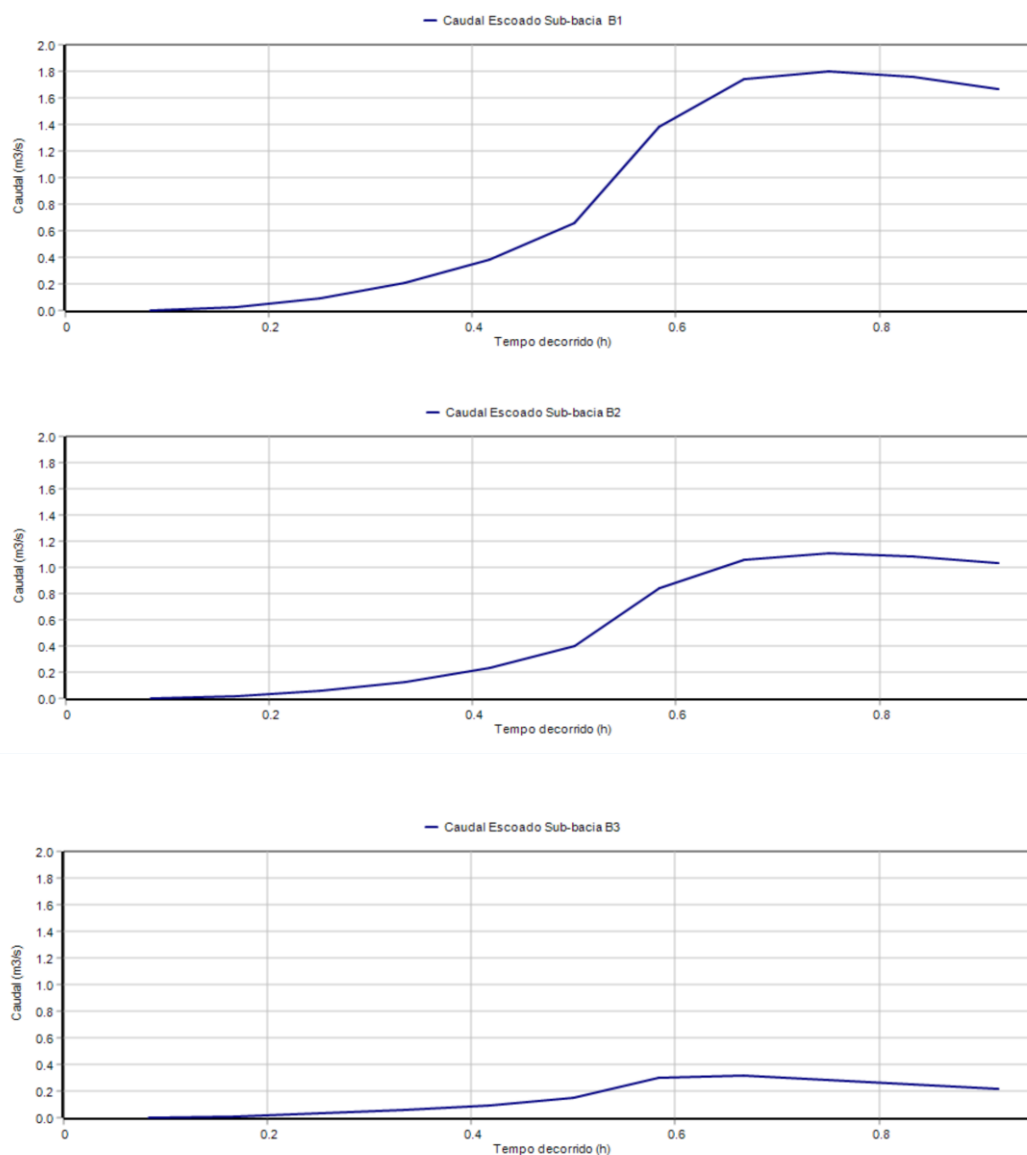


Figura 27 – Escoamento gerado em cada uma das sub-bacias hidrográficas

Obtiveram-se os resultados que se podem observar nas Figuras 26 ,27, 28 e 29 para o caudal gerado pelo evento de precipitação em cada sub-bacia, caudal total gerado, profundidade de água na bacia de retenção para o perfil de elevação de água no sistema no momento mais desfavorável, respetivamente. De referir que se verifica o expectável aumento do caudal escoado em cada uma das sub-bacias.

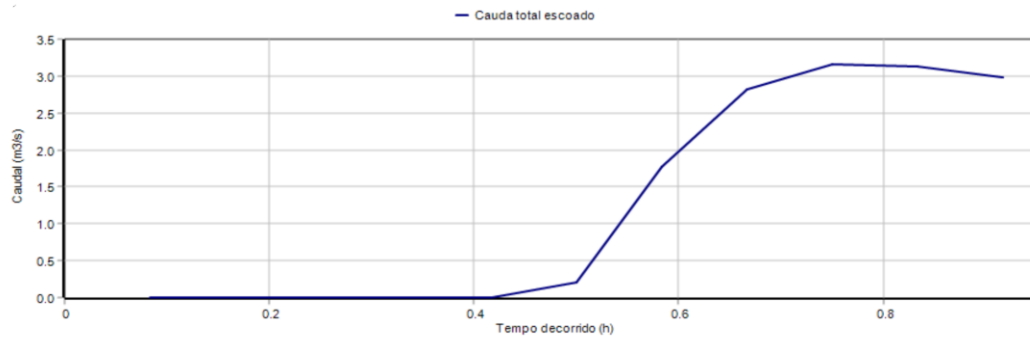


Figura 28 – Caudal total escoado nas tubagens de ligação entre a bacia de retenção e a vala das Ratas para cada momento da simulação

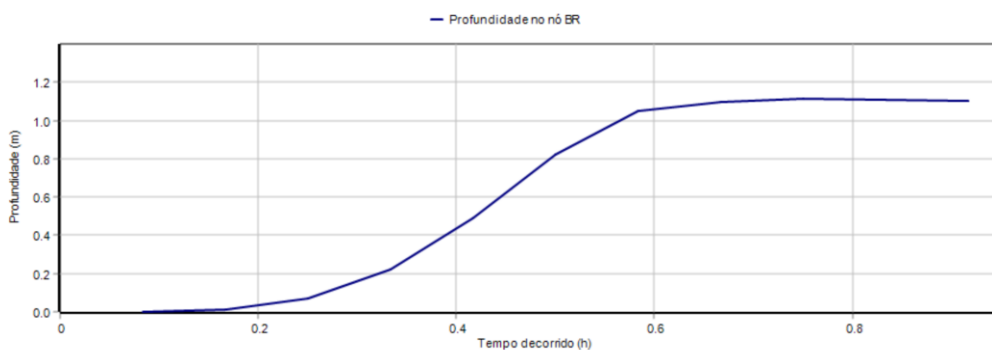


Figura 29 – Profundidade de água no nó que representa a bacia de retenção em função do tempo decorrido na simulação em ambiente SWMM

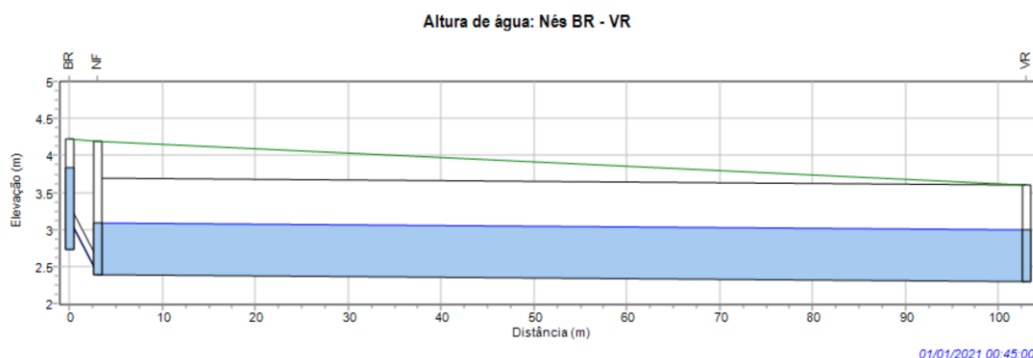


Figura 30 – Altura de água entre a bacia de retenção e a Vala das Ratas

Cenário 2

No segundo caso de simulação de evento futuro considerou-se para um horizonte temporal compreendido entre 2041-2070 um aumento relativo de precipitação de 15% e ainda um aumento da área total impermeável em 5%, como referido anteriormente na taxa de +0,1% ao ano.

Obtiveram-se os resultados que se podem observar nas Figuras 30,31, 32 e 33 para o caudal gerado pelo evento de precipitação em cada sub-bacia, caudal total gerado, profundidade de água na bacia de retenção para o perfil de elevação de água no sistema no momento mais desfavorável, respetivamente.

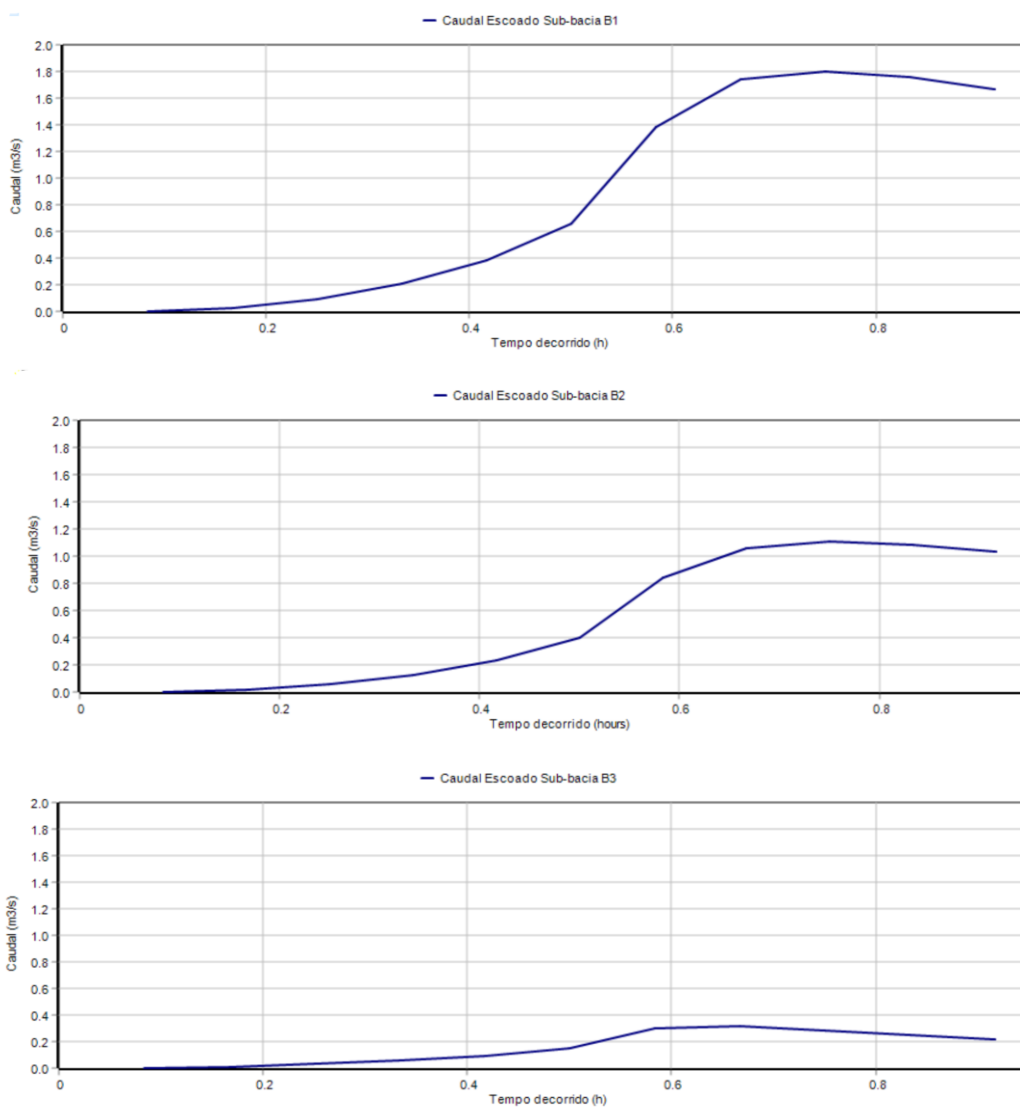


Figura 31 – Escoamento gerado em cada uma das sub-bacias hidrográficas

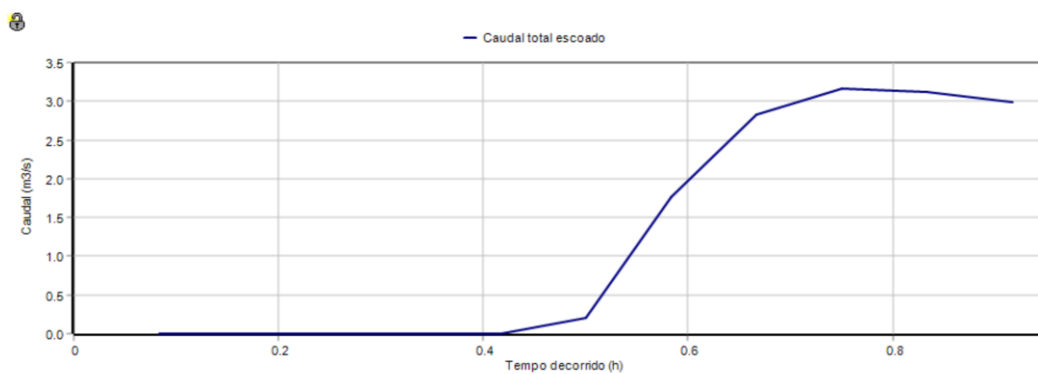


Figura 32 – Caudal total escoado nas tubagens de ligação entre a bacia de retenção e a vala das Ratas para cada momento da simulação

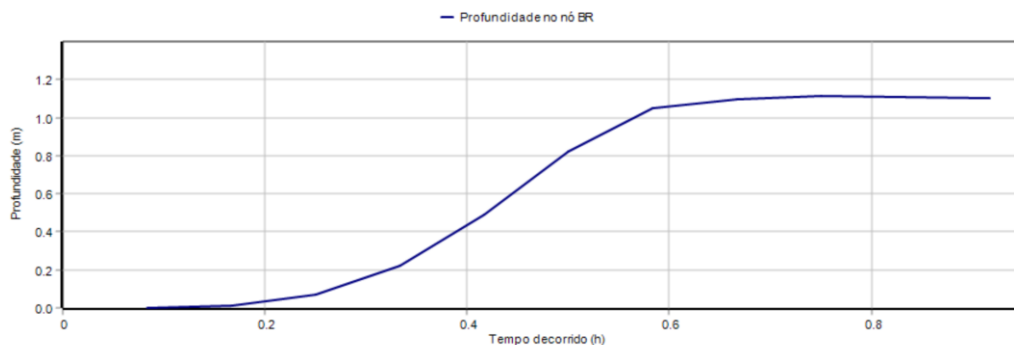


Figura 33 – Profundidade de água no nó que representa a bacia de retenção em função do tempo decorrido na simulação em ambiente SWMM

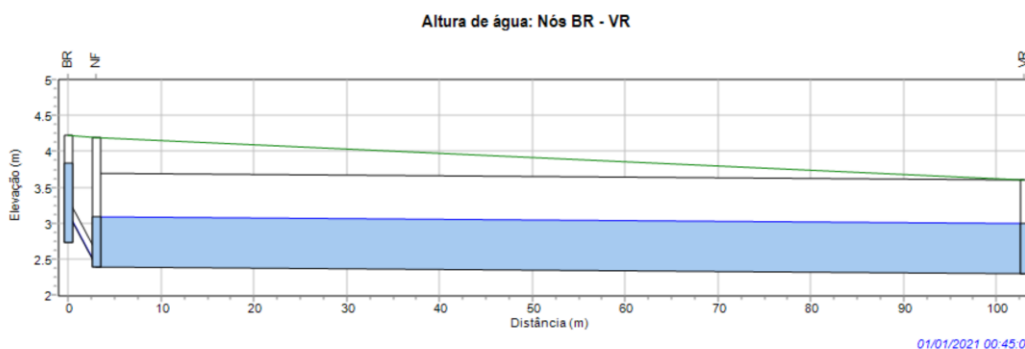


Figura 34 – Altura de água entre a bacia de retenção e a Vala das Ratas

Cenário 3

Por último, considerou-se para um horizonte temporal compreendido entre 2071-2100 um aumento relativo de precipitação de 19% e ainda um aumento da área total impermeável de 8%, tal como nos outros dois casos com um aumento arbitrário de 0,1% ao ano.

Ilustra-se nas Figuras 34,35, 36 e 37 o caudal gerado pelo evento de precipitação em cada sub-bacia, o caudal total gerado, profundidade de água na bacia de retenção e o perfil de elevação de água no sistema no momento mais desfavorável, respetivamente

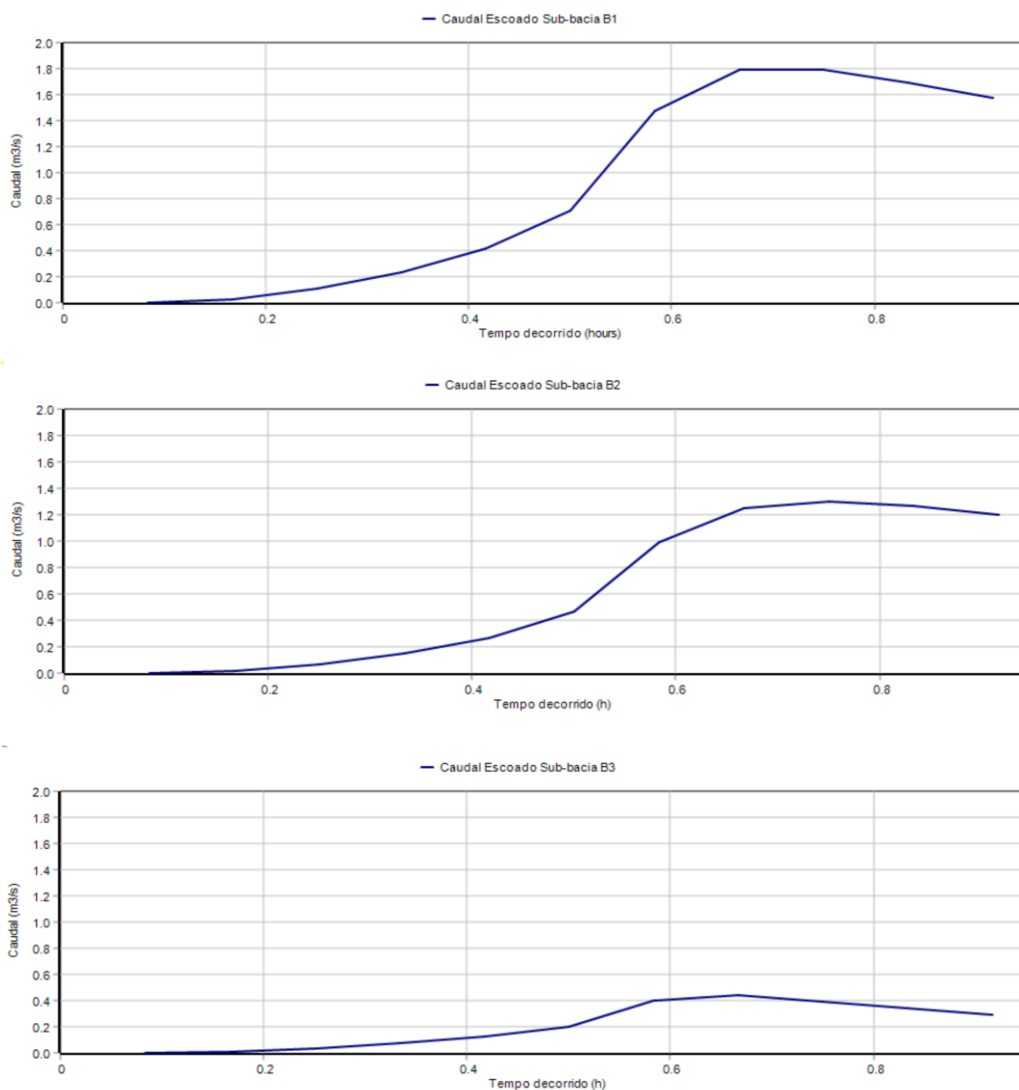


Figura 35 - Escoamento gerado em cada uma das sub-bacias hidrográficas

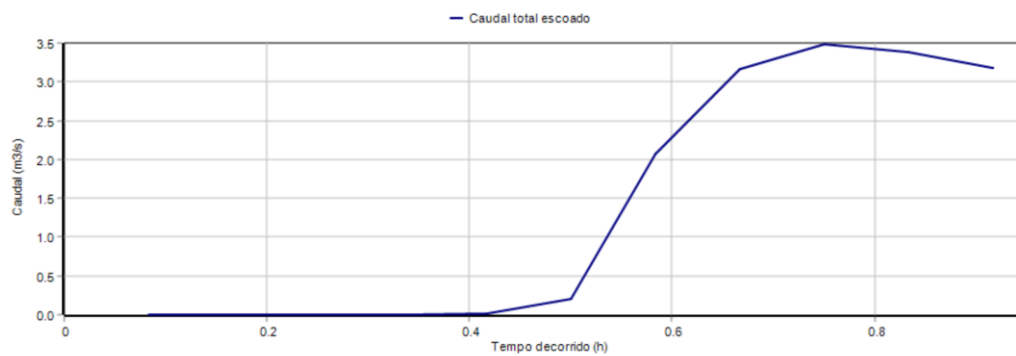


Figura 36 - Caudal total escoado nas tubagens de ligação entre a bacia de retenção e a vala das Ratas para cada momento da simulação

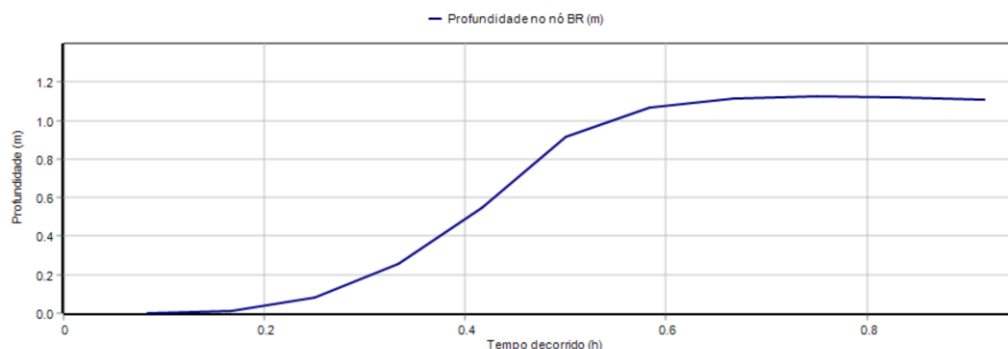


Figura 37 - Profundidade de água no nó que representa a bacia de retenção em função do tempo decorrido na simulação em ambiente SWMM

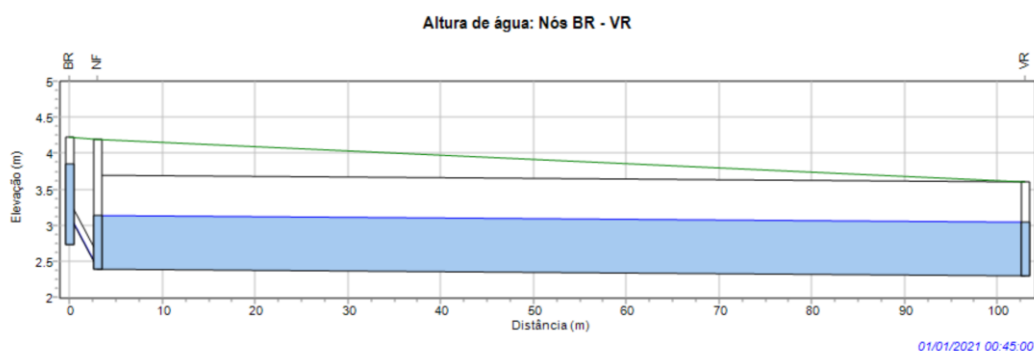


Figura 38 – Altura de água entre a bacia de retenção e a Vala das Ratas

5.8.3 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Conforme é possível constatar, na Tabela 14, quando somado o impacto das alterações previstas na intensidade de precipitação ao aumento de área impermeável da bacia hidrográfica.

Tabela 14 – Comparação dos resultados obtidos para os 3 cenários

Indicador/Caso	Atual	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Caudal escoado (m ³ /s)	2,6	3,2	3,3	3,5
Altura de água na bacia (m)	1,1	1,15	1,15	1,15
Altura de água no coletor de saída (m)	0,6	0,7	0,7	0,7

Verifica-se uma tendência de aumento expectável do caudal escoado, de 0,9 m³/s no caso mais desfavorável, ou seja, no caso com horizonte temporal mais distante, 2100.

Relativamente aos outros dois indicadores, constata-se que se mantêm inalterados. Este facto pode indicar que, tal como na simulação do evento extremo de curta duração de projeto para o momento presente, o sistema da bacia de retenção e coletores que drenam para a vala do Lavradio a jusante, mantém-se funcional e sem apresentar problemas relacionados com a falta de capacidade hidráulica do sistema, nomeadamente inundações. Apesar de inicialmente se ter considerado que existia a possibilidade de, face às maiores solicitações, nomeadamente ao maior caudal escoado, às quais o sistema estaria sujeito no futuro, a ocorrência de inundações na zona da bacia de drenagem, os resultados das simulações realizadas indicam exatamente o oposto e, por conseguinte, o próximo capítulo deste trabalho que seria dedicado ao estudo e idealização de recomendações de soluções de melhoria, a partilhar com a entidade gestora, carece de fundamentação à sua realização. De facto, segundo registo da entidade gestora, constatou-se que a área da bacia de drenagem em si não é um ponto problemático, ou de ocorrência de inundações, apesar da ocorrência de inundações na zona da rotunda imediatamente adjacente a esta. Conclui-se, portanto, que estas inundações não estarão à partida relacionadas com qualquer incapacidade do sistema de drenagem pluvial em escoar a água proveniente de montante da bacia de retenção, mas estará, eventualmente, relacionada com a drenagem de água à superfície, pela IC21 e outras ruas.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

O objetivo principal desta dissertação foi o estudo e a identificação do impacto das alterações climáticas na bacia de drenagem do Lavradio/Vala das Ratas, avaliando a sua magnitude e identificando possíveis soluções aos problemas identificados no decorrer dessa mesma avaliação, de forma a minimizar o seu impacto. Para conseguir este objetivo, recorreu-se à modelação hidráulica do Sistema a montante da bacia de retenção/órgão desarenador, bem como dos coletores que descarregam o caudal pluvial para a vala a céu aberto, localizada a jusante.

De referir que no decorrer deste trabalho surgiram algumas limitações no que diz respeito aos dados disponíveis, por exemplo o facto de não se dispor de dados provenientes de um udómetro na área da bacia hidrográfica em estudo, e de um medidor de nível na bacia o que possibilitaria uma calibração do modelo e análise dos resultados para um evento extremo de precipitação com um maior nível de rigor e aproximação a um evento real.

Contudo, considera-se que se conseguiu alcançar os objetivos preconizados numa fase inicial deste trabalho, nomeadamente, no diagnóstico do funcionamento do sistema e o impacto que as alterações climáticas poderão ter no futuro.

De uma forma global, o sistema das sub-bacias hidrográficas, da bacia de retenção e coletores que drenam para a vala a céu aberto apresentam uma capacidade que superou as expectativas não se prevendo que, devido às alterações nos padrões de precipitação expectáveis para o futuro, este sistema esgote a sua capacidade de drenagem não estando, portanto propenso à ocorrência de inundações.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendação para trabalhos futuros propõe-se a análise, através da modelação matemática, do sistema de drenagem pluvial do Lavradio a jusante da bacia de retenção, para que se consiga desse modo melhor compreender a interação entre jusante e montante e os efeitos que daí possam advir.

Integrada com a primeira recomendação sugere-se ainda como possível desenvolvimento futuro a modelação da curva de marés associada à realização de uma análise mais detalhada da previsível subida do nível médio do mar e suas consequências no sistema,

visto que a Vala das Ratas descarrega no rio Tejo a uma cota que sofre a influência desse fenómeno.

Por fim, uma outra recomendação de trabalho futuro a desenvolver na mesma área geográfica, referida pelas técnicas da CMB, passa pela modelação matemática do escoamento superficial afluente à rotunda adjacente à bacia de retenção, onde se regista a ocorrência de inundações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Batista, J., & Boldrin, A. (2018). Avaliação do desempenho hidráulico de um sistema de drenagem de águas pluviais urbanas . *Eng Sanit Ambient*, 23(2).
- Brandão, C., Rodrigues, R., & Costa., J. P. (2001). *Análise de fenómenos extremos precipitações intensas em Portugal continental* . Lisboa: Direção dos serviços de recursos hídricos.
- Bugalhão, J., & Teixeira, A. (2015). Os canos da Baixa de Lisboa no século XVI: leitura. *Cadernos do Arquivo Municipal 2ª Série Nº 4*, pp. 89 - 122.
- Burian, S. J. (2001). Developments in water supply and wastewater management in the United States during the 19th century. Em *Water Resources Impact* (pp. 14-18).
- Burian, S. J., & Edwards, F. G. (2002). Historical Perspectives of Urban Drainage.
- Butler, D., & Davies, J. W. (2004). *Urban Drainage*. London: Spon Press.
- Cambez, M., Pinho, J., & David, L. (2008). Modelação matemática de um sistema de drenagem urbana com o SWMM.
- Cardoso, M. (2008). *Avaliação do desempenho de sistemas de drenagem pluvial*. LNEC.
- Cardoso, M., Brito, R., Almeida, M., & Beceiro, P. (2015). Modelação integrada da drenagem urbana em zonas estuarinas : Avaliação da inundação para cenários climáticos. *MOLINES*, p. 15.
- Chocat, B., Krebs, P., Marsalek, J., Rauch, W., & Schilling, W. (2001). Urban drainage redefined: from stormwater removal to integrated management. *Water Science and Technology Vol. 43* , pp. 61-68.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology* . McGraw Hill.
- CMB, & Engidro. (2010). Plano geral de águas e saneamento do concelho do Barreiro . *Relatório 3 - Documento síntese do plano geral*.
- Correia, F. N. (1984). *Alguns procedimentos adotados pelo Soil Conservation Service para o estudo do impacto da urbanização nos caudais de cheia*. Lisboa: LNEC.
- David, L. M. (2003). Gestão das águas pluviais urbanas: passado, presente e desafios para o séc. XXI . *Pedra & Cal nº18*, pp. 18-19.
- Decreto Regulamentar nº23/95, de 23 de agosto. (1995). *Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais*.
- Dias, J. A., & Taborda, R. P. (1998). Evolução recente do nível médio do mar em Portugal. *Anais do Instituto Hidrográfico Nº9*, pp. 83-97.

- Dunn, R. J., Stanitski, D. M., Gobron, N., & Willett, K. M. (Agosto de 2020). State of the climate in 2019. *Special Online Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(8).
- EC, E. C. (Abril de 2013). *Climate change impacts on water systems*. Obtido de www.oecd.org/env/resources
- EEA, E. E. (2017). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe - An indicator based report*. Luxembourg.
- Hill, D. (1984). *A history of engineering in classical and medieval times*. London: Croom Helm Ltd.
- IPCC. (2013). *Climate Change The Physical Science Basis* . Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kiparsky, M., Milman, A., & Vicuña, S. (2012). Climate and Water: Knowledge of impacts to action on adaptation.
- Kirby, R., & Laurson, P. (1932). The early years of modern civil engineering. *Yale University Press*, pp. 227-239.
- Kirshen, P., Caputo, L., Richard M. Vogel, P. M., Rosner, A., & Renaud, T. (2015). *Adapting Urban Infrastructure to Climate Change; A Drainage Case Study* . USA: ASCE.
- Kirshen, P., Merrill, S., & Slovinsky, P. (2012). *Simplified Method for Scenario-Based Risk Assessment Adaptation Planning in the Coastal Zone*.
- Lencastre, A., & Franco, F. (1992). *Lições de Hidrologia*. Lisboa: Universidade Nova - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Lima, J. P., Marques, A. S., Sousa, J., Simões, N. E., & Pina, R. (2013). *Hidrologia urbana*. Lisboa: ERSAR/Universidade de Coimbra.
- Machado, F. M. (2013). *Modelação Hidráulica de Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentavel*. Departamento de Engenharia Civil - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra .
- Marsalek, J., Jiménez-Cisneros, B., Malmquist, P., Karamouz, M., Goldenfum, J., & Chocat, B. (2006). *Urban water cycle processes and interactions*. Paris: UNESCO.
- Matos, J. d. (2003). *Aspetos históricos e actuais da evolução da drenagem de águas residuais em meio urbano*. Lisboa: Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura do Instituto Superior Técnico.
- Milly, P., Betancourt, J., Hirsch, R., & Falkenmark, M. (2008). Stationarity Is Dead: Whither Water Management?
- Ministério da Defesa Nacional; Marinha; Instituto Hidrográfico. (2020). *Tabela de Marés 2021- Volume I. Capítulo 3 - Informação suplementar sobre marés*. Lisboa, Portugal.

- Pato, J. H. (2011). *História das políticas públicas de abastecimento e saneamento de águas em Portugal*. Lisboa: ERSAR.
- Pinto, L., & Pinheiro, S. (2006). *Orientações básicas para drenagem urbana*. Belo Horizonte : Fundação Estadual do Meio Ambiente .
- Portela, M. M., & Hora, G. R. (2002). Aplicação da fórmula racional à análise de cheias em Portugal Continental: Valores do coeficiente C. *6º Congresso da Água*.
- Portela, M. M., Silva, A. T., & Melim, C. P. (2000). O efeito da ocupação urbana nos caudais de ponta de cheias naturais em pequenas bacias hidrográficas . *5º Congresso da Água - A água e o desenvolvimento sustentável: Desafios para o novo século* . Lisboa.
- Portela, M., Marques, P., & Carvalho, F. (2000). Hietogramas de projeto para a análise de cheias baseada no modelo do hidrograma unitário do Soil Conservation Service. *5º Congresso da Água. A água e o desenvolvimento sustentável: Desafios para o novo século*. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos.
- R. Monjo, C. P. (2018). Deliverable D1.3 Report on extreme events prediction. *Resilience to cope with climate change in urban areas* .
- Revi, A., Satterthwaite, D. E., Aragón-Durand, F., Corfee-Morlot, J., Kiunsi, R. B., Pelling, M., Solecki, W. (2014). Urban areas. Em IPCC, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (pp. 535-612). Cambridge, United Kingdom and New York: .Cambridge University Press,.
- Rossmann, L. (2007). *Stormwater Management Model User's Manual, Version 5.0*.
- Sécio, H. (2012). *Fundamentos para a integração em estruturas ecológicas das linhas de água que drenam o concelho do Barreiro*. Lisboa: Instituto de Geografia e de Ordenamento do Território - Universidade de Lisboa .
- Shahidian, S., Guimarães, R., Rodrigues, C., Chambel, A., Alexandre, C., Santos, F., . . . Coelho, R. (2017). *Hidrologia Agrícola*. Évora: Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade de Évora.
- Snover, A., Binder, L., Kay, J., Sims, R., Lopez, J., Willmott, E., . . . Strickler, A. (2007). Preparing for climate change. *A guidebook for local, regional and State Governments* . Center for science in the Earth system.
- Temez, J. R. (1978). *Calculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Dirección General de Carreteras.
- Tucci, C. (1997). *Água no meio urbano*. Rio Grande do Sul: Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

Vogel, J. M., & Smith, J. B. (2010). Climate Change Vulnerability Assessments: A Review of Water Utility Practices. US EPA.