



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Avaliação do impacto das alterações climáticas nos sistemas de drenagem em meios urbanos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

Autor

Sara Maria Ferreira Lopes Dias

Orientador

Nuno Eduardo da Cruz Simões

José Alfeu Almeida Sá Marques

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, julho, 2014

AGRADecIMENTOS

Este espaço é dedicado àqueles que deram a sua contribuição para que esta dissertação fosse realizada. A todos eles deixo o meu mais sincero agradecimento.

Ao Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões e ao Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques, meus orientadores, pela dedicação, incentivo, disponibilidade permanente, atenção pelo individual e conselho oportuno.

Ao Engenheiro Telmo Paula, pela grande ajuda na elaboração dos mapas de zonas inundáveis e nos mapas de risco.

Aos Engenheiros Pedro Garret e M. Carmen Casas Castillho pela disponibilização de informação relativa ao estudo da influência das alterações climáticas nas curvas IDF, e nos sistemas de drenagem urbana.

Um agradecimento muito especial, aos meus pais, por juntamente com as minhas irmãs, me proporcionarem estas aventuras, pelo eterno incentivo à minha formação académica e pessoal.

Ao João Lourenço, pela cumplicidade, e apoio nesta fase tão importante da minha vida.

Aos meus colegas de casa, Dany, Cate, Cris e Diogo, que durante estes seis anos acompanharam, de muito perto, com amizade o meu percurso académico. À Inês por ser a minha fiel companheira. À Diana Pinheiro, por durante este ano me ter acompanhado tão proximamente. À Kika e Neves, que apesar de longe acompanharam todo o meu percurso. Ao resto da minha família, e amigos.

RESUMO

As recentes inundações em todo o mundo mostram a vulnerabilidade dos ambientes urbanos às condições hidrológicas extremas. As inundações e cheias podem resultar do efeito combinado das alterações climáticas e do aumento da urbanização, que originam um aumento de caudais superficiais, dando origem a eventos cada vez mais frequentes, devastadores e dispendiosos (Butler e Davies, 2011). As inundações, em meio urbano, ocorrem essencialmente devido à chuva intensa e à incapacidade do sistema de drenagem para drenar toda a água resultante de precipitação. Em resposta a este problema, a União Europeia elaborou a Diretiva 2007/60/CE relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações. E, mais recentemente, publicou um documento onde é definida a estratégia da União Europeia para a adaptação às alterações climáticas (Paulino e Santos, 2013).

De acordo com o IPCC, 2013, em Portugal, a frequência dos eventos meteorológicos extremos irá aumentar, especialmente no inverno. Espera-se que uma chuvada com um período de retorno de 20 anos ocorra com uma frequência entre 15 e 18 anos, em todos os cenários climáticos e que, por outro lado, a intensidade das chuvadas aumente entre 10% a 20% no período de inverno.

Nesta tese é apresentada uma metodologia para quantificar o impacto das alterações climáticas na drenagem de uma bacia urbana. Utilizou-se o método proposto por Rodríguez *et al* (2014) e os cenários do IPCC 2013, para quantificar o impacto das alterações climáticas nas curvas IDF. Com as novas curvas IDF, o método dos blocos alternado foi usado para gerar as chuvadas de projeto. O efeito das chuvadas foi avaliado usando um modelo de drenagem dual do SWMM. Aplicando a metodologia a uma bacia urbana da cidade de Coimbra. O impacto nas inundações foi avaliado através da elaboração de mapas de zonas inundáveis e de mapas de risco de inundação baseados em curvas de profundidade/custo.

Palavras-chave: Alterações climáticas, drenagem urbana, gestão do risco de inundação, mapas de zonas inundáveis.

ABSTRACT

Recent floods all over the world show the vulnerability of urban environment to the extreme hydrological conditions. Floods and flooding in urban environment occur mainly due to heavy rain and the inability of the drainage system to drain all the water resulting from precipitation. The recent increase of urban floods results from the combined effect of climate change and urbanization and its consequences are devastating and costly (Butler *et al*, 2011). Concerned with this problem, the European Union make the directive 2007/60/CE on the assessment and management of flood risks and recently, it was published a document that defines the Portuguese strategy for adaptation to climate change (Paulino *et al*, 2013).

According to IPCC 2013 in Portugal, the frequency of extreme weather events will increase, especially in winter. It is expected that a rainfall with a current return period of 20 years will have a frequency between 15 and 18 years in all climate scenarios. On the other hand, its intensity will increase about 10% to 20% in winter period.

In this thesis, a methodology is shown to quantify the impact of climate changes in the drainage of a urban catchment. It is used the method proposed by Rodríguez *et al* (2014) and IPCC 2013 scenarios to access the impact of climate changes in IDF curves. With the new IDF curves, the alternating block method was used to generate the design storms. The effect of the storms is evaluated using a SWMM dual-drainage model. The methodology is applied to an urban catchment in Coimbra, Portugal, and the impact of floods is evaluated with floodable areas maps and with flood risk maps based on depth/cost curves.

Keywords: climate change, urban drainage, risk flood management, flood maps.

ÍNDICE

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Estrutura do trabalho.....	2
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Introdução.....	3
2.2	Drenagem Urbana.....	4
2.2.1	Impacto da Urbanização.....	6
2.2.2	Impactos das alterações climáticas na drenagem urbana	7
2.3	Alterações Climáticas	8
2.3.1	Modelos Climáticos	11
2.3.2	Curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) e as Alterações Climáticas.....	16
2.4	Modelação Hidrológica e Hidráulica	20
2.4.1	Introdução.....	20
2.4.2	Águas Pluviais.....	21
2.4.3	Modelos Hidrológicos.....	22
2.4.4	Modelos Hidráulicos.....	26
2.4.5	<i>Software</i> SWMM	31
2.5	Gestão do Risco de Inundação	32
2.5.1	Diretiva 2007/60/CE e D.L. nº 115/2010 – Relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações	32
2.5.2	Cheias em Portugal e no Mundo.....	34
2.5.3	Mapas de Zonas Inundáveis e Mapas de Risco	35
3	Metodologia	41
3.1	Introdução.....	41
3.2	Estudo de Caso	41

3.3	Metodologia para a elaboração de mapas de zonas inundáveis	43
3.3.1	Introdução	43
3.3.2	Alterações Climáticas	44
3.4	Metodologia para a classificação do risco	46
4	Exemplos de Aplicação	49
4.1	Rede de drenagem dual – Estudo de Caso	49
4.1.1	Localização 1 – Coletor localizado na Praça da República – T = 100 anos	50
4.1.2	Localização 2 – Coletor localizado em frente ao Avenida – T =100 anos.....	51
4.1.3	Localização 3 – Mercado Municipal – T=100 anos	51
4.1.4	Localização 4 – Rede de escoamento superficial – Caudal – Praça 8 de Maio, Praça da República, Avenida e Mercado Municipal.....	52
4.2	Mapas de zonas inundáveis	56
4.3	Mapas de risco de inundação.....	64
5	Conclusões e trabalhos futuros.....	71
5.1	Conclusões.....	71
5.2	Trabalhos Futuros.....	72
6	Referências Bibliográficas	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Hidrogramas: natural, após a construção da urbanização e após medidas corretivas (adaptado de Marques <i>et al</i> , 2013).....	7
Figura 2.2 – Simplificação do balanço energético da terra que ilustra o aumento do efeito de estufa resultante das emissões antropogénicas de gases de efeito de estufa (Adaptado Garret, 2013).	9
Figura 2.3 – Temperatura anual média global da atmosfera à superfície representada relativamente ao valor médio do período de 1961 a 1990 (IPCC).	10
Figura 2.4 – Aspetos envolvidos na análise dos impactos das alterações climáticas na hidrologia urbana (adaptado Willems <i>et al</i> , 2013).....	12
Figura 2.5 – Novos cenários climáticos RCPs (Adaptado IPCC, 2013).	14
Figura 2.6 – Projeções das mudanças climáticas na temperatura, para o cenário A1 para as estações do ano na Península Ibérica (adaptado Rodríguez <i>et al</i> , 2005).	15
Figura 2.7 – Projeções de mudanças na precipitação para diferentes cenários, e nas diferentes estações do ano na Península Ibérica (adaptado Rodríguez <i>et al</i> , 2005).	16
Figura 2.8 – Fatores climáticos médios para uma chuvada diária, no período 2033-2065 para os cenários A1B, A2, B1 e B2. As ordenadas representam os fatores climáticos, em abcissas o período de retorno (adaptado Rodriguez <i>et al</i> , 2014).	19
Figura 2.9 – Componentes de um modelo de drenagem urbana (adaptado de Clemens, 2001).....	21
Figura 2.10 – Superfície de armazenamento em função do declive do terreno (adaptado Clemens, 2001).	23
Figura 2.11 – Infiltração de acordo com o Modelo de Horton.	24
Figura 2.12 – Modelo da Cacata de Nash (Adaptado Clemens, 2001).....	26
Figura 2.13 – Campo de aplicação das equações de Saint-Venant e simplificações (Marques <i>et al</i> , 2013).	29
Figura 2.14 – Sistemas de drenagem a entrar em carga de diferentes modos (adaptado de (Marques <i>et al</i> , 2013)).	29
Figura 2.15 – Fenda de Preissmann (Adaptado Butler e Davies, 2011).	30
Figura 2.16 – Representação esquemática do conceito de drenagem dual (Djordjevic <i>et al</i> , 1999). ..	31
Figura 2.17 – Componentes da gestão dos riscos de inundações.....	33
Figura 2.18 – Abordagem SUDS - Objetivos da drenagem sustentável (adaptado Woods <i>et al</i> , 2007).	34
Figura 2.19 – Exemplo de uma Matriz de Risco de Inundação (Barreiros <i>et al</i> , 2009).	36
Figura 2.20 – Exemplo de um mapa de risco de inundação da bacia hidrográfica do Douro- Rio Febras (adaptado Fernandez, 2012).	37
Figura 2.21 – Exemplo de mapas de zonas inundáveis, e de mapas de risco (Adaptado Moel, 2009). ..	37

Figura 2.22 – Esquema resumo da interação entre as várias componentes do Risco (Adaptado IPCC, 2011).	38
Figura 2.23 – Altura de água – custo dos danos (Penning-Roswell <i>et al</i> , 2005).	39
Figura 2.24 – Altura de água – custo dos danos (Hammond <i>et al</i> , 2012).	40
Figura 3.1 – Praça 8 de Maio, inundada nas cheias de 24/12/2013 e de 21/09/2008 (Retirado de D.C.@, 2013).	42
Figura 3.2 – Área de estudo pormenorizada (adaptado Simões <i>et al</i> , 2010).	43
Figura 3.3 – Esquema da metodologia adotada para a elaboração dos mapas zonas inundáveis.	43
Figura 3.4 – Método dos blocos alternados para T=100 anos, para a situação atual, baixo e alto cenário climático.	44
Figura 3.5 – Curvas IDF Coimbra e Madrid (Adaptado Muñoz <i>et al</i> , 2004).	45
Figura 3.6 – Eventos de precipitação adaptados às alterações climáticas para o cenário climático RCP 8.5, para um período de retorno de 100 anos.	46
Figura 3.7 – Esquema da metodologia utilizada para a elaboração dos mapas de risco.	46
Figura 3.8 – Curva de custos dos danos em função da altura de uso comercial (Adaptado Hammond <i>et al</i> , 2012).	47
Figura 4.1 – Rede de Coimbra com as condutas críticas assinaladas (Adaptado Marques <i>et al</i> , 2013).	49
Figura 4.2 – Caudal obtido para o coletor localizado na Praça da República, para um período de retorno de 100 anos.	50
Figura 4.3 – Caudal obtido para o coletor localizado em frente ao Avenida, para um período de retorno de 100 anos.	51
Figura 4.4 – Caudal obtido para o coletor localizado no Mercado Municipal, para um período de retorno de 100 anos.	51
Figura 4.5 – Caudal junto à Praça 8 de Maio para T=100 anos.	53
Figura 4.6 – Caudal junto à Praça da República para T=100 anos.	54
Figura 4.7 – Caudal junto ao Avenida I para T=100 anos.	54
Figura 4.8 – Caudal junto ao Mercado Municipal para T=100 anos.	55
Figura 4.9 – Variação da altura de água com os diferentes cenários climáticos, à superfície na zona da praça 8 de Maio.	56
Figura 4.10 – Localização da zona crítica na área de estudo de caso – Praça 8 de Maio.	57
Figura 4.11 – Interseções das zonas de acumulação de água com os edifícios na zona crítica de estudo.	58
Figura 4.12 – Mapa de zonas inundáveis para o cenário atual (T de 100 anos).	59
Figura 4.13 – Mapa de zonas inundáveis para o baixo cenário (T de 100 anos).	60
Figura 4.14 – Mapa de zonas inundáveis para o alto cenário RCP 8.5 (T de 100 anos).	61
Figura 4.15 – Mapa de zonas inundáveis para o alto cenário (T de 100 anos).	62
Figura 4.16 – Mapa de risco de inundação expresso em € por edifício, para o cenário atual (T=100 anos).	65
Figura 4.17 – Mapa de risco de inundação expresso em €, por edifício para o baixo cenário (T=100 anos).	66

Figura 4.18 – Mapa de risco de inundação expresso em €, por edifício para o alto cenário RCP 8.5 (T=100 anos).....	67
Figura 4.19 – Mapa de risco de inundação expresso em €, por edifício para o alto cenário (T=100 anos).....	68
Figura 4.20 – Pormenor dos mapas de zonas inundáveis e dos mapas de risco, respetivamente, para o alto cenário e um período de retorno de 100 anos.	69
Figura 4.21 – Custos totais da zona analisada de acordo com os quatro cenários considerados. Percentagem de aumento de custos para cada cenário em relação ao cenário atual.....	70

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Quadro resumo: Tipo de cheias, origem, danos, previsibilidade.....	4
Quadro 2.2 – Vantagens e desvantagens das redes unitárias versus redes separativas (Sousa e Matos, 2001).	5
Quadro 2.3 – Impactos futuros na drenagem urbana (adaptado Willems <i>et al</i> , 2013).....	8
Quadro 2.4 – Descrição dos diferentes cenários climáticos (SRES) (adaptado Willems <i>et al</i> , 2013). ..	13
Quadro 2.5 – Quadro resumo - Variação da Precipitação/ Intensidade com as alterações climáticas, para diferentes cenários climáticos, períodos de retorno e localizações.....	20
Quadro 2.6 – Profundidade média considerando diferentes tipos de revestimento (Adaptado Clemens, 2001).....	22
Quadro 2.7 – Descrição, fiabilidade, tempo de execução dos modelos 1D/1D, e 1D/2D (adaptado Paula, 2013).....	31
Quadro 3.1 – Características das diferentes zonas da bacia hidrográfica da zona de Coimbra (adaptado Marques <i>et al</i> , 2013).....	42
Quadro 4.1 – Percentagem de aumento de caudal, em relação ao cenário atual, nos locais assinalados.	52
Quadro 4.2 – Nº de edifícios inundados de acordo com as classes de alturas de água, na zona de estudo.....	63

ABREVIATURAS

EPA – *Environmental Protection Agency*

GCM – *General Circulation Model*

GEE – Gases do Efeito de Estufa

IDF – Intensidade Duração Frequência

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

PIB – Produto Interno Bruto

RCM – *Regional Climate Model*

RCPs – *Representative Concentration Pathways*

SRES – *Special Report on Emissions Scenarios*

SWMM – *Storm Water Management Model*

T – Período de Retorno

UNISDR – Gabinete das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As recentes inundações em todo o mundo mostram a vulnerabilidade dos ambientes urbanos às condições hidrológicas extremas e resultam, em parte, do efeito combinado das alterações climáticas, do aumento da urbanização, que originam um aumento de caudais superficiais, provocando cheias que são cada vez mais frequentes, devastadoras e dispendiosas. As inundações em meio urbano ocorrem essencialmente devido à chuva intensa e à incapacidade do sistema de drenagem para drenar toda a água resultante da precipitação.

Em resposta ao problema das inundações, a União Europeia elaborou a Diretiva 2007/60/CE relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações. Segundo a Diretiva 2007/60/CE, as alterações climáticas contribuem para um aumento da probabilidade de ocorrência de inundações. Deste modo, tornou-se imperativo reduzir o risco de consequências prejudiciais associadas aos efeitos das inundações, nomeadamente consequências que afetam vidas humanas, saúde, ambiente, património cultural, atividades económicas e as infraestruturas.

1.2 Objetivos

O principal objetivo da tese é desenvolver uma metodologia que permita avaliar e quantificar o impacto das alterações climáticas na drenagem de bacias urbanas em Portugal.

O desenvolvimento da metodologia tem os seguintes objetivos específicos:

1. Avaliar o impacto das alterações climáticas em eventos curtos de precipitação em Portugal.
2. Analisar o comportamento, dessas alterações, nos sistemas de drenagem, utilizando um modelo de drenagem dual.
3. Quantificação do risco de inundação.
4. Aplicação da metodologia definida a um estudo de caso.

A metodologia será aplicada à bacia urbana da zona central na cidade de Coimbra, Portugal. A bacia contém, a zona da praça 8 de Maio, zona suscetível a inundações, e terá como resultado final mapas de zonas de inundação e mapas de risco.

1.3 Estrutura do trabalho

No primeiro capítulo, são apresentadas as razões pelas quais este assunto é tema de estudo, com uma breve introdução às causas de cheias tais como as alterações climáticas e o efeito da urbanização. Posteriormente, serão referidos os objetivos gerais e específicos desta dissertação.

No segundo capítulo, apresenta-se a revisão bibliográfica, onde são abordados os assuntos/conceitos relevantes para o desenvolvimento desta dissertação tais como drenagem urbana, alterações climáticas, incluindo modelos climáticos e diferentes cenários climáticos. Para além disso, serão analisados os métodos para quantificar os possíveis impactos das alterações climáticas na drenagem urbana e nas curvas intensidade-duração-frequência (IDF). Serão expostos os modelos hidráulicos e hidrológicos, bem como uma breve apresentação do *software* SWMM. Por fim, é abordada a problemática questão da gestão dos riscos de inundação, bem como algumas políticas de gestão, e ainda os conceitos de mapas de zonas inundáveis e mapas de risco.

No terceiro capítulo, apresentam-se as metodologias utilizadas, para o desenvolvimento das chuvadas de projeto utilizadas nas simulações numérica com vista ao desenvolvimento dos mapas de zonas inundáveis e dos mapas de risco.

No quarto capítulo, serão apresentados alguns exemplos de aplicação para uma melhor perceção do assunto, e, posteriormente será apresentado e pormenorizado o estudo de caso.

Por fim, no quinto e último capítulo, serão elaboradas as conclusões gerais deste trabalho, e para além disso, serão abordados eventuais trabalhos futuros que poderão dar continuidade a este estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Neste capítulo serão abordadas os principais fatores que influenciam direta e indiretamente o problema das cheias urbanas, nomeadamente, o aumento constante da urbanização caracterizado por inadequadas políticas de ordenamento do território, bem como o funcionamento deficiente dos sistemas de drenagem urbana nestas condições. Para além disso, será estudada a problemática das alterações climáticas, dar-se-á especial atenção aos vários modelos climáticos e cenários climáticos existentes. Serão avaliados, ainda, os impactos das alterações climáticas sobre o comportamento dos sistemas de drenagem urbana.

Por outro lado, serão apresentados conceitos relacionados com toda esta temática, como drenagem urbana, modelação hidrológica e hidráulica, e ainda gestão do risco de cheias, incluindo a elaboração de mapas de risco e de zonas inundáveis.

As inundações são fenómenos bastante complexos em relação à origem, previsão de risco e consequências. Estas são causadas frequentemente por condições climáticas extremas que podem levar à acumulação local de água de origem pluvial. Para reduzir os riscos de inundações, é fundamental compreender o funcionamento deste tipo de eventos (EEA, 2012). Para isso, é vantajoso classificar os diferentes tipos de cheias de modo a compreender determinadas características que são essenciais para atenuar estes riscos. De acordo com (Hildén *et al*, 2012), a classificação do tipo de inundações é bastante arbitrária, apesar disso, é possível fazer as seguintes divisões (Quadro 2.1):

Quadro 2.1 – Quadro resumo: Tipo de cheias, origem, danos, previsibilidade.

Tipo de Cheia	Descrição
Fluvial	Ocorrem quando os níveis de água de um canal, lago ou reservatório aumentam tanto que a água inunda terrenos secos. Associam-se a fenómenos de precipitação intensa, degelo, acumulação de detritos. Variam em função do ciclo hidrológico anual. São mais fáceis de prever que os restantes tipos de cheias.
Pluvial	Originadas por episódios de precipitação extrema, afetam os ambientes urbanos, devido à impermeabilização do solo e à falta de capacidade de drenagem dos sistemas urbanos. Imprecisas, difíceis de prever padrões das chuvadas locais.
Rápida	Causam inundações muito rápidas. Têm origem pluvial, rios lagos. Extremamente difíceis de prever.
Costeira	Nível do mar excede os níveis normais de água, originadas por tempestades, <i>tsunamis</i> , marés altas. A previsão destas cheias é feita através de modelos hidráulicos.
Subterrânea	A água dos lençóis freáticos emerge em grande quantidades em determinados locais. Ocorrem devido à precipitação intensa, subida do nível do mar, etc. São previsíveis de existirem dados associados ao fluxo de águas.
Falhas de barragens	Ocorrem devido a falhas humanas, nomeadamente erros de projeto, e podem ser absolutamente devastadoras. Podem ser previstas, avaliadas e modeladas com antecedência através da análise de risco.

2.2 Drenagem Urbana

As inundações em espaços urbanos tornaram-se uma questão importante devido ao seu efeito na saúde pública, meio ambiente e custos de bens materiais destruídos.

Marsalek *et al* (2001) divide os sistemas de drenagem urbana em dois tipos distintos: sistemas principais, que diminuem os riscos de inundação em caso de eventos de precipitação extremos, e sistemas menores, cuja função é a de conduzir o escoamento de águas pluviais reduzindo a sua concentração à superfície.

Segundo Schmidt (2008), em alguns países os habitantes pagam serviços extras para que os sistemas de drenagem realizem completamente as suas funções, sem o risco de ocorrerem falhas mediante condições meteorológicas adversas. Para além disso, a construção de um sistema de drenagem que consiga lidar com condições extremas de tempestade pode tornar-se muito dispendiosa (Schmidt, 2008). Deste modo, a solução ideal deve passar por uma análise custo-benefício, de modo a equilibrar o custo de construção dos sistemas de drenagem eficazes e a segurança da população. De acordo com a norma europeia EN 752, os sistemas de drenagem urbana devem ser projetados para resistir a períodos de inundação com duração

entre 10 e 50 anos, em função do tipo de área urbana bem como infraestruturas que a compõem (Stavroula, 2008).

Durante muitos anos, têm sido usados sistemas de drenagem separativos e mistos em muitas cidades do mundo. A rede dos sistemas mistos caracteriza-se por ser constituída pela junção de dois tipos de sistemas, isto é, uma parte da rede é unitária, onde se admitem conjuntamente águas residuais domésticas, industriais e pluviais. As redes separativas são constituídas por duas redes de natureza distintas: uma drena as águas residuais domésticas e industriais, enquanto a outra rede destina-se à drenagem de águas pluviais, não existindo qualquer tipo de ligação entre as duas redes (Marques *et al*, 2013). De seguida apresenta-se o Quadro 2.2, onde se encontram explicitadas as principais vantagens e desvantagens das redes unitárias e separativas (Sousa e Matos, 2001).

Quadro 2.2 – Vantagens e desvantagens das redes unitárias versus redes separativas (Sousa e Matos, 2001).

Tipo de sistemas Unitário versus Separativo	
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Mais económico; • Mais facilidades na construção.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Após grandes períodos de seca, quando ocorrem as primeiras chuvadas, afluem à estação de tratamento elevadas cargas poluentes; • Os órgãos de entrada na rede (sarjetas, sumidouros) têm de ser sifonados; • Dificuldade em manter condições hidráulicas de escoamento durante tempo seco, causando entre outros, problemas como sedimentação das matérias em suspensão, odores desagradáveis, corrosão do material dos coletores; • Nos sistemas unitários, os coletores têm de ser construídos com materiais resistentes à corrosão, enquanto nos sistemas separativos não é necessário pois só se transporta água de escoamento superficial, sem grandes efeitos corrosivos.

Os sistemas mistos são o tipo mais comum de drenagem urbana na Europa Ocidental e na América do Norte. Em alternativa aos sistemas mistos, usam-se os sistemas separativos, nomeadamente em novas áreas urbanas em países como Ásia, Austrália, América do Norte. Apesar destes sistemas diminuírem a vulnerabilidade das cidades em termos de riscos para a saúde pública, a sua instalação pode torná-los mais vulneráveis a eventos de precipitação extrema. Isto deve-se ao facto de, muitas vezes, estes sistemas são subdimensionados. Muitos dos sistemas de drenagem urbana são particularmente vulneráveis ao rápido crescimento da população bem como às alterações climáticas e o facto de existirem cada vez mais eventos de precipitação extrema pode causar insuficiência na capacidade do sistema de drenagem, e, consequentemente, podem ocorrer cheias. Deste modo, é necessária uma constante adaptação

dos sistemas de drenagem urbana, bem como na presença destas mudanças estes devem ser projetados para se comportarem de uma forma mais resiliente (Willems *et al*, 2013).

Mais à frente, nesta dissertação serão abordados os assuntos relacionados com os impactos das alterações climáticas na drenagem urbana, bem como o impacto da urbanização.

2.2.1 Impacto da Urbanização

Desde a década de 70 que o crescimento urbano nos países em desenvolvimento tem aumentado significativamente de uma forma insustentável (Tucci, 2005). Espera-se que, em 2030 cerca de 60% da população mundial resida nas cidades (Marques *et al*, 2013). Como consequência do crescimento urbano há um aumento na ocupação do solo nessas áreas, e como tal, registam-se alterações no escoamento superficial, sendo por isso imperativo acompanhar o processo de urbanização de medidas que permitam que os sistemas de drenagem de águas pluviais possam responder às novas exigências. O desenvolvimento urbano aumenta o risco de inundação na medida em que amplia, substancialmente, as áreas impermeáveis de uma bacia hidrográfica, reduzindo o volume de terras disponível para armazenamento de água (Skilton, 2010). Para além disso, a urbanização pode produzir obstruções ao escoamento como aterros, pontes, drenagens inadequadas, etc. (Tucci, 2005). O inadequado dimensionamento dos sistemas de drenagem e ordenamento do território, associado ao aumento da ocupação do solo conduz a um aumento significativo do caudal, devido à impermeabilização, e conseqüentemente, a um aumento na periodicidade e magnitude das cheias (Marques *et al*, 2013).

Tal como referido anteriormente, como consequência do aumento do caudal e da diminuição de áreas permeáveis nos espaços urbanos devem ser implementadas mudanças nas políticas de gestão, planeamento e dimensionamento de infraestruturas de drenagem urbana (Marques *et al*, 2013). Para compreender as notórias diferenças entre a forma, pico e comportamento dos hidrogramas de uma bacia hidrográfica para condições diferentes apresenta-se a Figura 2.1.

É facilmente perceptível que o hidrograma obtido, após a expansão urbana, atinge o caudal de ponta mais rapidamente que o hidrograma natural da bacia hidrográfica. Isto deve-se ao facto da impermeabilização do solo obstruir a infiltração das águas pluviais, aumentando o volume escoado, e conseqüentemente, o caudal de ponta. O facto de o volume de escoamento aumentar, tem conseqüências para o tempo de resposta da bacia, tendo este uma resposta mais rápida nas bacias urbanas devido a uma maior velocidade do escoamento superficial. (Marques *et al*, 2013).

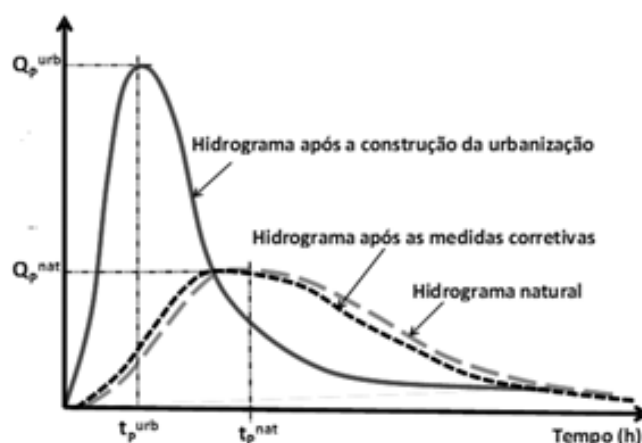


Figura 2.1 – Hidrogramas: natural, após a construção da urbanização e após medidas corretivas (adaptado de Marques *et al*, 2013).

Em suma, atualmente, um dos principais problemas de recursos hídricos está relacionado com o impacto da urbanização e o desenvolvimento urbano (Tucci, 2005). Combinando este facto com os efeitos das alterações climáticas, referidas no sub-capítulo 2.3., resultam cheias cada vez mais recorrentes, caracterizando-se por serem cada vez mais devastadores e caras (Skilton, 2010). O uso do solo está constantemente em mudança, de modo a ser capaz de responder às contínuas alterações demográficas e às condições socioeconómicas. Deste modo, os engenheiros, projetistas devem conseguir lidar com o aumento da impermeabilização do solo, aumentando a capacidade de resposta dos sistemas de drenagem bem como diminuir o tempo de resposta dos mesmos (Willems *et al*, 2013).

2.2.2 Impactos das alterações climáticas na drenagem urbana

Para avaliar os impactos na drenagem urbana de possíveis mudanças climáticas futuras, é necessário usar uma metodologia que permita estimar tanto as chuvadas de curta-duração como as chuvadas extremas, para um curto período de tempo e para uma pequena área de interesse geográfico.

O número de estudos de impacto hidrológico das mudanças climáticas tem vindo a aumentar de ano para ano. Infelizmente, os estudos do impacto das mudanças climáticas sobre os sistemas de drenagem urbana são muito limitados. Isto relaciona-se com o facto de o processo hidrológico em áreas urbanas ser de pequena escala temporal e espacial, ou seja, a escala espacial é normalmente da ordem de 1 a 10 km², e a escala temporal associa-se a pequenos eventos de precipitação, tendo duração normal de menos de 1 hora.

Em suma, há indicações claras de que se espera um aumento das precipitações extremas, para o futuro, e que afetará os sistemas de drenagem urbana na medida em que estes não foram projetados para grandes aumentos de precipitação. Em resumo, as consequências podem ser de vários tipos apresentadas no Quadro 2.3:

Quadro 2.3 – Impactos futuros na drenagem urbana (adaptado Willems *et al*, 2013).

Tipo de consequência	Descrição
Técnicas	Danos nos tubos, instalações, bombas hidráulicas, erosão e deslizamentos de terra.
Ambiental	Emissão de poluentes, nutrientes e outras substâncias perigosas na água, solo e/ou ar.
Económica	Custos dos danos, custos do tratamento dos ambientes poluídos, etc.
Sociocultural	Nas cidades, municípios, países.
Saúde	Pessoas doentes por ingerirem água poluída.

2.3 Alterações Climáticas

Existem várias definições para alterações climáticas, sendo uma delas, a seguinte (Garret, 2013):

Alteração Climática: “variação estatisticamente significativa tanto no estado médio do clima ou na sua variabilidade, persistindo por um período prolongado (geralmente décadas, ou mais).”

Segundo o mesmo autor, a mudança climática pode dever-se a processos internos naturais, a forças externas, ou a mudanças antropogénicas persistentes na composição da atmosfera ou no uso da terra (Garret, 2013).

O 5º Relatório de Avaliação do *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC (IPCC, 2013) conclui que “é exatamente provável que a influência humana tem sido a causa dominante do aquecimento observado desde o início do século XX”. O aquecimento da atmosfera aumenta o teor de vapor de água na troposfera (baixa atmosfera), consequentemente esse aumento, gera energia adicional às tempestades que será libertada em forma de precipitação. Assim, verifica-se um aumento da intensidade dos eventos de chuvas e um aumento da probabilidade de ocorrência de inundações (Garret, 2013).

É importante referir que outra das causas que provoca alterações climáticas, e consequentemente, aumenta a probabilidade de ocorrência de chuvadas extremas é o efeito de estufa (Figura 2.2). Os principais gases identificados como responsáveis pelo efeito de estufa,

de acordo com o Protocolo de Quioto (2005) são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nítrico (N_2O). Atualmente, estes gases representam cerca de 99% das emissões antropogénicas deste grupo de poluentes (IPCC, 2007).

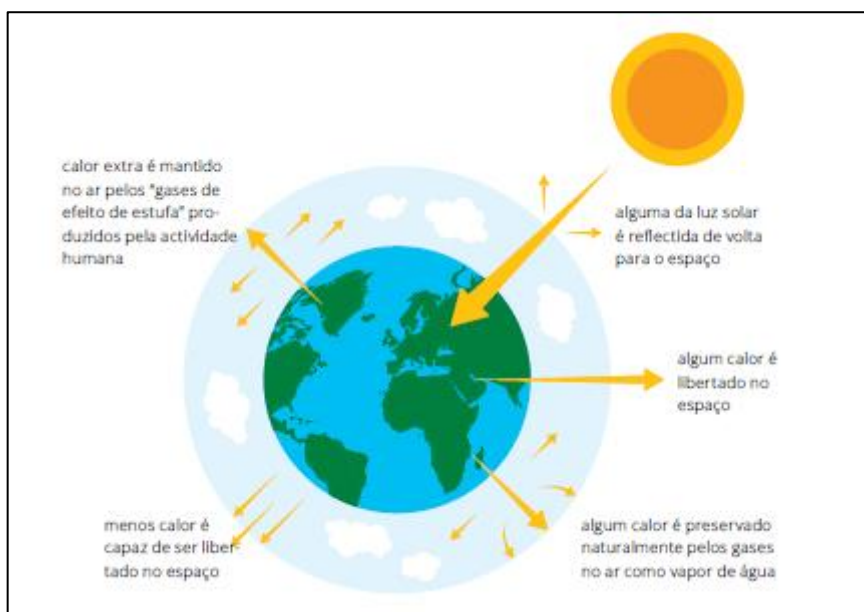


Figura 2.2 – Simplificação do balanço energético da terra que ilustra o aumento do efeito de estufa resultante das emissões antropogénicas de gases de efeito de estufa (Adaptado Garret, 2013).

Segundo Min *et al* (2011), citado em (Willems *et al*, 2013) o Homem tem ampliado o efeito de estufa, o que contribui para a intensificação de eventos de precipitação extrema. Segundo o IPCC, os extremos definem-se como eventos que são relevantes numa perspectiva de gestão do risco de desastre, como por exemplo, na gestão do risco de inundação apresentado mais adiante. É muito provável que esta tendência de indução do efeito de estufa continue durante o século XXI. Como tal, as consequências destas alterações climáticas devem ser avaliadas numa perspectiva de desenvolvimento sustentável, e os gestores de recursos hídricos têm o dever de antecipar estas mudanças e quantificar os riscos associados (Willems *et al*, 2013).

Desde a formação da atmosfera, há 4000 milhões de anos, que o clima tem variado significativamente. Este facto é explicado por inúmeras causas que provocam as frequentes variações climáticas (Santos, 2006), nomeadamente:

- Pequenas variações na órbita da Terra associadas ao seu movimento translacional.

- Variações na posição do eixo de rotação da Terra.
- Flutuações na atividade solar.
- Períodos de maior atividade vulcânica.

Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate change* (IPCC), durante o último século, particularmente nos últimos trinta anos, a temperatura média à superfície aumentou aproximadamente 0.6° C (Figura 2.3). Na Europa, os maiores aumentos de temperatura coincidem com os períodos de aumento a nível global (Santos, 2006). Portugal Continental segue as tendências do resto da Europa no que diz respeito à subida ou descida da temperatura. No último quarto de século, registou-se um aumento significativo das temperaturas máximas e mínimas médias.

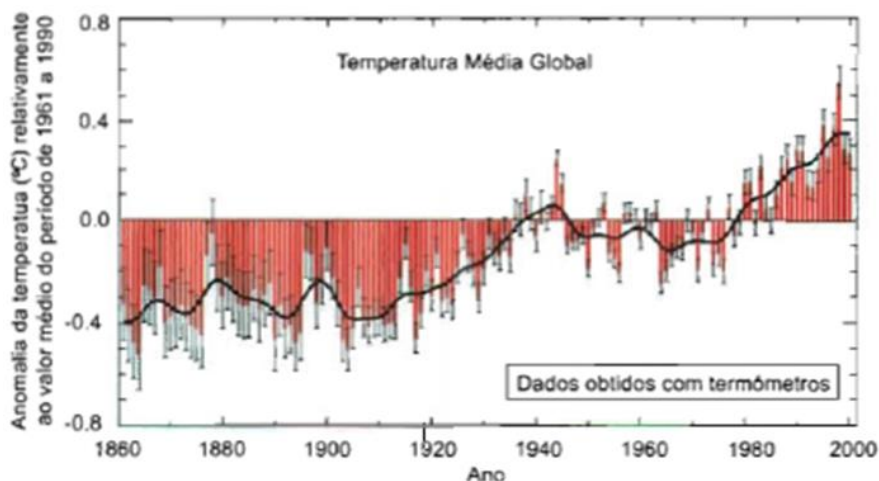


Figura 2.3 – Temperatura anual média global da atmosfera à superfície representada relativamente ao valor médio do período de 1961 a 1990 (IPCC).

Devido à crescente tendência de alteração de parâmetros climáticos, como a temperatura e precipitação, há uma forte evidência de que as probabilidades e risco de inundações estão a sofrer alterações (Corrêa, 2013).

No que diz respeito a Portugal, sendo um país localizado no sul da Europa torna-o integrante da lista de países Europeus que são mais sensíveis a alterações climáticos. Este facto é explicado, tendo em conta as características naturais, nomeadamente a topografia e o clima portugueses.

2.3.1 Modelos Climáticos

Os modelos climáticos são um instrumento fundamental para o estudo das alterações climáticas, pois permitem por meio de simulações do sistema climático, interpretar não só o comportamento atual do clima bem como prever futuras mudanças de cenários. Estes modelos são bastante complexos, pois envolvem inúmeras variáveis inerentes aos processos físicos, químicos e biológicos que caracterizam o clima juntamente com as suas interações. O Modelo climático ideal seria aquele que descreve todos estes processos e de preferência a uma escala temporal e espacial pequena (Santos, 2006).

Apesar de nos últimos anos o poder computacional ter aumentado significativamente, a resolução espacial dos modelos climáticos ainda não é capaz de resolver cenários climáticos à escala da drenagem urbana. Para além disso, os atuais modelos climáticos têm limitações na precisão com a qual descrevem fenómenos de precipitação extrema, e isso acontece devido à falta de conhecimento dos fenómenos dinâmicos que ocorrem durante uma tempestade e que levam a eventos mais extremos, numa escala local (Willems *et al*, 2013).

Podem considerar-se dois sistemas físicos distintos: sistema climático e sistema de drenagem urbana (Figura 2.4). Os modelos climáticos, apresentados de seguida, conseguem simular os efeitos dos diferentes cenários de ações climáticas, tais como as mudanças nas emissões de gases do efeito de estufa (Willems *et al*, 2013). Podem utilizar-se os seguintes modelos: circulação geral (GCM) e climáticos regionais (RCM), de modo a proporcionar *outputs* do sistema climático. Durante períodos históricos, os resultados dos modelos climáticos podem ser validados, baseados em observações históricas, de modo a comprovar a sua fiabilidade (Willems *et al*, 2012). De seguida, serão apresentadas as diferenças entre estes dois modelos climáticos, juntamente com as suas vantagens e desvantagens.

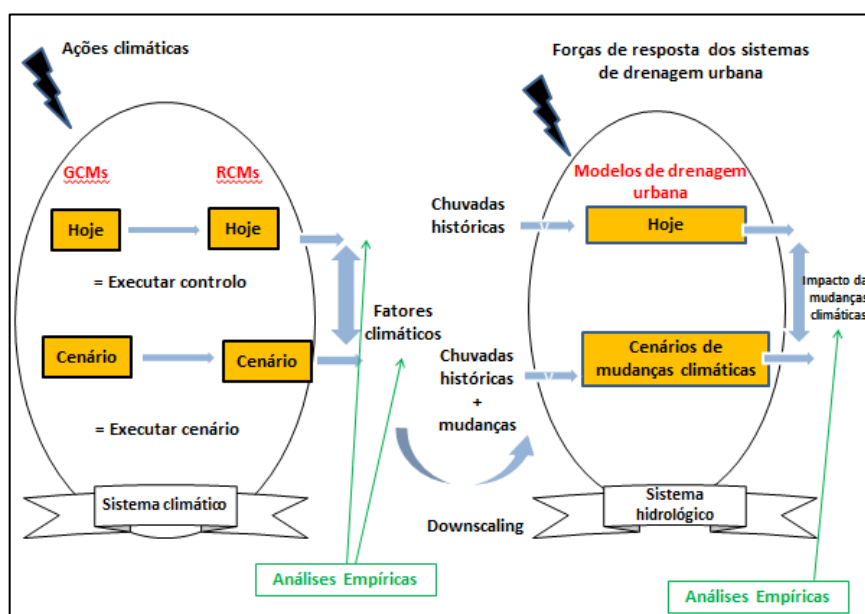


Figura 2.4 – Aspectos envolvidos na análise dos impactos das alterações climáticas na hidrologia urbana (adaptado Willems *et al*, 2013).

2.3.1.1 Modelos de Circulação Geral (GCM) e Modelos Regionais (RCM)

Os modelos climáticos, denominados de Circulação Geral (GCM) simulam o sistema climático terrestre, incluindo a atmosfera e os oceanos, através de uma malha tridimensional com uma resolução horizontal de cerca de 300 Km e com 10 a 40 níveis verticais (Santos, 2006). Através da resolução de equações de conservação da energia, do momento linear e da massa, determinam-se as variáveis meteorológicas para cada célula do modelo climático. Estas variáveis podem ser a temperatura, humidade ou outras. Estes modelos conseguem reproduzir o comportamento do clima durante os últimos 150 anos, provando a sua fiabilidade e robustez (Santos, 2006).

Os modelos climáticos regionais (RCM) são utilizados numa escala inferior aos GCM, sendo deste modo, utilizados quando se pretende estudar uma área mais limitada, nomeadamente uma área urbana. Deste modo os RCMs têm uma resolução espacial de 30 a 50 km e são condicionados pelas condições de fronteira, obtidas por um GCM. A principal vantagem destes modelos é que permitem obter cenários numa escala mais detalhada espacialmente. Por outro lado, estes modelos para além de apresentarem incertezas associadas ao GCM, apresentam as que resultam do processo de regionalização (Santos, 2006).

Outra característica comum e importante destes modelos relaciona-se com a sua resolução de espaço e tempo. Em relação ao espaço, as bacias urbanas têm uma área pequena ($<10 \text{ km}^2$).

Devido às áreas limitadas, as escalas temporais destes modelos, tal como referido anteriormente, são curtas, pois são controladas pelo tempo de concentração de um sistema de drenagem urbana. Consequentemente, a informação de precipitação necessária para a modelação tem tempo inferior ou igual ao menor tempo de concentração do sistema. Para corrigir esta falha entre a escala dos modelos climáticos e a escala dos sistemas de drenagem local, utilizam-se métodos estatísticos de *downscaling*. (Willems *et al*, 2013).

É importante referir que estes dois modelos não foram usados, ainda, diretamente para avaliar adequadamente os futuros impactos das alterações climáticas, em Portugal, nos sistemas de drenagem, sendo, por isso, este assunto um verdadeiro desafio para toda a comunidade hidráulica.

2.3.1.2 Cenários Climáticos

Para obter uma simulação exemplificante do clima futuro com um GCM, é necessário definir o cenário de evolução das concentrações de gases de efeito de estufa (GEE). Tendo em conta que existe uma vasta gama de possibilidades para cenários de emissão futuros, o IPCC limitou-os em quatro (Quadro 2.4), de acordo com o relatório especial sobre cenários de emissões (Special Report on Emissions Scenarios, SRES) (Willems *et al*, 2013). Estes baseiam-se em quatro famílias distintas com vários graus futuros de desenvolvimento económico, social e tecnológico (Santos, 2006). Os cenários de emissões permitem a avaliação das consequências ambientais e climáticas, das emissões futuras de gases de efeito de estufa. Todos cenários apresentados neste quadro são cenários base, na medida em que não incluem qualquer política (medida de mitigação) climática, apesar de eventualmente existirem reduções das emissões de CO₂ (Willems *et al*, 2013). Estes cenários permitem a avaliação das consequências ambientais e climáticas do futuro das emissões de GEE.

Quadro 2.4 – Descrição dos diferentes cenários climáticos (SRES) (adaptado Willems *et al*, 2013).

Cenário	Descrição
A1	Crescimento económico muito acelerado; novas/eficientes tecnologia s; pico populacional global nos meados deste século a diminuir de seguida; aumento da interação social e cultural; Três subgrupos: intensidade fóssil (A1F1), fontes de energia fóssil (A1T) e uso equilibrado de todas as fontes (A1B).
A2	Mundo fortemente heterógeno com preservação das identidades locais; pouca convergência entre diferentes regiões, contínuo crescimento da população. Progresso económico/ tecnológico mais fragmentando e lento do que os restantes cenários.
B1	Mundo convergente, com a população global como em A1, contudo, apresenta um forte desenvolvimento da economia baseada em serviços e na informação; uso de recursos eficientes e tecnologias limpas.
B2	População global como em A2 mas evolução mais lenta, desenvolvimento económico mais lento, evolução da tecnologia menos rápida e mais diversificada do que nas famílias B1 e A1.

O recente relatório do IPCC, (2013), inclui novos cenários climáticos denominados RCPs (Representative Concentration Pathways). Os RCPs dividem-se em quatro categorias (Figura 2.5) de acordo com a sua força radioativa total. A força radioativa total é uma medida cumulativa de emissões de gases de efeito de estufa proveniente de todas as origens expressa em *watts* por m^2 (IPCC, 2013).

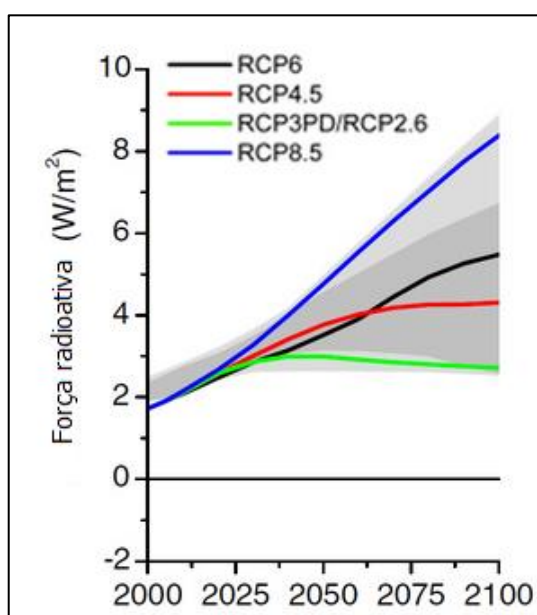


Figura 2.5 – Novos cenários climáticos RCPs (Adaptado IPCC, 2013).

A nomenclatura dos RCPs é atribuída a partir dos níveis das forças radioativas, isto é, um cenário RCP-X corresponde a um cenário no qual a força radioativa de estabilização ou de pico corresponde a $X \text{ W.m}^{-2}$ (Silveira, 2013). O RCP 8.5 corresponde a um cenário global de altas emissões de gases de estufa (A) em comparação com os cenários do Quadro 2.4.

Através de modelos climáticos globais obtêm-se projeções climáticas que mostram, ao longo do século XXI, um aumento de temperatura relativamente uniforme em relação à Península Ibérica, com uma tendência média de $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (inverno) e $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (verão) para o cenário menos favorável, A2, e $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ a $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ para o cenário mais favorável, B2 (Figura 2.6).

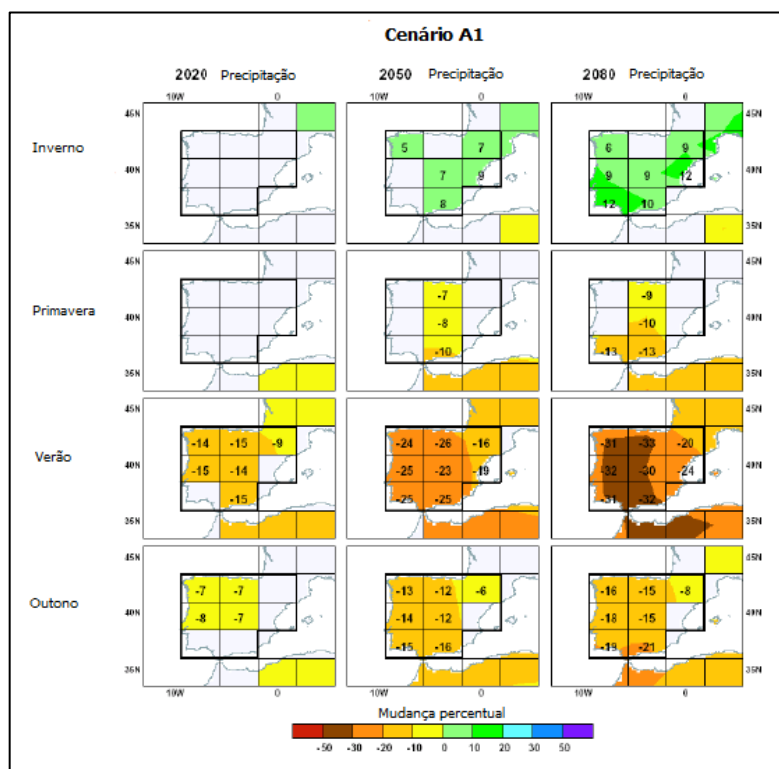


Figura 2.6 – Projeções das mudanças climáticas na temperatura, para o cenário A1 para as estações do ano na Península Ibérica (adaptado Rodríguez *et al*, 2005).

No que diz respeito à precipitação (Figura 2.7), existem várias abordagens e algumas discrepâncias, no entanto, todos concordam numa redução significativa da precipitação total um pouco maior no cenário A2 do que no B2.

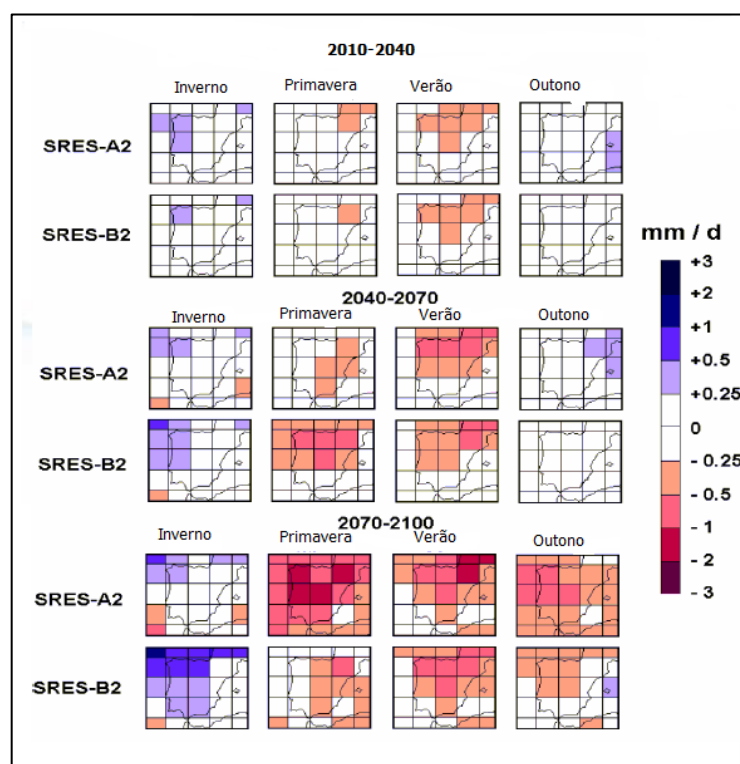


Figura 2.7 – Projeções de mudanças na precipitação para diferentes cenários, e nas diferentes estações do ano na Península Ibérica (adaptado Rodríguez *et al*, 2005).

2.3.2 Curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) e as Alterações Climáticas

Integrados nos estudos sobre o impacto das alterações climáticas na drenagem urbana foram realizados alguns específicos para as curvas IDF, que são geralmente utilizadas para determinar hietogramas de projeto, usados para dimensionamento de redes de drenagem urbana. A metodologia destes estudos varia consideravelmente e tem diferentes campos de aplicação. De seguida serão apresentados alguns desses exemplos, nomeadamente os mais recentes.

Nguyen e Desramaut (2008) derivaram várias relações das curvas IDF de Quebec (Canadá) para o período atual e para períodos futuros sob várias hipóteses de cenários climáticos dados por dois GCMs, após a aplicação de *downscaling*. Concluíram que, para períodos futuros (2020, 2050, 2080), existe uma forte tendência para o crescimento da intensidade de precipitação. Neste estudo, foram encontradas tendências semelhantes para áreas urbanas de diferentes tamanhos, formas e níveis de impermeabilidade. (Nguyen e Desramaut, 2008).

No estudo desenvolvido por Schardong e Simonovic, (2013), a metodologia consiste em usar os fatores de alteração climáticos, extraídos dos GCM e aplicar em dados históricos. A metodologia foi implementada numa estação pluviométrica, localizada na cidade de São Paulo e foram avaliados os resultados de GCM para cenários futuros comparando-os com simulações históricas observados. Foram utilizados dois cenários climáticos, SRES A2 – alta emissão de poluentes e SRES B1 – baixa emissão de poluentes, e dois períodos futuros. Concluíram que, para ambos os cenários, há uma tendência para o aumento da precipitação, entre 4% a 20%, comparativamente à curva IDF gerada usando séries históricas. (Schardong e Simonovic, 2013)

Segundo Mailhot e Duchesne (2009), e tendo em conta acontecimentos passados, o aumento da intensidade e da frequência de eventos de chuvadas extremas resultam em inundações mais frequentes. Deste modo, os critérios de projeto devem ser atualizados às possíveis mudanças induzidas pelas alterações climáticas. Segundo os mesmos autores, as mudanças climáticas causam uma alteração na distribuição dos eventos de precipitação extrema, o que significa que a probabilidade de exceder uma determinada intensidade, e os critérios de projeto, aumentarão com o tempo. No estudo, conclui-se que, devido às alterações climáticas, para um mesmo período de retorno a intensidade de precipitação aumenta. (Mailhot e Duchesne, 2009)

Outro estudo, realizado na Dinamarca, cujo objetivo era encontrar um ou mais fatores de correção climático, que aplicados às chuvas “presentes” permitissem simular o comportamento “futuro” da precipitação, de acordo com a vida técnica esperada para os novos sistemas de drenagem, ou seja, tipicamente 100 anos. Deste modo, as alterações climáticas podem ser quantificadas através de um fator climático (Nielsen, 2008).

Define-se fator climático, (c_f), (Nielsen, 2012), como a relação entre a intensidade de precipitação de um determinado período de retorno (T) e duração (d), para um cenário climático futuro ($I(T, d)_{futuro}$), e a correspondente intensidade de precipitação do presente ($I(T, d)_{presente}$) representado pela seguinte equação:

$$c_f = \frac{I(T, d)_{futuro}}{I(T, d)_{presente}} \quad (1)$$

A metodologia aplicada neste estudo possui três abordagens distintas e, a cada abordagem corresponde um fator climático diferente. Por exemplo, para chuvadas de duração de uma hora, e para um período de retorno de 2 anos, obtêm fatores climáticos iguais a 1.27, 1.11, 1.32 para as abordagens A, B e C respetivamente.

A abordagem A baseia-se em modelos de séries de duração parcial, enquanto a abordagem B, denominada “gerador de chuvadas estocásticas”, utiliza como dados de entrada e saída as series de precipitação e não apenas as chuvadas de projeto. Por fim, a abordagem C, é uma

abordagem de engenharia em vez de uma abordagem científica. Segundo Nielsen (2008), muitas vezes, em aplicações de engenharia, é necessário utilizar dados de precipitação de outros locais, quando os dados locais não estão disponíveis. Para isso, utilizam-se dados de precipitação de uma região com características semelhantes (Nielsen, 2008).

Os fatores climáticos obtidos mostram as diferenças sistemáticas das abordagens. A abordagem A fornece os maiores fatores, e a abordagem A e C dão resultados bastante concordantes. Este estudo permitiu concluir que, o fator climático aumenta com o aumento do período de retorno, e diminui com a duração da chuvada, sendo a influência das alterações climáticas maior no tempo de retorno, do que na duração (Nielsen, 2008).

Segundo Christensen (2003), citado em Rodriguez *et al* (2014), a precipitação anual na Península Ibérica diminuiu significativamente nas últimas três décadas, comparando com 1960 e 1970, principalmente no inverno. Apesar disto, tem sido observado um aumento das chuvas torrenciais, caracterizadas por episódios de precipitação mais curtos e mais intensos, principalmente no noroeste da Península Ibérica. Segundo o mesmo autor, este tipo de eventos condiciona significativamente o comportamento dos sistemas de drenagem urbana.

Para estudar a possível influência das alterações climáticas na precipitação extrema, em Barcelona, foi realizado um estudo (Rodriguez *et al*, 2014), onde foram colocados seis pluviómetros localizados na sua área metropolitana, caracterizada por ser densamente povoada, com sistemas de drenagem urbana complexos, e extremamente vulneráveis a eventos torrenciais. Deste modo, foram analisadas 114 série de precipitação diária, obtidas por seis termo - pluviómetros usando informações fornecidas por cinco GCM para quatro cenários climáticos diferentes, obtendo fatores de correção climáticos a aplicar nas novas chuvadas. Assumiram que os fatores climáticos (Figura 2.8) são invariantes em relação à duração da chuvada, obtiveram as futuras chuvadas utilizando a equação referida anteriormente (1), utilizada também por Nielsen. Segundo os mesmos autores, para um período de retorno de 1 ano, espera-se um aumento de 20% na intensidade de precipitação, enquanto para um período de retorno de dois anos, espera-se um aumento de 30% (Rodriguez *et al*, 2014).

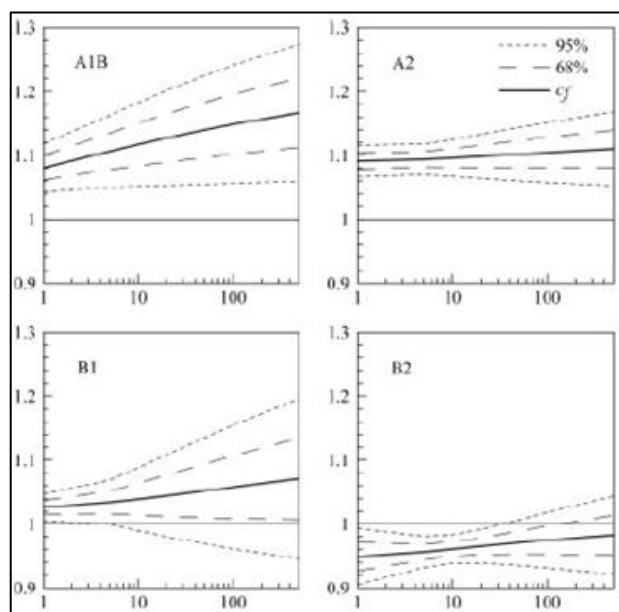


Figura 2.8 – Fatores climáticos médios para uma chuvada diária, no período 2033-2065 para os cenários A1B, A2, B1 e B2. As ordenadas representam os fatores climáticos, em abcissas o período de retorno (adaptado Rodriguez *et al*, 2014).

Segundo o IPCC, para a região Portugal, e a restante região Mediterrânea, a frequência dos episódios extremos deverá aumentar, principalmente no inverno. Deste modo, segundo a 5ª Relatório de Avaliação do IPCC prevê-se que uma precipitação para um período de retorno de 20 anos passe a ocorrer entre 15 a 18 anos em todos os seus cenários. De acordo com o mesmo documento, a intensidade de precipitação desta zona, será agravada em cerca de 10 a 20 % para todos os cenários (IPCC, 2013).

No Quadro 2.5. apresenta-se uma compilação de vários estudos distintos que permitem a avaliar a variação da precipitação e/ou intensidade, em determinadas localizações, considerando diferentes cenários climáticos e tempos de retorno, devido às alterações climáticas. Para cada um destes estudos, obtêm-se intervalos de valores para o aumento dos dados das curvas IDF.

Quadro 2.5 – Quadro resumo - Variação da Precipitação/ Intensidade com as alterações climáticas, para diferentes cenários climáticos, períodos de retorno e localizações.

Artigo/Autor	Tipo de dados	Aumento Intensidade	Zona
Schardong e Simonovic (2013)	Precipitação média de 24 horas para cada mês do ano	4% - 26 % (para todos os cenários e períodos de retorno)	S. Paulo (Brasil)
Willems <i>et al</i> (2011)	Período de retorno/ Intensidade	T= 1 mês : • Alto cenário (15%) • Médio cenário (4%)	Bélgica (Flandres)
Butler e Davies (2011)	Intensidade	T=2 anos : • Alto cenário (20%) • Baixo cenário (5%)	Inglaterra
Mailhot e Duchesne (2009)	Período de retorno/ Intensidade	Para todos os cenários (1%-3%)	Qualquer zona
Buonomo <i>et al</i> (2007)	Intensidade máxima anual	T=2 anos (13%) T=20 anos (18%)	Europa
Nielsen (2008)	Intensidade (60 minutos)	T=10 anos (15%-37%) T=100 anos (21%-53%)	Dinamarca
IPCC (2013)	Intensidade	• Baixo cenário (10%) • Alto cenário (20%)	Mediterrâneo
Peck <i>et al</i> (2013)	Precipitação máxima diária	T=100 anos : • Baixo cenário (35%) • Alto cenário (42%)	Ontário (Canadá)
Rodriguez <i>et al</i> (2014)	Precipitação diária	T=1 ano (20%)	Barcelona (Espanha)

2.4 Modelação Hidrológica e Hidráulica

2.4.1 Introdução

Segundo van Mameren e Clemens (1997), um modelo de drenagem urbana é construído a partir de três componentes básicas (Figura 2.9):

- Uma caracterização do processo hidráulico.
- Uma caracterização geométrica do sistema em estudo, base de dados e modelo geométrico.
- Caracterização do comportamento hidráulico, fazendo distinção entre condições de tempo seco e de tempestade.

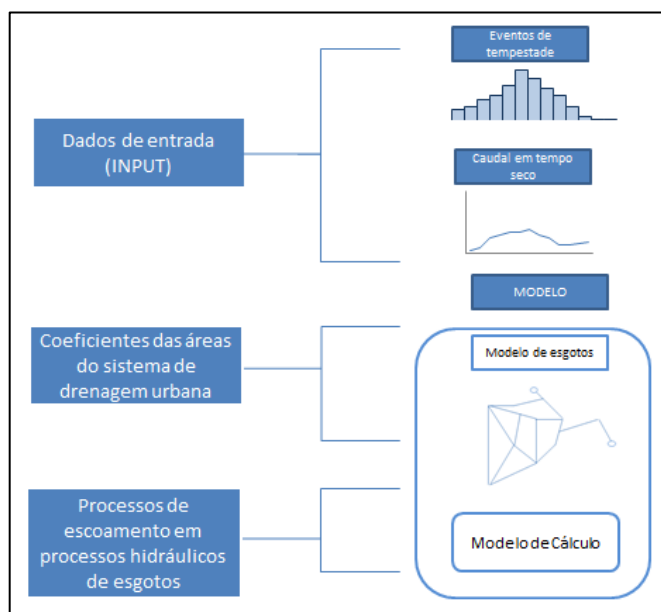


Figura 2.9 – Componentes de um modelo de drenagem urbana (adaptado de Clemens, 2001).

Para proceder à modelação de um sistema de drenagem, é necessário interligar duas componentes:

- Transformação da precipitação em escoamento superficial (Modelação hidrológica);
- Simulação do escoamento ao longo do coletor do sistema de drenagem urbana (Modelação Hidráulica).

Através da modelação hidrológica, é possível quantificar o escoamento superficial, utilizando modelos de transformação da precipitação em escoamento, sendo estes modelos dependentes das características físicas da bacia drenante. Por outro lado, a modelação hidráulica trata de representar o movimento da água na rede dos coletores. Cada uma destas componentes será explorada mais adiante, e ser-lhe-ão associadas expressões matemáticas (Marques *et al*, 2013).

2.4.2 Águas Pluviais

Antes de se proceder à distinção entre modelos hidrológicos e hidráulicos, é necessário proceder a uma breve explicação relativa à importância das águas pluviais para a drenagem urbana. As águas pluviais são geradas pela chuva e definem-se como a proporção de chuva que escorre das superfícies urbanas (Butler e Davies, 2011). A transformação da precipitação num hidrograma envolve essencialmente duas partes: primeiro, as perdas que podem ser por intercetação, armazenamento em depressões, infiltração e evaporação, explicitadas mais

adiante. Segundo, a precipitação efetiva é transformada pela superfície num hidrograma de que representa o escoamento superficial. Infelizmente dá-se pouca atenção à fase do escoamento superficial, porém, quando se está no domínio de drenagem urbana os processos de escoamento superficial são tão importantes como os processos de precipitação (Butler e Davies, 2011).

2.4.3 Modelos Hidrológicos

O processo de transformação da chuva que cai numa superfície para a quantidade real de água que entra num sistema de drenagem é um tema que tem vindo a ser estudado ao longo das últimas décadas (Clemens, 2001). De seguida, serão explorados os seguintes processos associados à modelação hidrológica:

- Perdas e armazenamento à superfície.
- Evaporação e infiltração.
- Modelos de precipitação e escoamento.

Quando uma determinada quantidade de chuva cai numa superfície, essa quantidade não vai ser descarregada na totalidade do sistema de drenagem ocorrendo perdas de água. As perdas iniciais ocorrem quando as condições iniciais da superfície estão secas, dependem das características, do tipo de superfície, da humidade e da temperatura inicial. Deste modo, uma determinada quantidade de chuva é capturada para pequenas depressões no revestimento (Clemens, 2001). Tendo em conta que é impossível descrever, em detalhe, a geometria do pavimento de toda a área de captação considera-se, usualmente, um valor médio constante para a profundidade da depressão, variando com o tipo de revestimento, tal como o apresentado no Quadro 2.6.

Para além do tipo de pavimento, o estado de conservação é um fator importante que influencia os parâmetros de armazenamento. É importante referir que a água armazenada em pequenas depressões vai desaparecendo, podendo sofrer evaporação e infiltração. A capacidade de armazenamento das superfícies depende do estado de conservação do revestimento, na medida em que, por vezes, é vantajoso negligenciar a manutenção dos mesmos, pois a carga hidráulica total do sistema de drenagem urbana diminui consideravelmente com o aumento do mau estado dos mesmos (Clemens, 2001).

Quadro 2.6 – Profundidade média considerando diferentes tipos de revestimento (Adaptado Clemens, 2001).

	Telhados planos	Telhados inclinados	Estradas impermeáveis	Estradas semi-impermeáveis
Perdas iniciais	0-0.5 mm	0.1 mm	0.07-0.7 mm	0-1.5 mm
Armazenamento superficial	2-2.5 mm	0.1 mm	0.3-1.7 mm	0.8 - 6.0 mm

De acordo com o Kidd (1978), citado por Clemens (2001), que relacionou a superfície de armazenamento com o declive do terreno de acordo com a seguinte expressão:

$$b = 0.77 \times i_t^{-0.49} \quad (2)$$

Em que:

b – superfície de armazenamento em mm.

i_t – declive do terreno em percentagem.

Através da expressão deduzida por Kidd (1978), consegue-se padronizar a superfície de armazenamento em função do declive do terreno de acordo com a Figura 2.10:

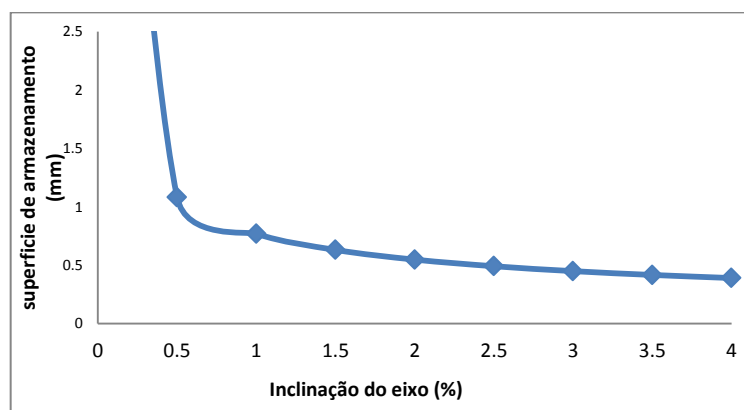


Figura 2.10 – Superfície de armazenamento em função do declive do terreno (adaptado Clemens, 2001).

Tal como o referido anteriormente, outros fenômenos associados aos modelos hidrológicos são a evaporação e infiltração. As superfícies de armazenamento do escoamento dependem, entre outros, de fenômenos como a evaporação e a infiltração.

A percentagem de evaporação depende de inúmeras variáveis, nomeadamente, temperatura, velocidade do vento, humidade atmosférica, intensidade do sol, cor da superfície. Normalmente estas variáveis não são conhecidas em pormenor quando se procede à modelação de um sistema de drenagem (Clemens, 2001). Isto implica que ao proceder à modelação de um sistema se considere a evaporação constante ou então não se considera de todo.

Tal como a evaporação, a infiltração é um processo bastante complexo na medida em que depende das condições iniciais de infiltração. A taxa de infiltração diminui com o tempo e depende das características da superfície. Diz-se que a taxa mínima de infiltração é atingida quando a superfície se torna saturada. A taxa de infiltração aumenta apenas quando as características da superfície são mudadas ou quando ocorrem novas precipitações (Clemens, 2001).

Existem vários modelos de infiltração, entre eles destaca-se o modelo de Horton. De acordo com este modelo, a taxa de infiltração ao longo de um evento de precipitação tende a decrescer a partir de um valor inicial máximo (Figura 2.11). Se a duração do evento for suficientemente grande, esta taxa atinge um valor mínimo, constante, que corresponde a uma taxa de infiltração de equilíbrio (Wanielista *et al*, 1997).

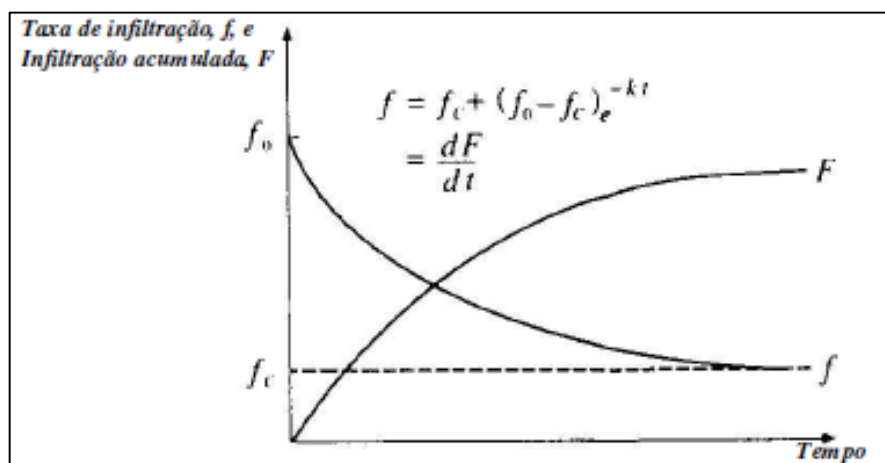


Figura 2.11 – Infiltração de acordo com o Modelo de Horton.

Deste modo, Horton propôs o seguinte modelo (equação 3) empírico de três parâmetros f_0 , f_c e k , para a taxa de infiltração (Portela, 2006).

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

Em que:

f - taxa de infiltração no instante t (mm/h);

f_0 - taxa de infiltração no instante $t=0$ (mm/h);

f_c - taxa de infiltração de equilíbrio ($t \rightarrow \infty$) (mm/h);

k - constante característica do solo e do revestimento superficial;

t - instante de cálculo (h).

Assim que a quantidade de chuva que cai numa superfície ultrapassa a quantidade da soma das perdas iniciais, das perdas que ocorrem nas depressões locais e/ou evaporação, ocorrendo escoamento. Deste modo, o momento a partir do qual se inicia a chuvada até ocorrer escoamento (t_s) é calculado através da seguinte equação (Clemens, 2001):

$$\int_{t=0}^{t=t_s} (r(t) - i(t) - e(t)) dt = S + W \quad (4)$$

sendo:

S - armazenamento à superfície (mm)

W - perdas iniciais (mm)

$r(t)$ - intensidade de precipitação (mm/h)

$i(t)$ - taxa de infiltração em função do tempo (mm/h)

$e(t)$ - evaporação em função do tempo (mm/h)

Portanto, para $t > t_s$ o escoamento ocorre para o sistema de drenagem se $r(t) > i(t) + e(t)$. A quantidade de precipitação que resulta em escoamento é definida como precipitação útil $p_n(t) = r(t) - i(t) - e(t)$. Existem vários modelos desenvolvidos para descrever a transformação da precipitação útil no caudal real que entra no sistema de drenagem $q(t)$, tais como o modelo do reservatório linear (Clemens, 2001).

De acordo com Nash e Sutchiffe (1970), o modelo do reservatório linear ou o modelo da Cascata de Nash, é um modelo de precipitação – escoamento. Este modelo consiste na cascata de n reservatórios lineares idênticos (Figura 2.12). O valor de $q(t)$ é determinado usando a seguinte relação entre a intensidade da precipitação útil e a função de transferência $h(t)$ (Clemens, 2001):

$$q(t) = \int_0^t h(t - \tau) p_n(\tau) d\tau \quad (5)$$

A função de transferência $h(t)$ é definida como:

$$h(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left[\frac{t}{k} \right]^{n-1} e^{-\frac{t}{k}} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (6)$$

sendo:

k - constante do reservatório $(mm/h)^{1/n}$.

n - número de reservatórios.

t - tempo (h).

$p(t)$ - intensidade da precipitação útil em função do tempo (mm/h).

$q(t)$ - caudal escoado em função do tempo (mm/h).

$\Gamma(n)$ - Gama em função de n .

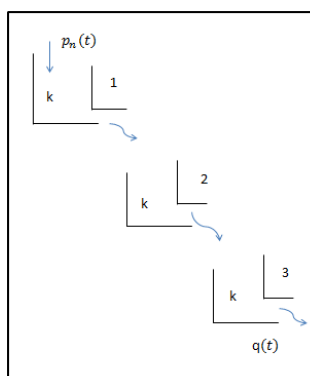


Figura 2.12 – Modelo da Cacata de Nash (Adaptado Clemens, 2001).

2.4.4 Modelos Hidráulicos

Tal como referido anteriormente, a modelação hidráulica permite simular o comportamento do escoamento ao longo do coletor e ao longo do tempo. Serão, de seguida, apresentados os modelos hidrodinâmicos traduzidos por equações matemáticas e a drenagem dual, que ocorre quando os coletores entram em carga.

2.4.4.1 Modelos Hidrodinâmicos

Os modelos hidrodinâmicos baseiam-se nas leis físicas da conservação da massa e da quantidade do movimento, e podem ser utilizados aquando de variações bruscas de caudal, sendo a sua representação mais fiel e completa da realidade do que a abordagem tradicional (Lei de Resistência de Manning-Strickler), utilizada em condições de escoamento em superfície livre em regime permanente e uniforme.

Para descrever o comportamento de um escoamento variável em superfície livre, podem utilizar-se as equações matemáticas unidimensionais (1D) e bidimensionais (2D) de Saint-Venant. Esta obtém-se a partir da integração das equações de Navier-Stokes, e que permitem determinar a altura de escoamento, e a velocidade média do escoamento. Para obter as equações de Saint-Venant, fazem-se as seguintes simplificações (Simões, 2012):

- Admite-se uma transmissão de pressão hidrostática;
- Admite-se que a velocidade e aceleração segundo o eixo vertical são desprezáveis;
- Admite-se uma inclinação pequena;
- Admite-se um fundo fixo.

Quando a direção do escoamento nos coletores for bem definida, e a secção for constante nos mesmos, estão reunidas as condições de aplicabilidade dos modelos unidimensionais representados na equação (Simões, 2006):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_t) \quad (8)$$

Em que:

A – área molhada.

Q – caudal.

t – tempo.

x – direção do escoamento.

h – altura da água.

g – aceleração da gravidade.

S_0 – declive do canal.

S_t – função do atrito.

Tal como referido anteriormente, a primeira equação representa a conservação da massa, enquanto a segunda se refere à conservação da quantidade de movimento.

Para além das simplificações consideradas para obter as equações de Saint-Venant a partir da integração das de Navier Stokes, podem considerar-se outras simplificações das equações de

Saint- Venant para campos de aplicabilidade diferentes. Se se estiver em regime permanente, isto é, se não forem consideradas as variações ao longo do tempo, as equações 3 e 4 podem ser simplificadas (Marques *et al*, 2013):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_t) \quad (10)$$

No que toca ao modelo da onda difusa, a equação de conservação da quantidade de movimento, ou equação dinâmica, podem desprezar-se as parcelas referentes à aceleração local e convectiva (Marques *et al*, 2013).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = (S_0 - S_t) \quad (12)$$

Pode considerar-se ainda mais uma simplificação resultante do modelo da onda cinemática. Neste modelo, a equação dinâmica simplifica-se, considerando apenas as parcelas referentes ao declive e ao atrito, desprezando os termos da aceleração e inércia obtendo as seguintes equações:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

$$S_0 - S_t = 0 \quad (14)$$

O campo de aplicabilidade das versões simplificadas das equações de Saint-Venant que pode ser expresso em função de parâmetros adimensionais (Figura 2.13 2.13), nomeadamente baseados num número geométrico (G^*) e de Froude (F^*) (Leitão, 2009):

$$G^* = \frac{h}{\frac{q}{i_e} \times S_0} \quad (15)$$

$$F^* = \frac{q}{\sqrt{gh} * h} \quad (16)$$

em que:

q – caudal afluente de percurso.

i_e – intensidade da precipitação útil.

h – altura de água.

g – aceleração da gravidade.

S_o – declive do canal.

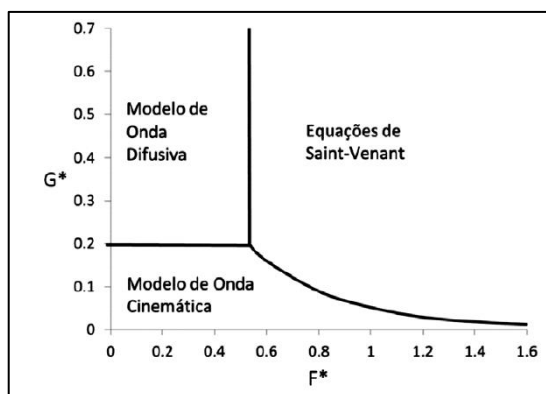


Figura 2.13 – Campo de aplicação das equações de Saint-Venant e simplificações (Marques *et al*, 2013).

2.4.4.2 Drenagem Dual

Na ocorrência de fenómenos de precipitação intensa, o nível de água pode atingir o topo do coletor, ou seja, o sistema poderá entrar em carga (Figura 2.14). Nestes casos, a água que sai dos coletores pode sair através dos sumidouros, sarjetas e câmaras de visita, surgindo à superfície. Deste modo, no mesmo coletor é possível coexistirem dois tipos de escoamentos diferentes: em superfície livre e em pressão.

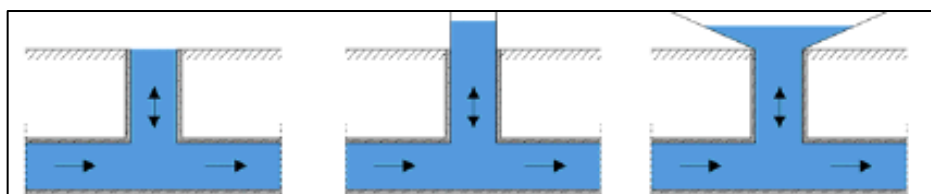


Figura 2.14 – Sistemas de drenagem a entrar em carga de diferentes modos (adaptado de (Marques *et al*, 2013)).

Tendo em conta que as equações de Saint-Venant aplicam-se, somente a escoamentos em superfície livre, torna-se inadequado o uso das mesmas, para condições de escoamento a ocorrer sob pressão. Para colmatar este problema, utiliza-se o conceito de fenda de Preissmann (Butler e Davies, 2011), sendo esta uma fenda imaginária (Figura 2.15) que se introduz na parte superior dos coletores, permitindo que a altura do escoamento exceda o seu diâmetro, simulando o efeito do escoamento em pressão.

O conceito de drenagem dual surge para modelar interações entre os dois sistemas, designadamente entre a rede de coletores, que pode ou não estar em carga, e o escoamento superficial. A modelação de um sistema de drenagem dual implica o uso de um suporte informático com uma base de dados composta com informação relativa ao uso do solo, ligações entre as zonas de armazenamento, os caminhos para o escoamento. Por outro lado, o sistema deverá ser capaz de modelar escoamentos em superfície livre, transição para sobrecarga e sobrecarga (Marques *et al*, 2013).

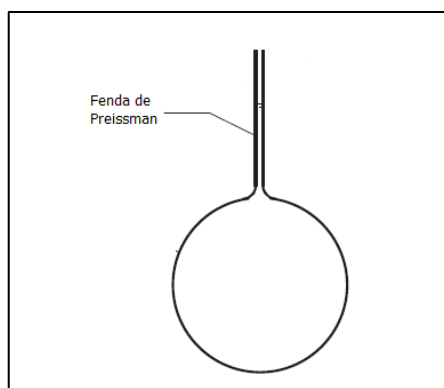


Figura 2.15 – Fenda de Preissmann (Adaptado Butler e Davies, 2011).

Existem dois tipos de modelos de drenagem dual (Marques *et al*, 2013), que, em comum, têm o facto de ambos representarem um modelo unidimensional para as redes de coletores (Figura 2.16). O que distingue estes dois modelos é a representação da superfície, enquanto um representa unidimensionalmente (1D/1D), outro representa a superfície através de um modelo bidimensional (1D/2D).

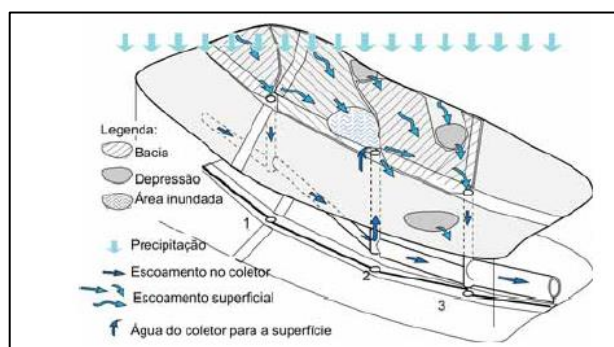


Figura 2.16 – Representação esquemática do conceito de drenagem dual (Djordjevic *et al*, 1999).

De seguida, apresenta-se o Quadro 2.7 que resume das principais características e diferenças dos modelos 1D/1D e 1D/2D (Leitão, 2009), (Simões *et al*, 2011).

Quadro 2.7 – Descrição, fiabilidade, tempo de execução dos modelos 1D/1D, e 1D/2D (adaptado Paula, 2013).

	Modelação	
	1D/1D	1D/2D
Descrição	Superfície discretizada considerando o domínio como um conjunto de nós conectados por ligações, em que o nós representam junções de canais, e as ligações os canais abertos.	Dividem a superfície em elementos pequenos individuais, onde em cada elemento está associada informação física e geográfica como o tipo de cobertura, propriedades do solo, coeficiente de rugosidade.
Fiabilidade dos resultados	Os resultados destes modelos são aceitáveis apenas quando a incerteza, associada aos caminhos superficiais que o escoamento segue, é pequena.	Maior certeza, quando o escoamento é multidimensional.
Velocidade de execução	Mais rápidos, por serem relativamente mais simples.	Mais lentos, por serem mais complexos.

2.4.5 Software SWMM

O software *Storm Water Management Model*, SWMM, foi desenvolvido nos Estados Unidos, pela Agência de Proteção Ambiental, na década de setenta e foi sofrendo sucessivos melhoramentos durante mais de 30 anos (Butler e Davies, 2011). O SWMM, utilizado em

todo o mundo, permite a simulação da quantidade e qualidade do escoamento superficial em áreas urbanas ou não urbanas. Para além disso, permite a simulação do comportamento hidráulico e hidrológico e o estudo da qualidade da água. Este *software*, é utilizado no planeamento e análise de projetos de sistemas de drenagem de águas pluviais, bem como para o projeto de sistemas de coletores de águas residuais (separativos, unitários ou mistos). De facto, este *software* permite obter *outputs*, através de simulações, bastante interativos, nomeadamente, áreas de drenagens separadas por cores, mapas de sistemas de coletores de água, etc. Como modelo hidrológico o SWMM utiliza, para quantificar a infiltração, o Modelo de Horton, explicitado no capítulo dos modelos hidrológicos.

O SWMM utiliza, como modelos hidráulicos, equações distintas com aplicabilidades diferentes. Quando as condutas não se encontram em carga (parcialmente cheias) o SWMM utiliza, as equações de Saint-Venant, apresentadas no capítulo referente aos modelos hidrodinâmicos.

Em suma, este *software* possibilita, através de ferramentas de modelação, as seguintes aplicações (EPA, 2012):

- Conceção e dimensionamento das componentes da rede de drenagem para o controlo de cheias.
- Delimitação das zonas de cheias.
- Conceção e dimensionamento de estruturas de retenção, como bacias, com o intuito de controlar eficazmente as cheias e a qualidade de água.
- Minimização do transbordo de sistemas unitários e mistos.

2.5 Gestão do Risco de Inundação

2.5.1 Diretiva 2007/60/CE e D.L. nº 115/2010 – Relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações

As inundações podem provocar perdas de vidas e de bens materiais, bem como deslocação de população e danos do ambiente (Diretiva 2007/60/CE). Para além disso, as inundações podem comprometer e prejudicar gravemente o desenvolvimento económico. Apesar de a origem dos riscos de inundação ser natural, estes podem ser fortemente condicionados por fatores antropogénicos (INAG, 2014). De acordo com o Decreto-lei nº115/2010, define-se o seguinte conceito:

Inundação – “cobertura temporária por água de uma terra fora do leito normal, resultante de cheias provocadas por fenómenos naturais como a precipitação, incremento do caudal dos rios, torrentes de montanha e cursos de água efémeros correspondendo estas a cheias fluviais, ou de sobrelevação do nível do mar nas zonas costeiras”.

Tal como referido anteriormente, as inundações são fenómenos bastante complexos em relação à origem, previsão do risco e consequências, sendo por isso, fundamental compreender o funcionamento deste tipo de eventos (EEA, 2012).

De acordo com o esquema apresentado na Figura 2.17, a gestão de riscos de inundação assenta em três componentes: prevenção, proteção e preparação. Com estas três componentes é possível prevenir as crises provocadas pelas inundações, sendo este comportamento preventivo, o mais adequado a utilizar pelos países para estarem protegidos e preparados em caso de inundações.



Figura 2.17 – Componentes da gestão dos riscos de inundações.

Atualmente, em muitos países, existem planos de gestão do risco de inundação, que incluem medidas e políticas de prevenção, proteção e preparação. Os planos de gestão dos riscos de inundação devem abranger todos os aspetos relativos à gestão dos riscos de cheia e incluem políticas de promoção de práticas de utilização sustentável do solo, de melhoria da retenção de água, e ainda, medidas para controlar as inundações em determinadas zonas. É importante referir que os planos de gestão do risco de inundação, adotados em diversos países, não são estáticos no tempo, devendo, por isso, ser periodicamente revistos, e se necessário, atualizados. Esta atualização deve-se, entre outras razões, ao facto de os riscos de inundação terem mudado ao longo do tempo (Rocha, 1998). Mais à frente será explicitado o conceito de “risco”, e de que formas pode ser quantificado.

Para a atenuação do risco de inundações urbanas e para um desenvolvimento sustentável, têm sido incorporados novos conceitos de drenagem, onde se incluem considerações de sustentabilidade. Os Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS) têm como objetivo a redução do escoamento superficial de águas pluviais através de estruturas que controlam eficazmente os fluxos de água. Para além disso, diminuem os efeitos de urbanização, criando áreas permeáveis que facilitam a infiltração e retenção das águas pluviais. Deste modo, a abordagem dos SUDS tem três vias: gestão sustentável dos riscos ambientais, como os de inundação, minimização dos impactos do desenvolvimento da quantidade e qualidade do

escoamento, e maximização da biodiversidade de uma forma suave (Figura 2.18) (Woods *et al*, 2007).

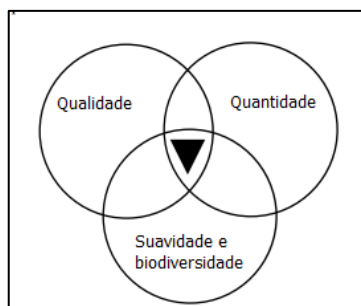


Figura 2.18 – Abordagem SUDS - Objetivos da drenagem sustentável (adaptado Woods *et al*, 2007).

Atualmente, os sistemas SUDS têm vindo a ser desenvolvidos e implantados em vários países, sendo que se podem destacar os seguintes dispositivos: pavimento permeável, pavimento semi-permeável, bacias de retenção e detenção, valas de infiltração, poços de infiltração, micro-reservatórios, etc (Butler e Davies, 2011).

2.5.2 Cheias em Portugal e no Mundo

O problema das cheias é, atualmente, uma constante preocupação em todo o mundo. As características das cheias, no que diz respeito a aspetos hidráulicos e hidrológicos, têm sido estudadas técnica e cientificamente ao longo das últimas décadas (Rocha, 1998).

De acordo com Stavroula, (2008) muitas cidades no mundo tiveram graves problemas causados por cheias. No ano de 2001, em Houston, Texas (E.U.A), a tempestade “Alison” provocou cheias que causaram danos com custos na ordem dos dois biliões de dólares. Em Jacarta, na Indonésia no ano de 2007, cinco pessoas morreram e 100 mil ficaram desalojadas no seguimento de chuvas torrenciais durante três dias (DD@, 2007). Mais recentemente, no sudeste de Inglaterra, em 2014, mais de seis mil famílias tiveram que abandonar as suas casas, devido às fortes chuvas que abateram o país (N.M.@, 2014).

O flagelo das cheias afetou e afeta milhares de pessoas em todo o mundo, pelo que se torna cada vez mais importante conhecer os fatores que estão na sua origem, bem como reduzir as suas consequências nefastas.

A urbanização desordenada contribuiu para o mau ordenamento territorial durante muitos anos em Portugal. Para além das cheias provocadas pelo crescimento desordenado das cidades, os ecossistemas naturais também têm sido afetados ao longo dos anos.

Nas últimas décadas, Portugal, tal como outros países, tem sofrido grandes perdas devido ao flagelo das inundações. Recentemente, em Portugal, têm-se registado vários episódios de cheias urbanas, com consequências graves em termos económicos, nomeadamente em Coimbra e Alcântara.

Todas as questões associadas a este problema têm vindo a preocupar os países, nomeadamente os pertencentes à União Europeia, sendo esta questão alvo de políticas de gestão. A gestão integrada de recursos hídricos inclui a componente da gestão do risco de inundações. Deste modo, existem planos de gestão de bacias hidrográficas desenvolvidos pela UE que se referem a aspetos ligados às cheias (EEA, 2012). Para a prevenção de cheias e inundações, vários países da Europa implementaram políticas específicas, nomeadamente criaram a Diretiva das Inundações da Comissão Europeia em 2007.

2.5.3 Mapas de Zonas Inundáveis e Mapas de Risco

De acordo com o Decreto-lei nº115/2010, em cada região hidrográfica ou unidade de gestão, será avaliado o risco de inundação e as respetivas medidas para a sua mitigação. Para isso, serão elaboradas cartas de zonas inundáveis, e cartas de riscos de inundação, indicando as potenciais consequências associadas a diferentes cenários de inundações, incluindo a exposição das atividades que provocam o aumento do risco de inundações.

Após a definição dos conceitos de inundação, e a apresentação das diversas origens das cheias, pode-se definir o conceito de risco de inundação. Assim de acordo com o Decreto-lei nº115/2010:

Risco de Inundação – “a combinação da probabilidade de inundações e das suas potenciais consequências prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as atividades económicas”.

Para além desta definição, o Gabinete das Nações Unidas para a Redução do Risco de desastres, (UNISDR), classifica o risco como a probabilidade de consequências prejudiciais ou perdas previstas resultando das interações entre perigos sociais ou naturais e circunstâncias vulneráveis, neste caso as inundações.

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade} \times \text{Consequência}$$

Para determinar o risco de acontecer um determinado fenómeno, neste caso inundação, é fundamental é necessário quantificar a probabilidade e as consequências. A probabilidade pode-se quantificar através de mapas de zonas inundáveis, associados a um período de retorno (T), enquanto as consequências são obtidas através da quantificação do impacto.

A escala da probabilidade poderá dividir-se em bastante provável, provável, moderadamente provável, pouco provável, e rara, enquanto as consequências prejudiciais, de acordo com a

diretiva 2007/60/CE, são expressas em termos de habitantes potencialmente afetados, atividades e instalações afetadas em caso de inundação.

A probabilidade de ocorrência de um determinado evento de inundação relaciona-se com vários fatores associados ao sistema de drenagem, nomeadamente as suas condições de funcionamento. Tal como referido, a probabilidade de um evento baseia-se no período de retorno, T, e a partir do período de retorno de um evento de precipitação, é possível determinar a sua frequência e a sua probabilidade (inverso do período de retorno).

Depois de definida a probabilidade de ocorrência, e as consequências em caso de ocorrência estão reunidas as condições para determinar o risco. Desta forma, pode fazer-se uso de uma ferramenta, denominada matriz de risco, que conjuga a probabilidade e a consequência, fornecendo uma classificação para cada zona em análise (Figura 2.19).

Probabilidade elevada	Risco baixo	Risco moderado	Risco elevado	Risco extremo	Risco extremo
Probabilidade média-alta	Risco baixo	Risco moderado	Risco elevado	Risco elevado	Risco extremo
Probabilidade média	Risco baixo	Risco moderado	Risco moderado	Risco elevado	Risco extremo
Probabilidade média-baixa	Risco baixo	Risco baixo	Risco moderado	Risco elevado	Risco extremo
Probabilidade baixa	Risco baixo	Risco baixo	Risco moderado	Risco moderado	Risco elevado
	Gravidade residual	Gravidade reduzida	Gravidade moderada	Gravidade acentuada	Gravidade Crítica

Figura 2.19 – Exemplo de uma Matriz de Risco de Inundação (Barreiros *et al*, 2009).

A partir da matriz de risco, é possível elaborar o mapa de risco que contém informação resultante da classificação de cada zona da área a analisar. Normalmente, associam-se cores a estes mapas, sendo o vermelho associado ao maior risco de inundação e o verde a menor (Figura 2.20). Deste modo os mapas de risco de inundação indicam as consequências adversas associadas às inundações desagregadas por graus de probabilidade.

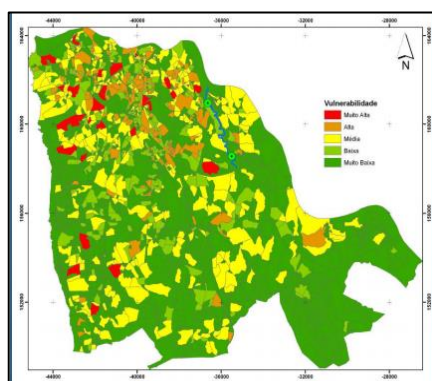


Figura 2.20 – Exemplo de um mapa de risco de inundação da bacia hidrográfica do Douro-Rio Febrós (adaptado Fernandez, 2012).

Além dos mapas de risco de inundação existem os mapas de zonas inundáveis (Figura 2.21), que delimitam as áreas, que podem ser afetadas por inundações, de acordo com uma ou várias probabilidades. Estes mapas contêm informação relativa à probabilidade de determinada zona inundar e são elaborados com base em análises hidrológica e hidráulica e podem ser elaborados com a ferramenta ArcGis.

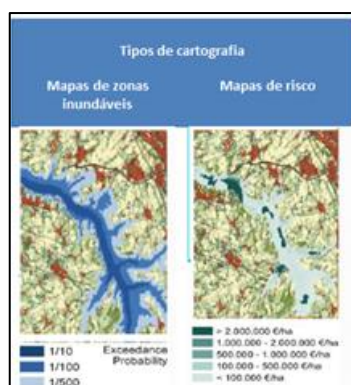


Figura 2.21 – Exemplo de mapas de zonas inundáveis, e de mapas de risco (Adaptado Moel, 2009).

Outra forma de definir risco, desta vez no contexto das alterações climáticas, é a junção de três campos distintos: eventos climáticos, vulnerabilidade, exposição (Figura 2.22). Para uma melhor perceção, definem-se os conceitos (IPCC,2011):

Eventos climáticos – “ ocorrência de um valor ou de uma variável de tempo ou clima acima (ou abaixo) do valor normalmente observado. Para simplificar, denominam-se os eventos climáticos extremos como “extremos climáticos”.”

Vulnerabilidade – “ a propensão ou predisposição em ser afetado adversamente.”

Exposição – “ presença de pessoas; meios de subsistência; serviços e recursos ambientais; infra-estruturas; em lugares que poderiam ser afetados negativamente.”

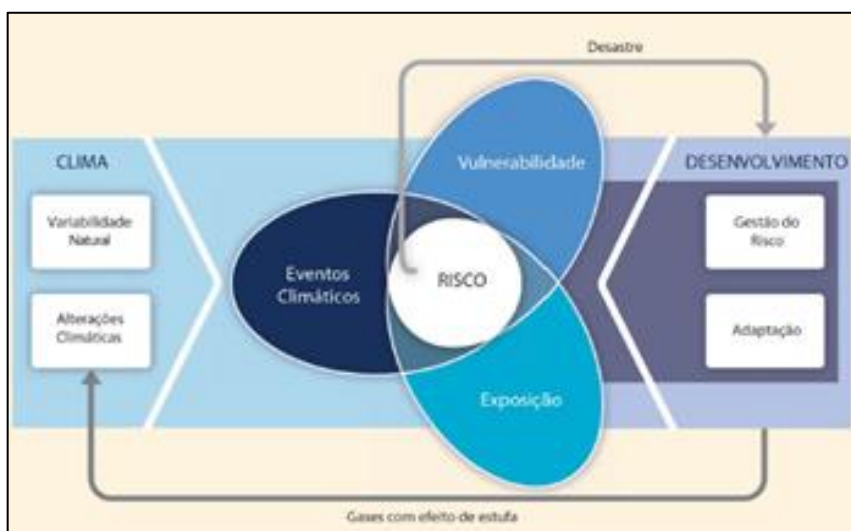


Figura 2.22 – Esquema resumo da interação entre as várias componentes do Risco (Adaptado IPCC, 2011).

Para além de classificar o risco qualitativamente, pode-se traduzir o risco de inundação quantitativamente. Para isso, é necessário combinar o conhecimento hidrológico e hidráulico com a frequência dos eventos que causam inundações, bem como quantificar economicamente os danos causados (Ryu, 2008). A frequência das inundações pode ser determinada por uma análise estatística das inundações históricas, porém, os dados referentes às inundações históricas nem sempre estão disponíveis, sendo que, na maioria dos casos, se utilizam modelos de simulação baseados em eventos, existindo várias metodologias para determinar estimativas da frequência de inundação.

Os danos causados pelas inundações podem ser classificados em prejuízos tangíveis, caso seja fácil atribuir um valor monetário a esse dano, ou prejuízos intangíveis. Para além disso, podem dividir-se em diretos ou indiretos: os danos diretos resultam dos danos causados por contacto da inundação, como por exemplo, danos nas paredes, tetos, chão, etc.; os indiretos

incluem perdas de produção, e conseqüentemente, perdas de lucros, como por exemplo, a interrupção do tráfego rodoviário (Dias, 2011).

Em relação a como quantificar, economicamente, os danos das inundações, vários estudos têm sido desenvolvidos e têm em conta as características das inundações em termos de avaliação de danos, como a velocidade, a duração da inundação ou a carga de sedimentos. Apesar de a profundidade da inundação ser tradicionalmente utilizada para quantificar os danos, existem outros fatores mais significativos dependendo das características das inundações. Em determinados casos, os efeitos combinados da velocidade e profundidade podem provocar danos estruturais nos edifícios. Em 2006, Balmforth conclui que quando o produto entre a profundidade e a velocidade da inundação apresenta valores maiores que $3\text{m}^2/\text{s}$, os danos estruturais causados podem ser bastante significativos. Segundo Wind *et al* (1999), a duração da inundação pode ser também um fator de extrema importância para o comportamento da estrutura após a exposição contínua de água (Ryu, 2008). Penning-Roswell relacionaram os custos dos danos, provocados pelas inundações, em função da altura de água atingida, de acordo com o tipo de edifício afetado, obtendo curvas de custo diferentes (Figura 2.23) (Penning-Roswell *et al*, 2005).

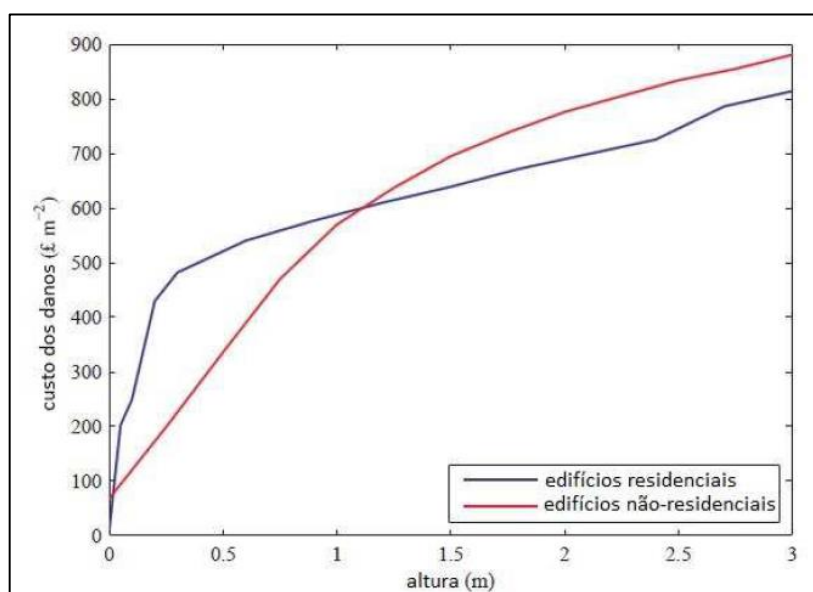


Figura 2.23 – Altura de água – custo dos danos (Penning-Roswell *et al*, 2005).

As funções de profundidade de inundação e danos são mostradas na Figura 2.24 e resultam de um estudo de Hammond *et al* (2012) realizado no Instituto de Modelação da Água de

Bangladesh e a Universidade de Dhaka. Tal como o estudo anterior, este contabiliza os danos em libras (GBP) em função da altura de água de acordo com dez categorias de uso distintas. A cada categoria associa-se uma função de custo diferente.

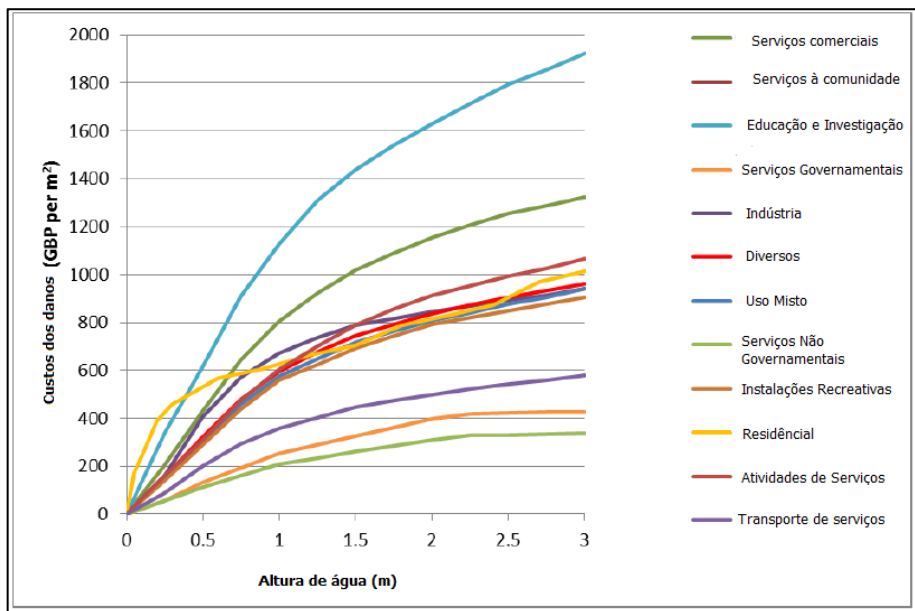


Figura 2.24 – Altura de água – custo dos danos (Hammond *et al*, 2012).

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Após a conclusão da primeira fase, onde se apresentam as razões pelas quais este assunto é tão importante, procedendo à elaboração da revisão bibliográfica, onde se adquiriram os conhecimentos necessários sobre o tema, passamos à realização da segunda fase.

Nesta fase serão testadas várias abordagens, na medida em que a após a leitura de diversos artigos (Quadro 2.5), relacionados com os diferentes cenários climáticos e as curvas IDF, para definir exatamente a abordagem mais adequada a utilizar no estudo de caso. É importante referir que, atualmente, ainda não existem uma adaptação das curvas IDF para Portugal que reflita as alterações climáticas, sendo por isso crucial realizar uma análise de sensibilidade dos resultados para vários cenários usados nos diferentes países que já possuem este tipo de estudos. De seguida, serão testadas duas metodologias para diferentes cenários, na rede de drenagem dual (1D/1D) já calibrada, disponível no formato SWMM (Simões, 2012).

Serão elaborados mapas de risco para a situação atual e para os diferentes cenários climáticos. Para isso, serão realizadas simulações hidráulicas que permitirão demarcar as zonas que inundam em função das diferentes alturas de água pela qual serão afetadas. Para além das simulações hidráulicas, proceder-se-á à quantificação do risco que será feita aplicando funções de custo, adaptadas para Portugal, que relacionam a altura da água (obtida através dos resultados das simulações hidráulicas) com os danos provocados. Será utilizada uma função de custo, de acordo com o uso dos edifícios.

Por fim, serão analisados os resultados bem como realizadas comparações entre os resultados dos diferentes cenários, comparando com o cenário base (atual), obtido utilizando as curvas IDF atuais.

3.2 Estudo de Caso

A área selecionada para testar a metodologia definida localiza-se na cidade em Coimbra. A cidade de Coimbra tem sido palco de várias inundações urbanas, afetando transportes públicos e propriedades privadas, entre as quais se destacam as de 2008 e 2013 (Figura 3.1), deste modo, torna-se interessante estudar esta área.



Figura 3.1 – Praça 8 de Maio, inundada nas cheias de 24/12/2013 e de 21/09/2008 (Retirado de D.C.®, 2013).

A bacia hidrográfica da zona de estudo tem cerca de 1.5 km² e subdivide-se em três regiões com características distintas (Quadro 3.1). O sistema de drenagem desta zona tem 24.8 km de comprimento, 29 km dos quais unitários, e, apenas 1.2 km são exclusivamente para águas pluviais.

Quadro 3.1 – Características das diferentes zonas da bacia hidrográfica da zona de Coimbra (adaptado Marques *et al*, 2013).

Zona	Área (Km ²)	Características de ocupação
"Baixa"	0.4	Zona baixa /maioritariamente comércio e serviços
"Alta"	0.2	Relevo acentuado, altos declives / altamente urbanizada
Restante área	0.9	Altamente urbanizada

O tempo de concentração (t_c) desta bacia (Figura 3.2) é estimado em 45 minutos (Marques *et al*, 2013). As simulações realizadas no SWMM serão realizadas para eventos de duração de 135 minutos de acordo com Portela *et al* (2000). De acordo com o estudo realizado por estes autores, um evento com duração três vezes superior ao t_c (135 minutos) pode conduzir a um caudal de ponta de cheia superior ao caudal para um evento de duração t_c . Optou-se por esta abordagem, pois segundo os mesmos autores, ao utilizar eventos críticos, isto é, com duração igual ao t_c , os resultados obtidos podem não corresponder à realidade conduzindo, por defeito, os resultados relativos aos caudais.

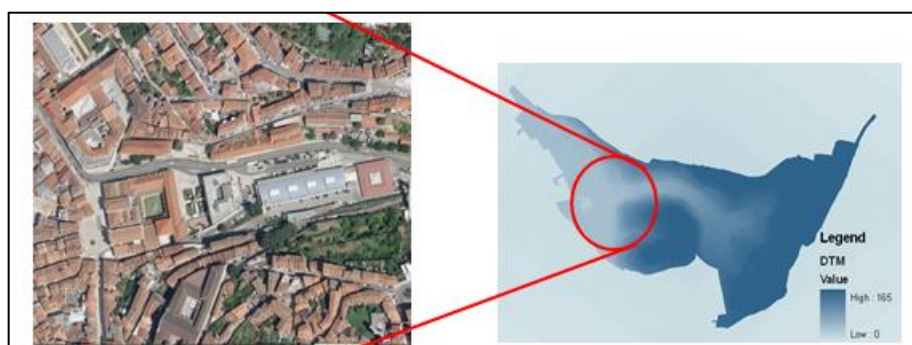


Figura 3.2 – Área de estudo pormenorizada (adaptado Simões *et al*, 2010).

3.3 Metodologia para a elaboração de mapas de zonas inundáveis

3.3.1 Introdução

Para elaborar os mapas de zonas inundáveis é necessário averiguar que zonas da rede inundam, bem como as alturas de água de acordo com os eventos de precipitação definidos. Para simular o comportamento da rede às alterações climáticas, definiu-se a precipitação, de acordo com a adaptação das curvas IDF (Figura 3.3). Vários estudos foram apresentados, aquando da revisão bibliográfica, relacionados com as hipóteses de adaptação das curvas IDF, e quais as razões pelas quais essas hipóteses não se aplicam à zona de estudo considerada.

Após a adaptação das curvas IDF, serão definidos vários eventos de precipitação, de acordo com duas metodologias diferentes, para serem testados no *software* SWMM.

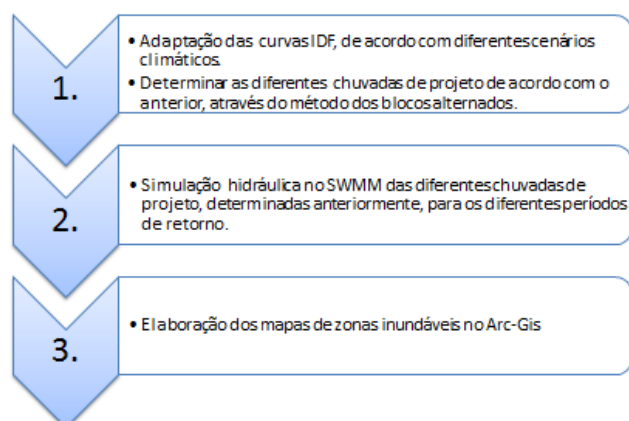


Figura 3.3 – Esquema da metodologia adotada para a elaboração dos mapas zonas inundáveis.

3.3.2 Alterações Climáticas

3.3.2.1 Abordagem 1- Segundo o IPCC

A primeira abordagem aplicada, para obter as chuvadas de projeto, é uma abordagem simplista que resulta da aplicação direta dos resultados obtidos pela avaliação do 5º Relatório do IPCC, (IPCC, 2013). Neste relatório, prevê-se um agravamento da intensidade em cerca de 10 a 20%, para a região Mediterrânica para todos os períodos de retorno (T=2, 20 e 100 anos), e para todos os cenários. Associou-se o aumento de 10% ao Baixo cenário (B2) e os 20% ao Alto cenário (A2). Na Figura 3.4, encontram-se as chuvadas de projeto obtidas através desta metodologia incluindo o cenário atual. Por limitação de páginas desta dissertação, apresenta-se de seguida, apenas as chuvadas de projeto para um período de retorno de 100 anos.

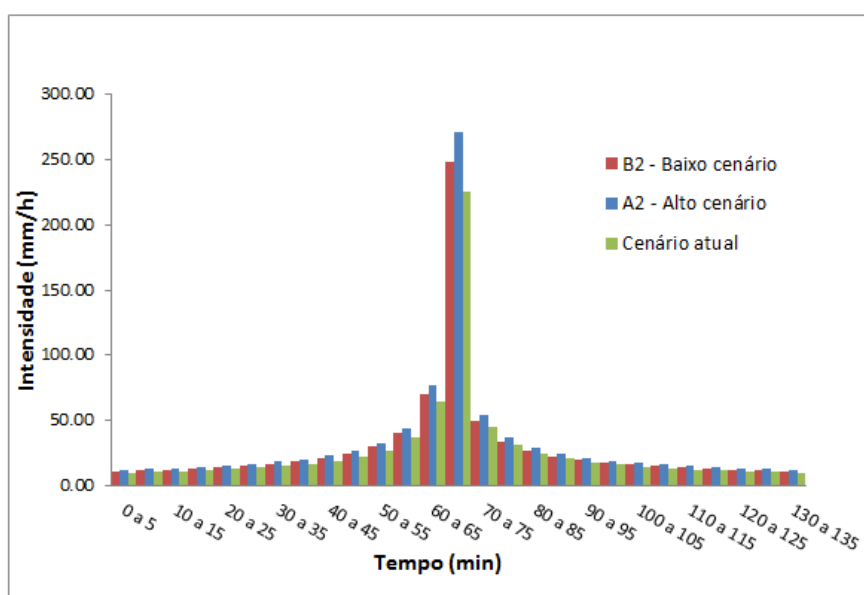


Figura 3.4 – Método dos blocos alternados para T=100 anos, para a situação atual, baixo e alto cenário climático.

É importante referir que o cenário atual se refere à chuvada de projeto calculada a partir das curvas IDF atuais, ou seja, sem nenhuma percentagem de aumento.

3.3.2.2 Abordagem 2 - RCP 8.5

Um estudo desenvolvido para Madrid, que utiliza a mesma metodologia do estudo de Barcelona (Rodriguez *et al*, 2014) aponta, aproximadamente, para chuvadas de duração de

135 minutos e de acordo com o cenário climático RCP 8.5, fatores climáticos de 1,16 e 1,08 para o 2º e 3º terço do século XXI, respetivamente (Casas-Castilho e Rodriguez-Solo, 2014). Deste modo, compraram-se as curvas IDF de Madrid com as de Coimbra, concluindo que estas têm comportamentos semelhantes, apresentando uma diferença máxima na ordem dos 13% (Figura 3.5). Tendo em conta isto, será utilizada esta abordagem (equação 1) para obter os eventos de precipitação, para a metodologia 2.

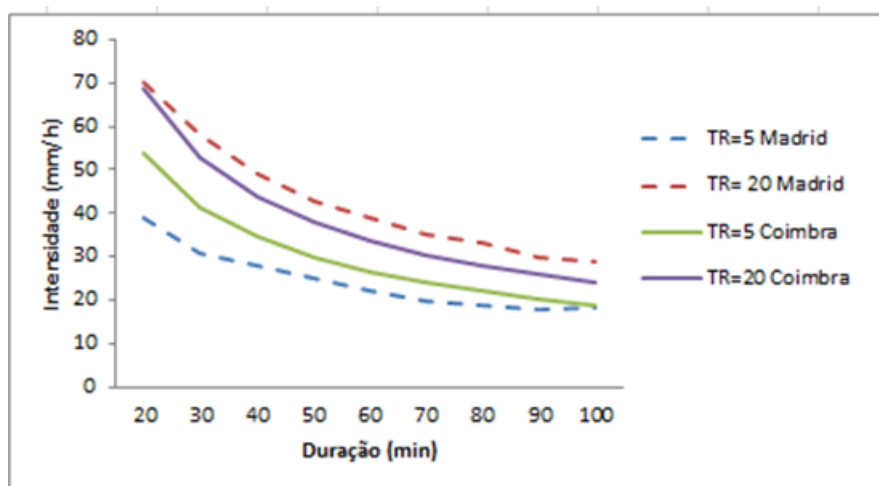


Figura 3.5 – Curvas IDF Coimbra e Madrid (Adaptado Muñoz *et al*, 2004).

Tal como o referido anteriormente, segundo Casas-Castillo e Roddriguez-Solo, (2014), é esperado um aumento da intensidade de precipitação, no segundo terço do século XXI, na ordem dos 16% para Madrid, de acordo com o cenário climático RCP 8.5. Mais uma vez, aplicou-se o método dos blocos alternados para obter a chuvada de projeto, (Figura 3.6) a inserir no *software* SWMM. Segundo os mesmos autores, a metodologia utilizada é a mesma que a apresentada por Rodriguez *et al* (2014). Como tal, multiplica-se o fator climático 1.16 pelas curvas IDF atuais de Coimbra, de acordo com a equação (1). Tal como na metodologia anterior, determinaram-se as chuvadas de projeto para T=2, 20 e 100 anos, mas, mais uma vez, apenas se apresentam os resultados para um período de retorno de 100 anos. É importante referir que, de acordo com o IPCC, (2013) o cenário RCP 8.5 corresponde a um alto cenário de emissões de gases de estufa.

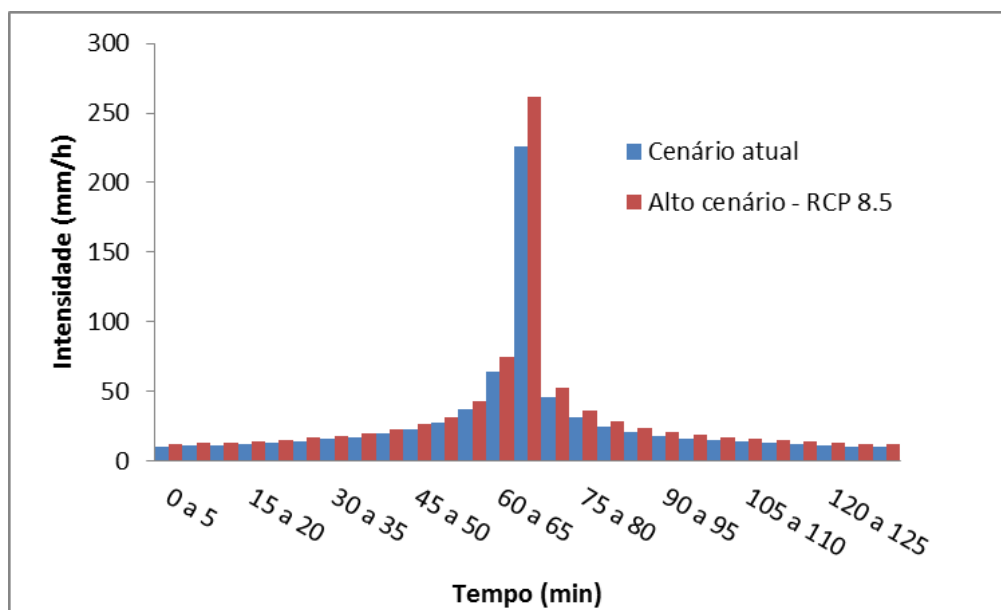


Figura 3.6 – Eventos de precipitação adaptados às alterações climáticas para o cenário climático RCP 8.5, para um período de retorno de 100 anos.

3.4 Metodologia para a classificação do risco

A metodologia para elaborar os mapas de risco segue o seguinte esquema (Figura 3.7):

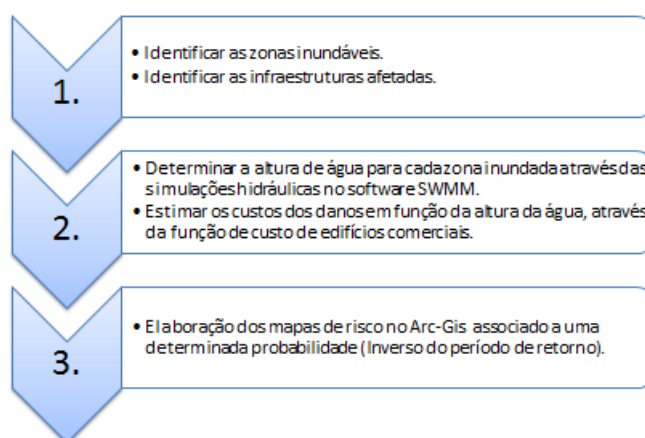


Figura 3.7 – Esquema da metodologia utilizada para a elaboração dos mapas de risco.

A diretiva 2007/60/CE aborda o risco de inundação como o resultado entre a probabilidade física de ocorrência de uma inundação e a exposição de uma determinada comunidade e o seu grau de preparação para o evento em causa.

Optou-se por realizar uma análise quantitativa do risco, ao invés da abordagem qualitativa, pois esta última, associada a uma matriz de risco, é bastante subjetiva e complexa, sendo necessário uma grande quantidade de informação para a utilizar. Para além disso, quantificar algo em termos monetários, permite uma visão mais clara das consequências inerentes a determinado evento. Para a classificação do risco, serão elaborados mapas de risco, de acordo com o custo, associado aos danos, provocado por cada uma das chuvadas de projeto apresentadas anteriormente.

A metodologia associada à classificação do risco, tal como o referido anteriormente, é uma metodologia quantitativa, em que se pretende traduzir os danos provocados a um custo monetário. De acordo com o apresentado na revisão bibliográfica, podem quantificar-se os danos de acordo com uma variedade de parâmetros como a velocidade de escoamento, duração da chuvada, ou a altura de água.

Neste caso, serão utilizadas funções de custo que relacionam a altura de água com o custo do dano (Figura 2.24), de acordo com o uso do edifício inundado (tipologia). Na zona de estudo a maioria das infraestruturas são de uso comercial. Como tal, utilizou-se a função relativa a essa tipologia. Deste modo, obteve-se a seguinte curva com a respetiva equação que a traduz (Figura 3.8):

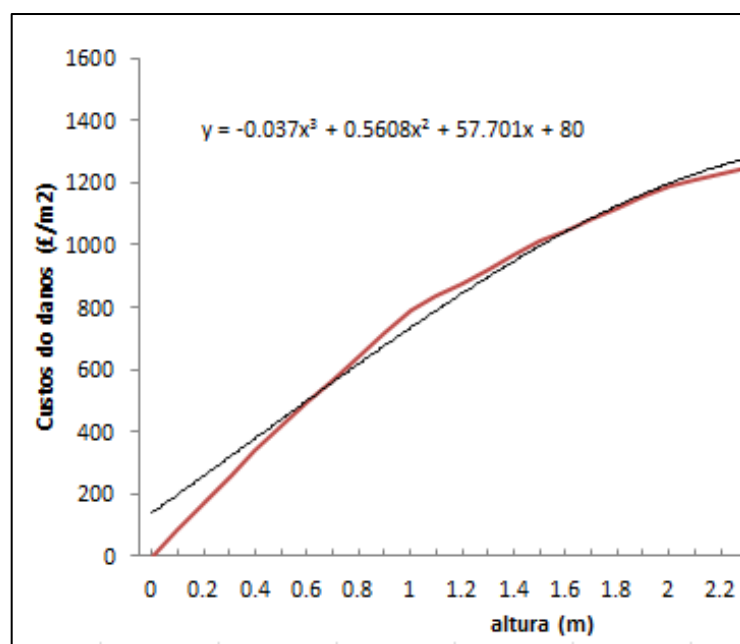


Figura 3.8 – Curva de custos dos danos em função da altura de uso comercial (Adaptado Hammond *et al*, 2012).

A curva de custos dos danos, em função da altura de água, apresentada anteriormente, é referente ao Produto Interno Bruto *per capita* do Reino Unido, pelo que necessita de ser atualizada a Portugal. Para isso, relaciona-se o valor do PIB *per capita* do Reino Unido com o valor do PIB *per capita* de Portugal. No dia 28 de Maio de 2014, segundo as previsões do Banco Mundial, o valor do PIB *per capita* do Reino Unido é de 35,5984 US\$, enquanto o valor do PIB *per capita* de Portugal é de 25,5643 US\$, obtendo uma relação entre os dois de aproximadamente 1.393. Para além de atualizar o valor do PIB *per capita*, converteram-se as unidades monetárias, neste caso as libras esterlinas (£) em euros (€). No dia 28 de Maio de 2014, 1 libra esterlina correspondia a 1.231 euros (BancodePortugal@, 2014). Assim, para traduzir o custo dos danos de inundação, de acordo com a altura de inundação, e para elaborar os mapas de risco utiliza-se a seguinte equação:

$$Custo(\text{euros}/\text{m}^2) = \frac{-0.037h^3 + 0.5608h^2 + 57.701h + 80}{1.393} \times 1.231 \quad (17)$$

Em que:

h - altura de água (m).

4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1 Rede de drenagem dual – Estudo de Caso

Após definidos, os eventos de precipitação, duração e os diferentes aumentos, de acordo com os cenários climáticos, proceder-se-á à sua simulação, na rede de drenagem dual 1D/1D, com ajuda do *software* SWMM. Para isso, adotaram-se três períodos de retorno diferentes, 2, 20 e 100 anos, com o objetivo de obter diferentes alturas de água, sendo espectável obter alturas maiores para períodos de retorno maiores. Para além disso, espera-se que para altos cenários (20% e RCP 8.5) as alturas de água obtidas também sejam superiores às obtidas para os baixos cenários.

Para cada uma das simulações das diferentes chuvadas, foram retirados os resultados das seguintes variáveis: caudal, volume e altura de água. Não são apresentados os resultados de todas as condutas, nem de todas as variáveis, por questões de espaço deste documento. Apenas em três condutas localizadas em pontos críticos onde existe uma forte tendência de acumulação de água. Os coletores escolhidos localizam-se no Mercado Municipal de Coimbra, à frente do Avenida e na Praça da República (Figura 4.1).

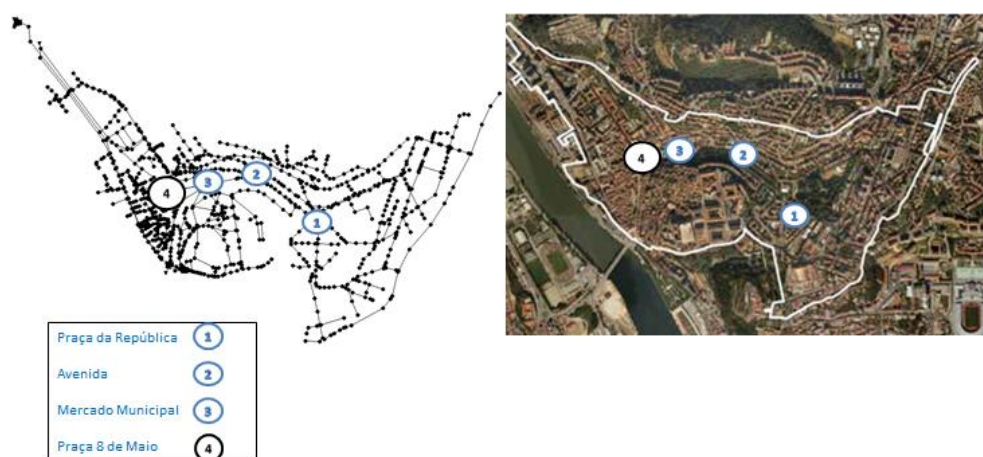


Figura 4.1 – Rede de Coimbra com as condutas críticas assinaladas (Adaptado Marques *et al*, 2013).

Para além da rede de coletores, analisaram-se os resultados obtidos na rede de escoamento superficial, e verificaram-se os valores dos caudais obtidos para cada cenário, em dois locais distintos, na Praça da República, e na Praça 8 de Maio (4), pois são dois locais propícios a cheias urbanas.

De seguida, apresentam-se os gráficos referentes aos caudais, obtidos para os quatro cenários analisados para o coletor da Praça da República (Figura 4.2), Avenida (Figura 4.3), e Mercado Municipal (Figura 4.4).

4.1.1 Localização 1 – Coletor localizado na Praça da República – T = 100 anos

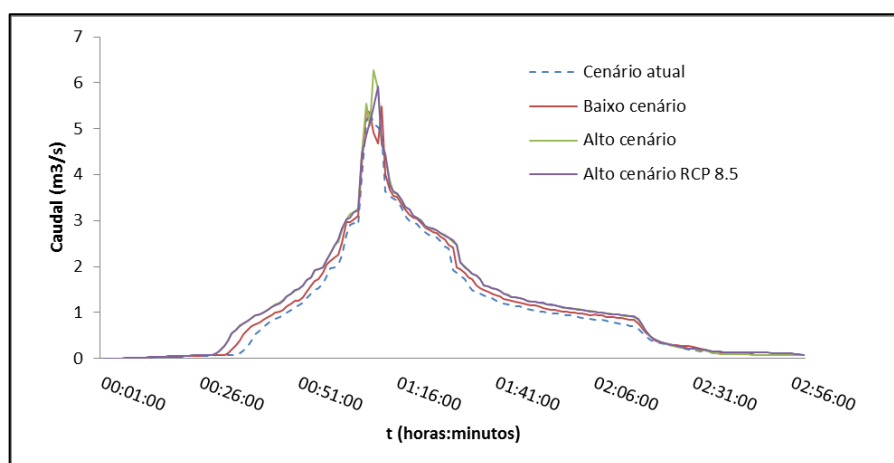


Figura 4.2 – Caudal obtido para o coletor localizado na Praça da República, para um período de retorno de 100 anos.

4.1.2 Localização 2 – Coletor localizado em frente ao Avenida – T =100 anos

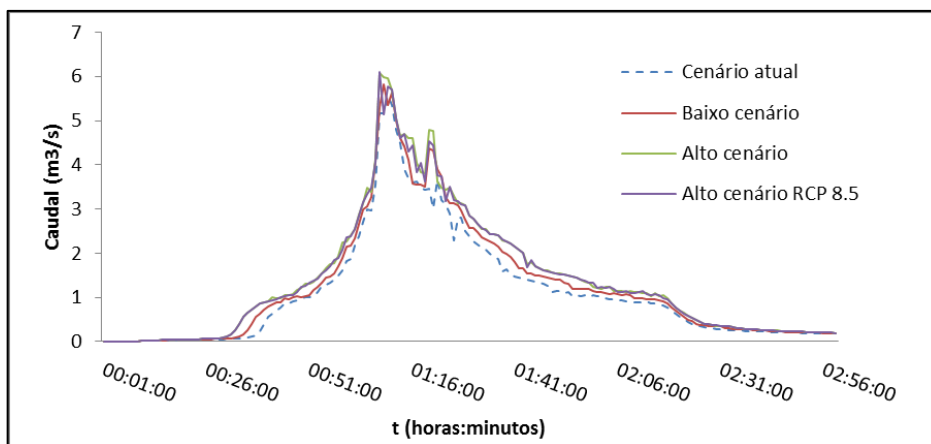


Figura 4.3 – Caudal obtido para o coletor localizado em frente ao Avenida, para um período de retorno de 100 anos.

4.1.3 Localização 3 – Mercado Municipal – T=100 anos

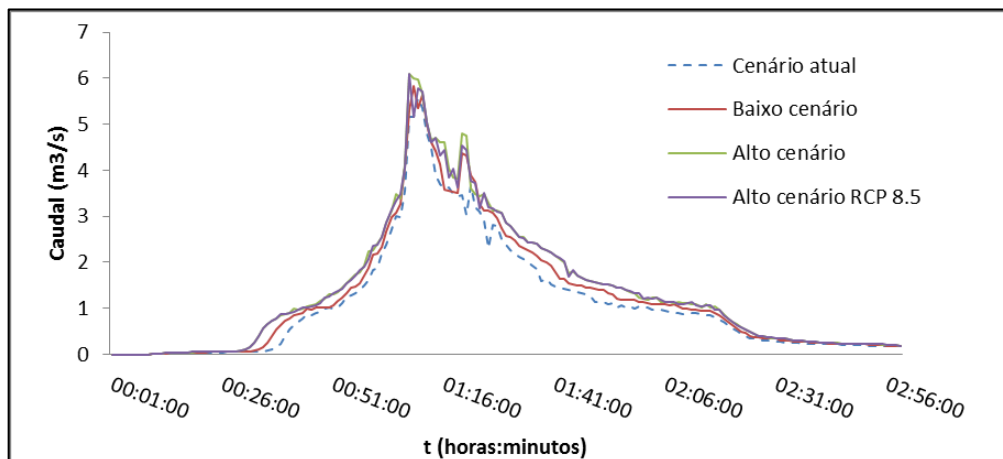


Figura 4.4 – Caudal obtido para o coletor localizado no Mercado Municipal, para um período de retorno de 100 anos.

Analisando os gráficos anteriores, conclui-se que todos eles seguem uma mesma tendência. Conforme o cenário aumenta, isto é, com o aumento da precipitação, o caudal obtido nos coletores é maior. No Quadro 4.1, apresentam-se as percentagens de aumento de caudal, em relação ao cenário atual.

Quadro 4.1 – Percentagem de aumento de caudal, em relação ao cenário atual, nos locais assinalados.

Aumento do caudal de pico em relação ao cenário atual (%)			
	Baixo cenário	Alto cenário – RCP 8.5	Alto cenário
Local1	2.43 %	10.26%	17.16%
Local2	4.68 %	9.16%	9.52 %
Local3	3.74 %	4.33 %	8.43 %

4.1.4 Localização 4 – Rede de escoamento superficial – Caudal – Praça 8 de Maio, Praça da República, Avenida e Mercado Municipal

Observando o gráfico da Figura 4.5, observam-se dois aspetos importantes:

- O comportamento da rede superficial, neste ponto, é muito semelhante quer para o cenário atual, quer para o baixo cenário. Como se pode observar, as curvas destes cenários são quase coincidentes. O mesmo se verifica para o alto cenário, em comparação com o alto cenário RCP 8.5.
- Para chuvadas de projeto maiores (altos cenários), conclui-se que o coletor entra em carga ligeiramente mais cedo do que para o baixo cenário e o atual; porém, a diferença não é significativa. Em relação aos caudais, como seria de esperar, para altos cenários, os caudais atingidos são bastante superiores aos do baixo cenário e ao atual.

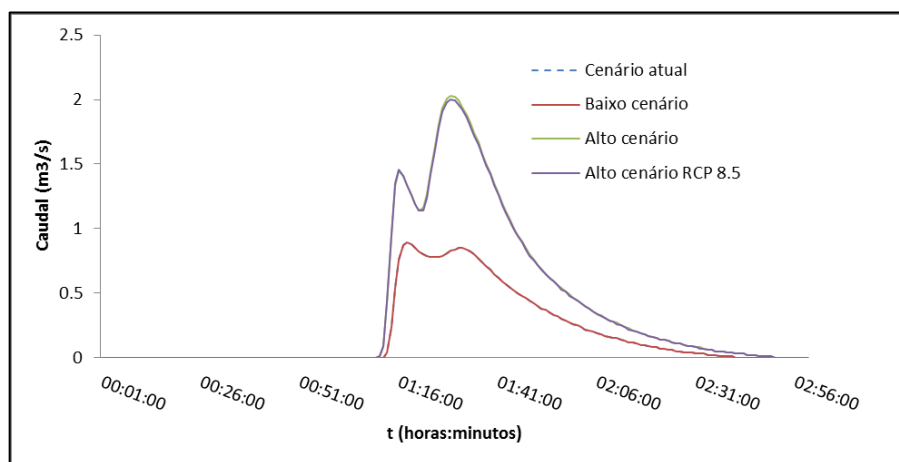


Figura 4.5 – Caudal junto à Praça 8 de Maio para T=100 anos.

Observando a Figura 4.6, em relação ao caudal obtido no caminho superficial junto à Praça da República, pode-se concluir que os coletores só entram em carga aproximadamente depois de uma hora, do início da chuvada, o que corresponde ao máximo obtido no coletor da praça. Isso porque durante uma hora, o caudal à superfície foi igual a zero para todos os cenários. De acordo com os dados obtidos através do SWMM, o coletor permanece em carga durante, aproximadamente, 27 minutos, o que significa, que o evento que provoca a entrada do respetivo coletor em carga mais cedo, trata-se do evento que resulta da chuvada de projeto do alto cenário, e as diferenças entre o alto cenário e o alto cenário RCP 8.5 não são muito significativas.

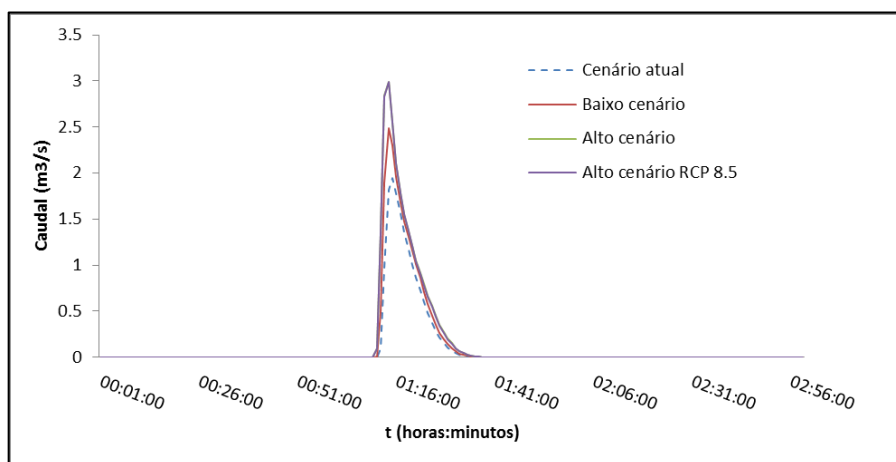


Figura 4.6 – Caudal junto à Praça da República para T=100 anos.

De seguida, apresentam-se os gráficos de escoamento superficial das zonas 2 (Avenida) e 3 (Mercado), respetivamente (Figura 4.7 e Figura 4.8).

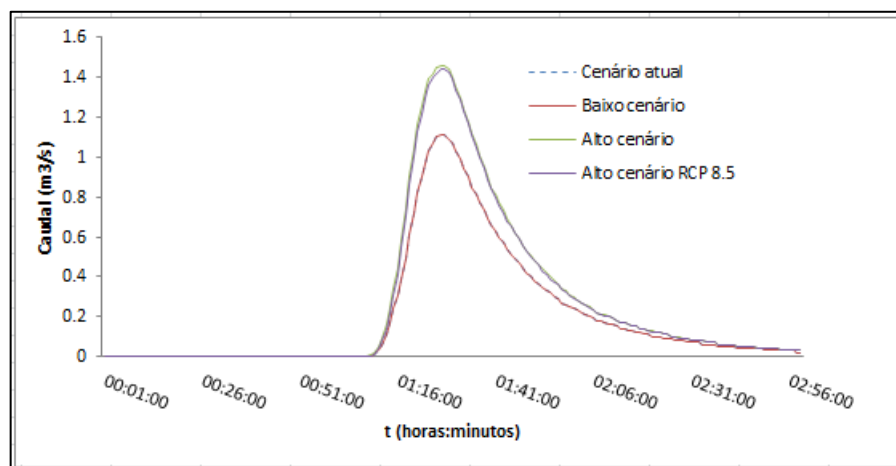


Figura 4.7 – Caudal junto ao Avenida I para T=100 anos

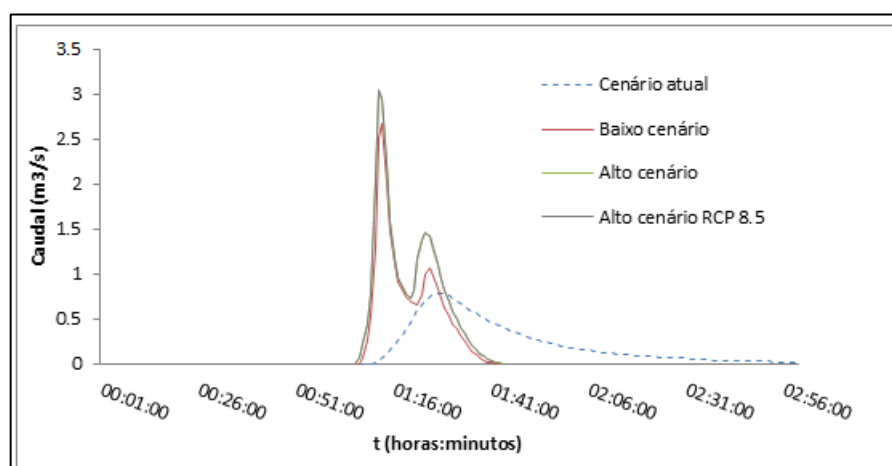


Figura 4.8 – Caudal junto ao Mercado Municipal para T=100 anos

Observando as duas figuras anteriores, pode-se concluir, que tal como nas outras localizações, os coletores entram em carga aproximadamente uma hora depois do início da chuvada. No gráfico da Figura 4.8, observa-se um segundo pico para os altos cenários. Este facto pode ser explicado devido às instabilidades associadas ao *software* SWMM (EPA, 2012).

Antes de proceder à elaboração dos mapas de zonas inundáveis e dos mapas de risco, extraíram-se os dados referentes às alturas de água nas zonas de acumulação de água (*ponds*). Ao analisar estes dados, concluiu-se que as alturas de água nestes pontos de acumulação de água, pouco variam quando se passa do cenário atual para o baixo cenário, e quando se passa do alto cenário para o cenário do RCP 8.5.

Na Figura 4.9, encontra-se o gráfico que representa a variação da altura de água, em metros, ao longo do tempo e de acordo com os vários cenários climáticos definidos na metodologia. Observando o gráfico, verifica-se o esperado, que para os cenários climáticos mais altos, as alturas de água são consideravelmente maiores. Porém, a variação entre o alto cenário e o RCP 8.5 não é significativa, e o mesmo se verifica entre o cenário atual e o baixo cenário.

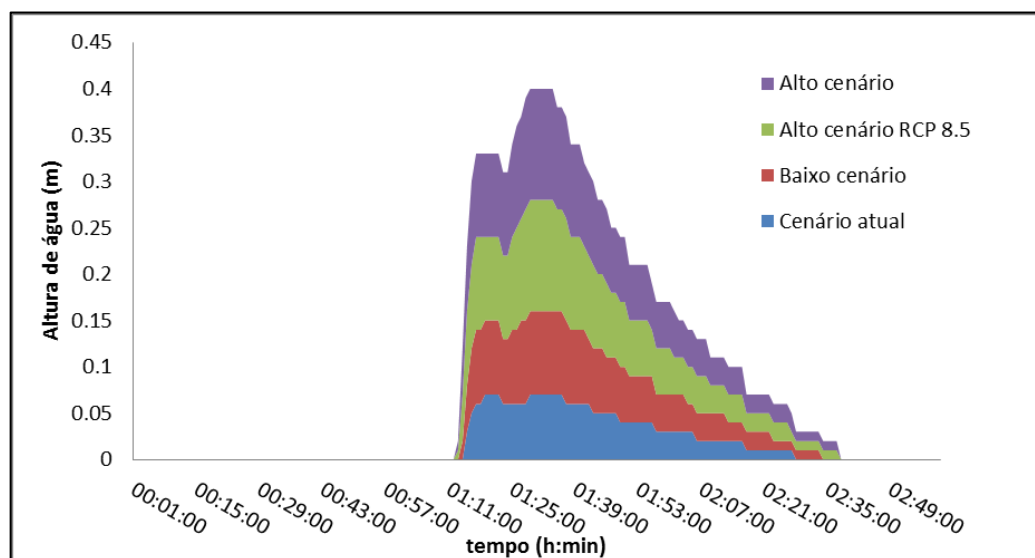


Figura 4.9 – Variação da altura de água com os diferentes cenários climáticos, à superfície na zona da praça 8 de Maio.

Simulados os quatro eventos pluviométricos de acordo com as duas metodologias definidas, correspondentes aos diferentes cenários climáticos, estão reunidas as condições para elaborar os mapas de zonas inundáveis e os mapas de risco.

4.2 Mapas de zonas inundáveis

Antes de iniciar a elaboração dos mapas de zonas inundáveis, escolheu-se uma pequena área da zona de estudo para elaborar os mapas nessa área. Não se utilizou a área toda, mais uma vez por questões de espaço. Porém, a área escolhida apresenta um historial mais interessante de inundações, sendo esta localizada nas imediações da praça 8 de Maio.



Figura 4.10 – Localização da zona crítica na área de estudo de caso – Praça 8 de Maio.

Após filtrar os dados gerados pelo SWMM, necessários para a elaboração dos mapas das zonas inundáveis, introduziram-se esses dados no *software* ArcGIS. Cruzando a informação obtida a partir de um ficheiro em ArcGIS, que contém informações sobre os edifícios e sobre as zonas de acumulação de água, mais os resultados das simulações hidráulicas corridas anteriormente, é possível indagar quais as alturas de água que afetam cada edifício (Figura 4.11).

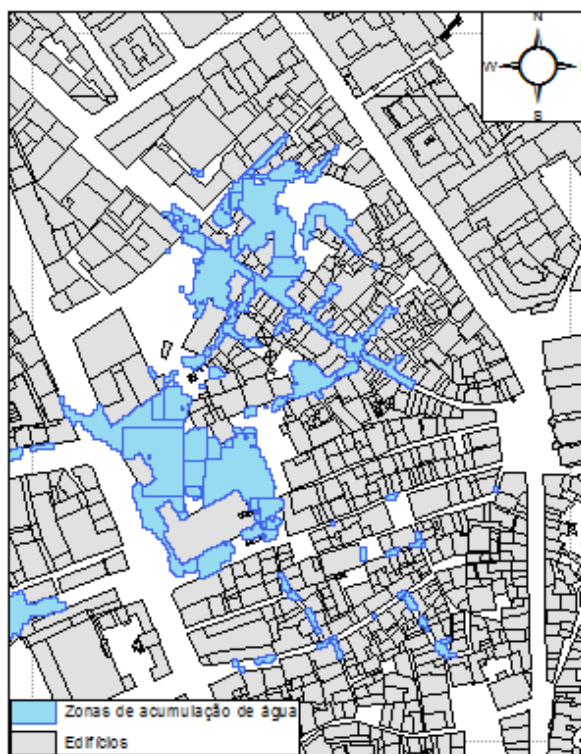


Figura 4.11 – Interseções das zonas de acumulação de água com os edifícios na zona crítica de estudo.

A elaboração dos mapas de zonas inundáveis, para cada cenário, passou por várias etapas. Inicialmente, analisaram-se as zonas de acumulação de água de maior altura, pois verificou-se que, em algumas situações, um mesmo edifício, era intersetado por mais do que uma zona de acumulação de água. Após a filtragem das maiores alturas de água, que intersetam os edifícios, optou-se por separar as alturas em classes e associar cada classe a uma cor, para uma melhor visualização dos resultados. Associou-se o vermelho escuro às alturas de água maiores (>0.75 m), o verde às menores alturas (0 - 0.1 m), e usaram-se cores intermédias para representar as alturas intermédias, de acordo com a legenda apresentada em cada mapa. Por sua vez, usou-se o cinzento para representar os edifícios que não são inundados.

É importante referir, que a seguinte análise dos mapas elaborados, não pretende demonstrar com exatidão os impactos futuros dos cenários climáticos apresentados, mas tem como objetivo expor e compreender as prováveis consequências das alterações climáticas, com o intuito de alertar da existência de um problema, e das limitações dos sistemas de drenagem urbana atuais.

Apresentam-se, de seguida, os quatro mapas de zonas inundáveis, resultantes de quatro eventos de precipitação definidos na metodologia. Na Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15 encontram-se representados os mapas de zonas inundáveis para o cenário atual, baixo cenário, alto cenário RCP 8.5 e alto cenário, respetivamente.

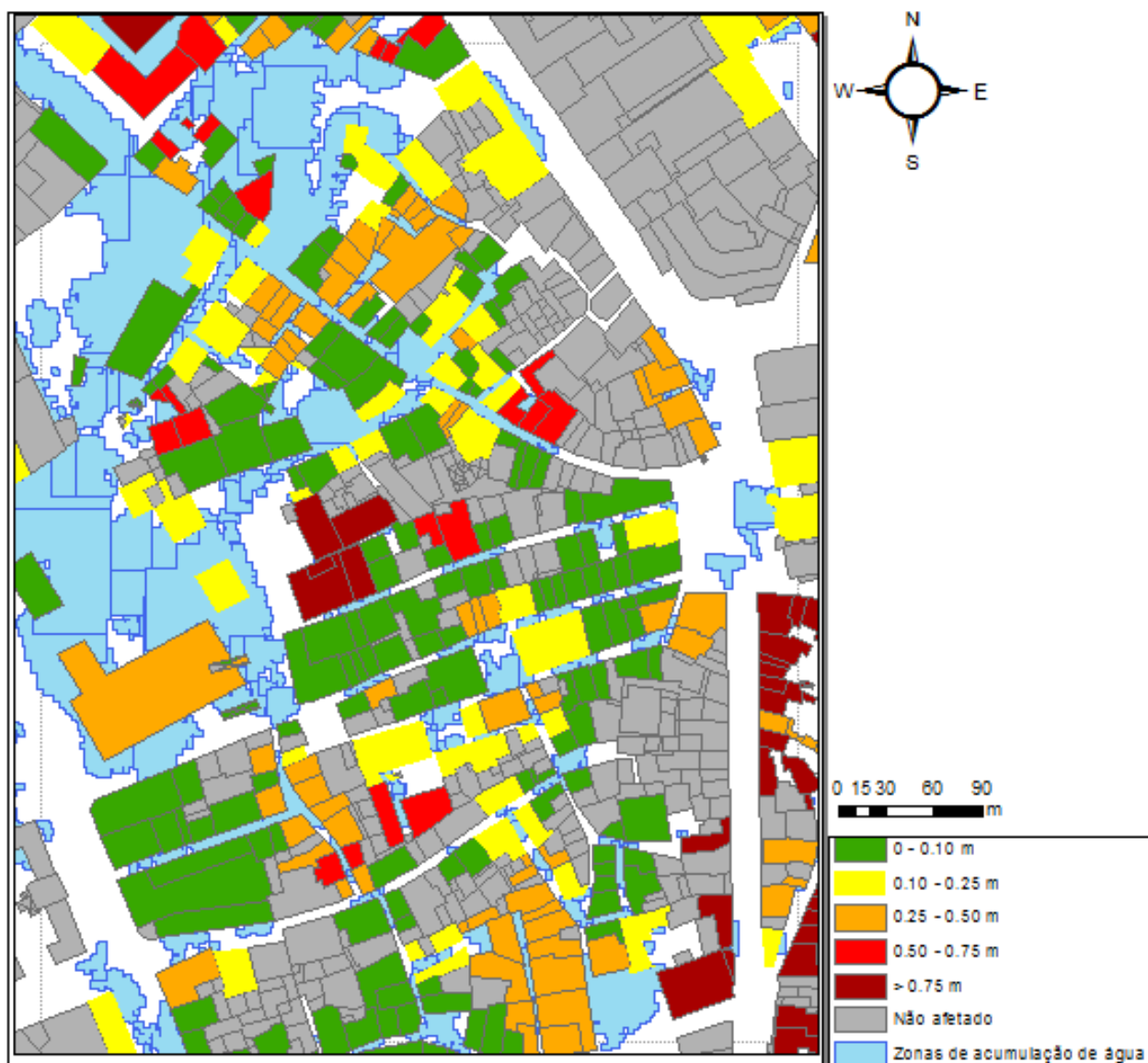


Figura 4.12 – Mapa de zonas inundáveis para o cenário atual (T de 100 anos).

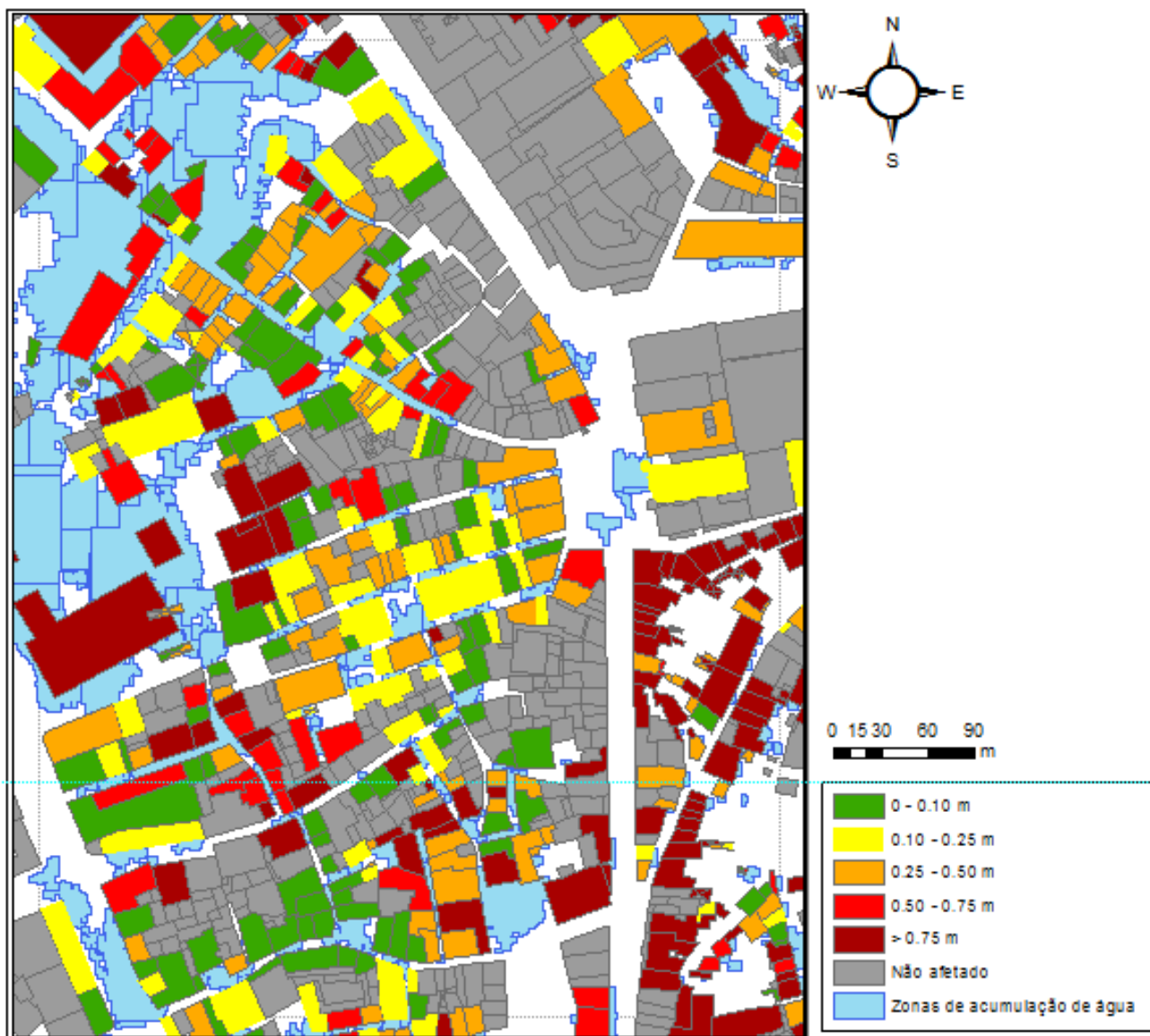


Figura 4.13 – Mapa de zonas inundáveis para o baixo cenário (T de 100 anos).

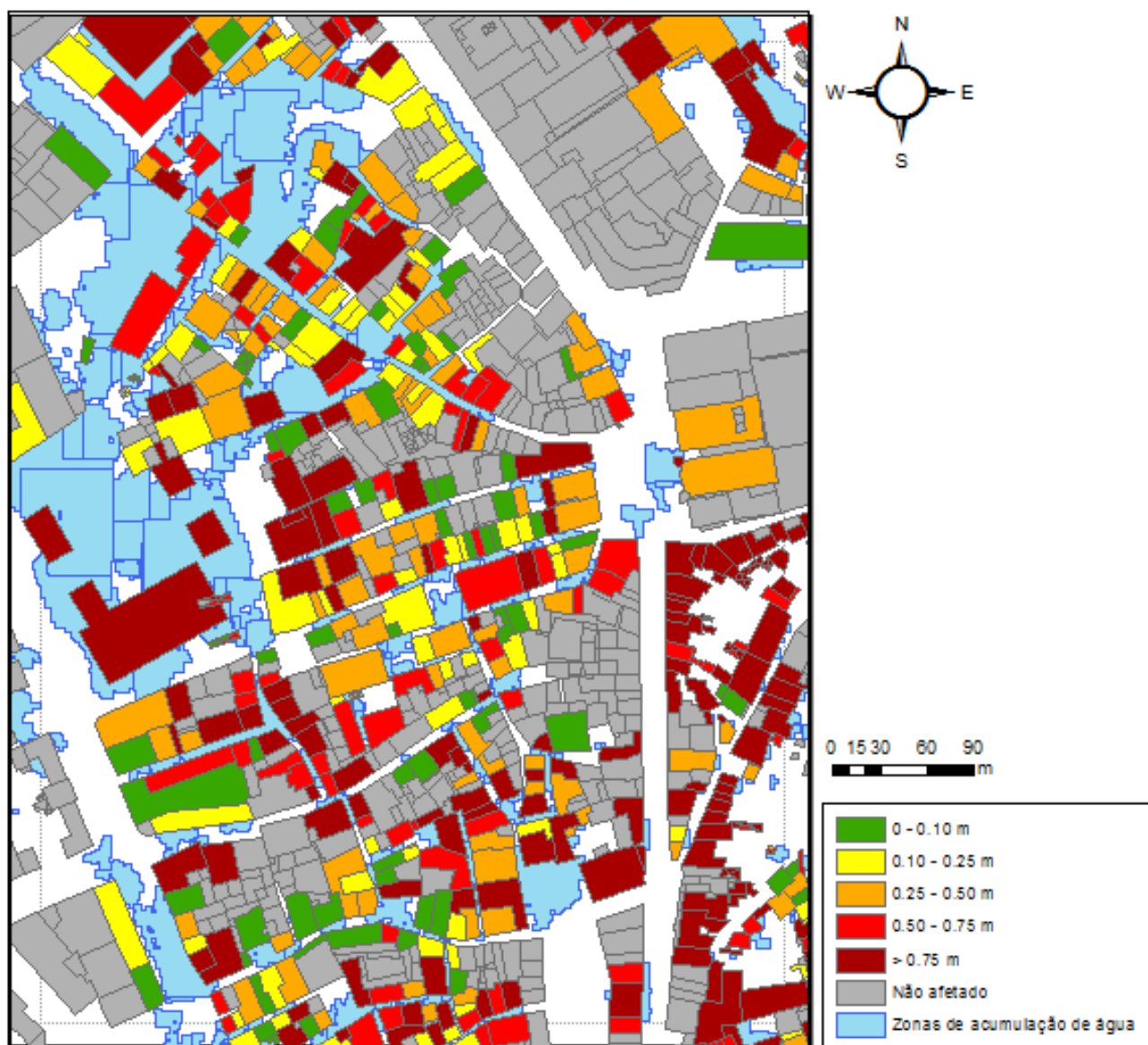


Figura 4.14 – Mapa de zonas inundáveis para o alto cenário RCP 8.5 (T de 100 anos).

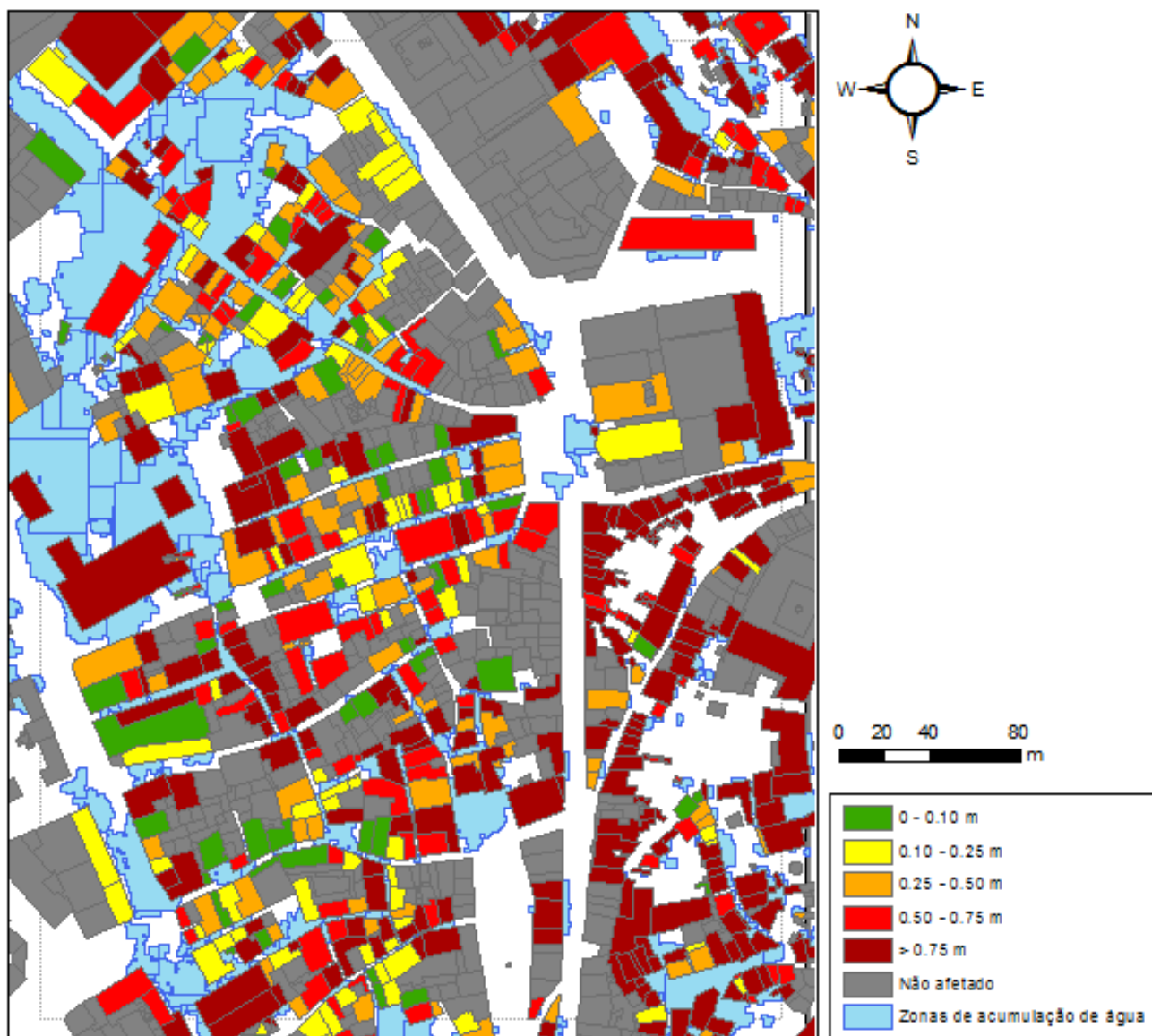


Figura 4.15 – Mapa de zonas inundáveis para o alto cenário (T de 100 anos).

Tal como seria de esperar, as alturas de água obtidas são maiores para os cenários mais gravosos. Uma análise interessante seria a elaboração de mapas que mostrassem quais os edifícios que mudam de categoria de cenário para cenário. Porém, por questões de espaço essa análise não é possível.

Observando os mapas de zonas inundáveis, percebe-se uma clara tendência de aumento de classe de altura de água, com o aumento do cenário, isto é para os altos cenários, as áreas a vermelho são maiores do que para o cenário atual e o baixo cenário. Este facto indica que o

aumento da intensidade das chuvadas, provocado pelas alterações climáticas, tem impacto nos sistemas de drenagem urbana, mais concretamente aumenta a altura de água. Para o mesmo período de retorno, alterando apenas o cenário climático, obtém-se o Quadro 4.2, onde estão representados o número de edifícios inundados, de acordo com as classes das alturas de água.

Por exemplo, comparando o cenário atual com o baixo cenário, verifica-se um aumento (cerca de 30%) do número de edifícios na classe mais alta de alturas de água, confirmando assim o aumento de água. Comparando o cenário atual com o alto cenário RCP 8.5 pode-se observar que houve um aumento em cerca de 70% no número de edifícios na classe de alturas superiores a um metro, enquanto para o alto cenário esse aumento foi mais de 100%, ou seja, verificaram-se mais de o dobro de edifícios nesta classe. Consequentemente, para se obterem estes aumentos, na classe dos edifícios inundados em mais de um metro de água, houve um decréscimo nas classes inferiores.

Em suma, na maioria dos cenários verificou-se uma migração do número de edifícios das classes inferiores de altura de água para as classes superiores. Porém, nas classes intermédias (0.10 - 0.25; 0.25 – 0.50; 0.50 – 0.75 m) isto nem sempre se verifica. No baixo cenário, o número de edifícios da classe 0-0.10 m aumenta em relação ao cenário atual, enquanto para os restantes cenários (alto cenário e RCP 8.5) nesta classe há uma diminuição (cerca de 30%) do número de edifícios, comparando com o cenário atual.

Quadro 4.2 – N° de edifícios inundados de acordo com as classes de alturas de água, na zona de estudo.

	Cenário atual	Baixo cenário	Alto cenário RCP 8.5	Alto cenário
Nº total de edifícios inundados	1016			
0 – 0.10 m	240	153	90	64
0.10 – 0.25 m	159	170	111	109
0.25 – 0.50 m	245	221	209	178
0.50 – 0.75 m	111	135	168	180
> 0.75 m	261	337	438	485

4.3 Mapas de risco de inundação

A elaboração dos mapas de risco de inundação passou por duas fases. Na primeira fase, calcularam-se os custos, utilizando a função de custo de custo, associados às alturas de água obtidas anteriormente, para cada um dos cenários climáticos, obtendo uma distribuição dos custos por m^2 . De seguida, exportaram-se as áreas de cada edifício do ArcGis, e, multiplicando a área (m^2) pelo custo obtido, calcularam-se os custos (€) de cada edifício. Na segunda fase, elaboraram-se os mapas de risco, de acordo com os custos obtidos para cada edifício, de cada cenário. Mais uma vez, definiram-se classes de custo, e a cada classe associou-se uma cor de representação. Utilizaram-se as mesmas cores que nos mapas de zonas inundáveis, logo os edifícios mais claros apresentam custos de danos mais baixos que os edifícios representados por cores mais escuras.

Nas seguintes figuras, (Figura 4.16, Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19), estão representados os mapas de risco para o cenário atual, baixo cenário, alto cenário e RCP 8.5, para um período de retorno de 100 anos. Cada edifício possui uma classificação de acordo com o custo dos danos provocados por uma dada inundação.

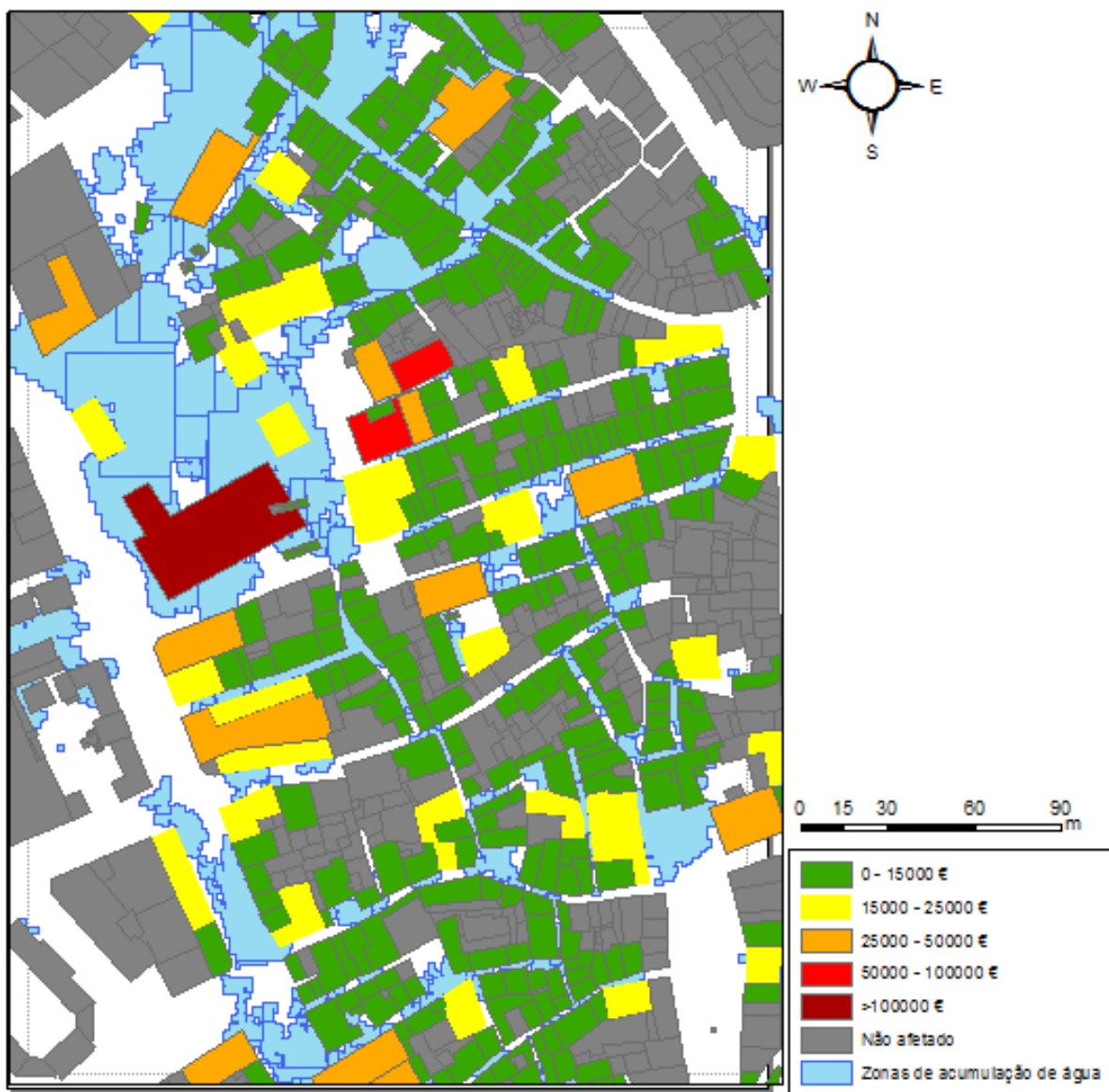


Figura 4.16 – Mapa de risco de inundação expresso em € por edifício, para o cenário atual (T=100 anos).

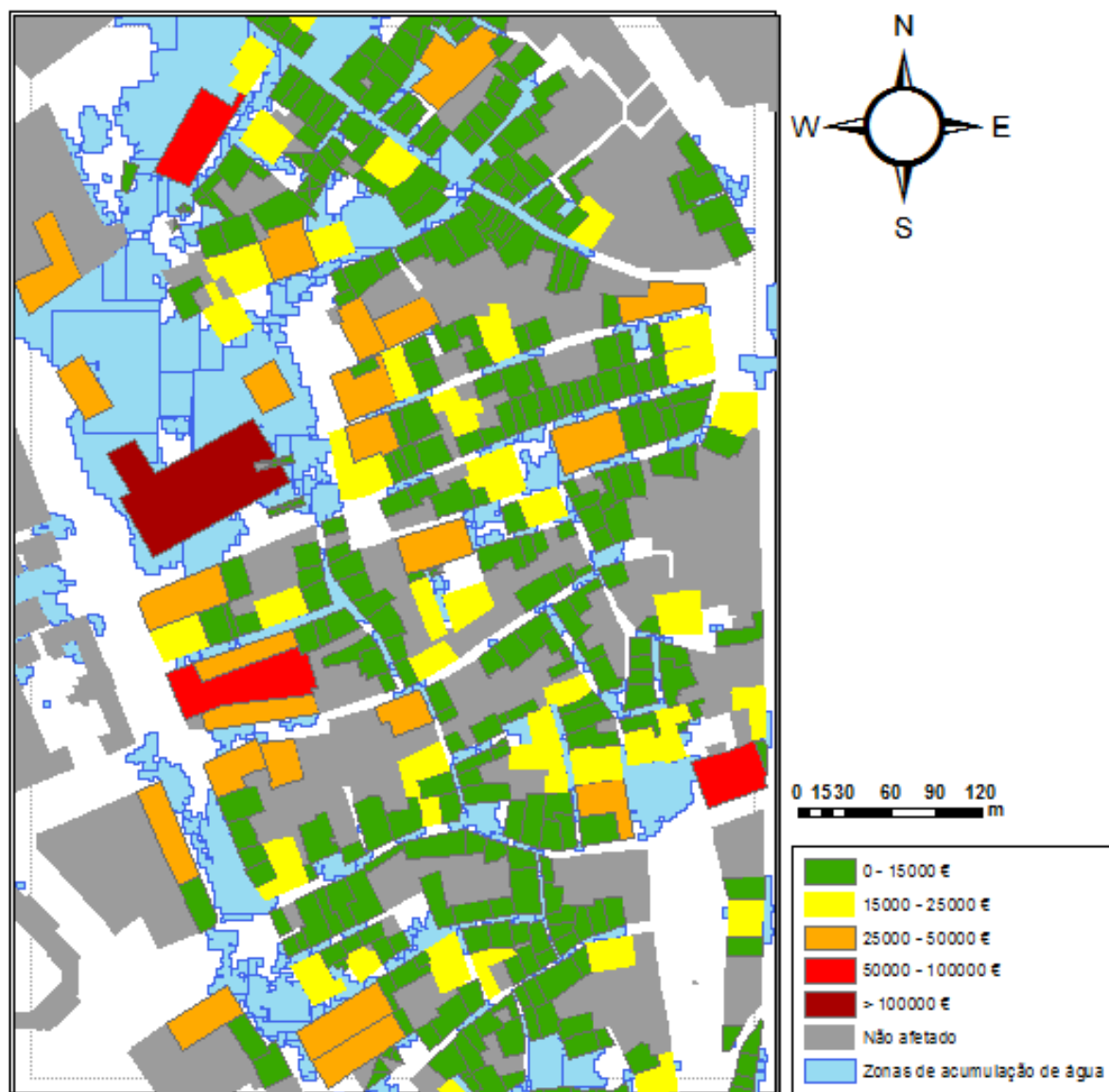


Figura 4.17 – Mapa de risco de inundação expresso em €, por edifício para o baixo cenário (T=100 anos).

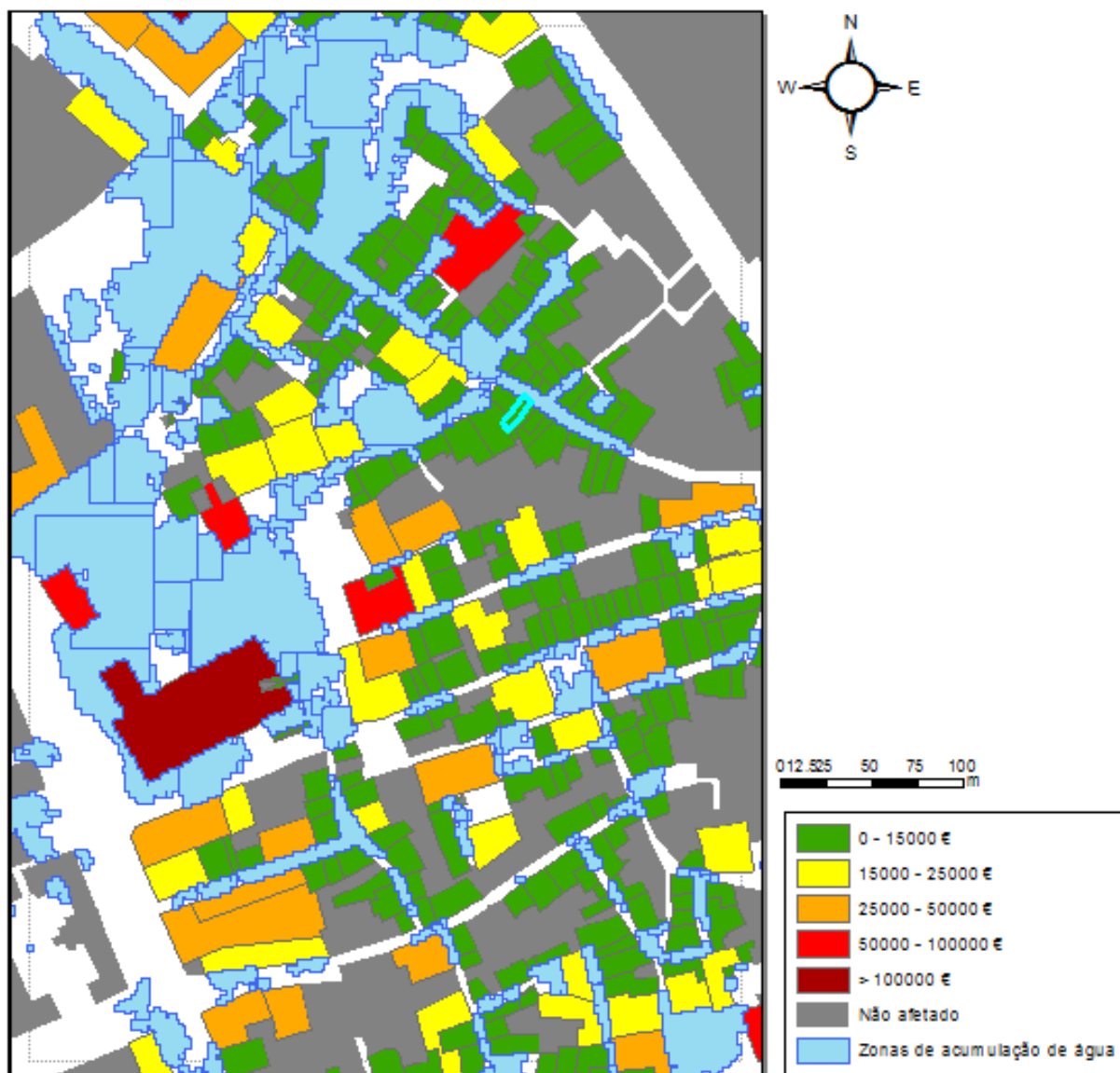


Figura 4.18 – Mapa de risco de inundação expresso em €, por edifício para o alto cenário RCP 8.5 (T=100 anos).

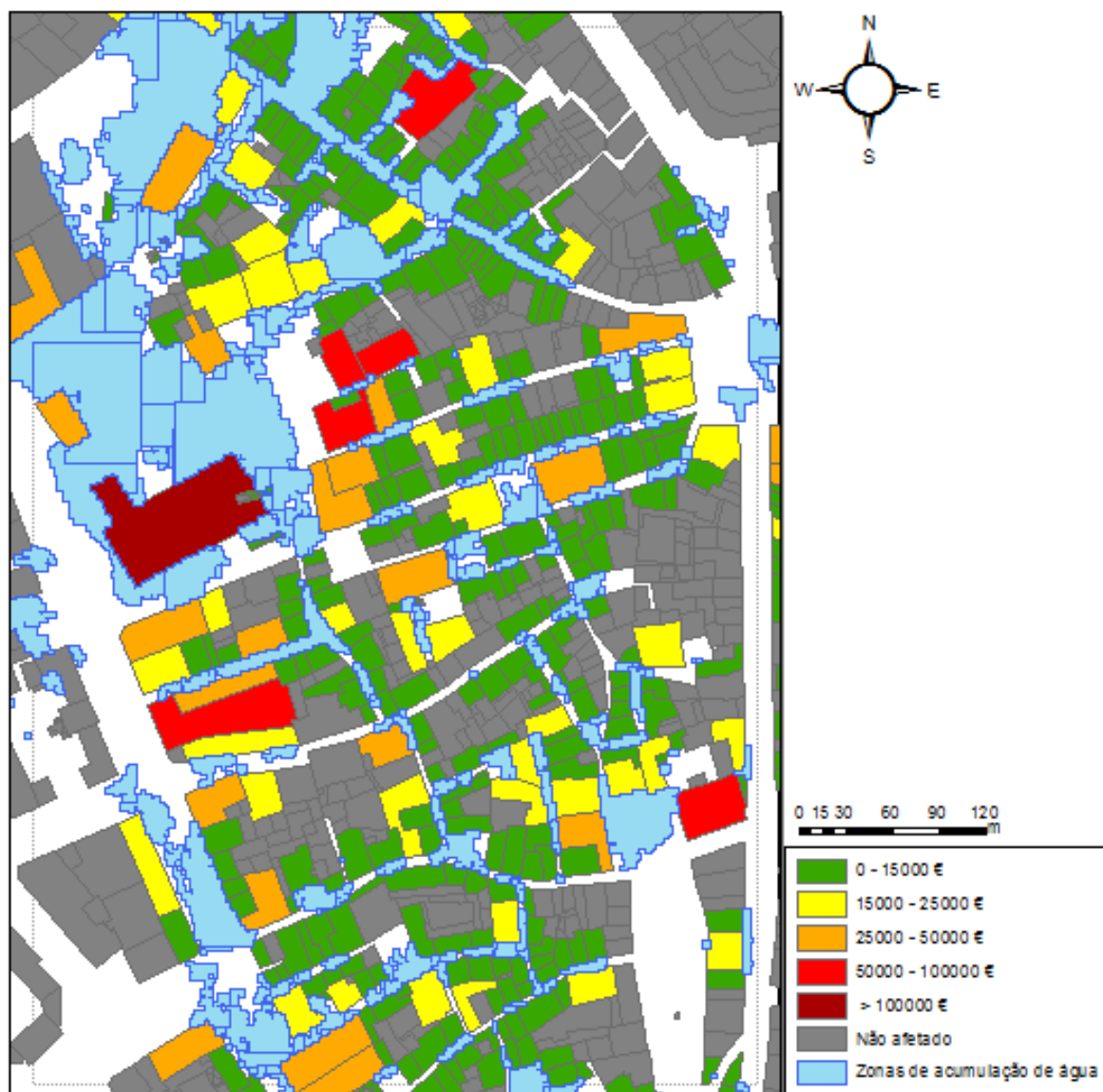


Figura 4.19 – Mapa de risco de inundação expresso em €, por edifício para o alto cenário (T=100 anos).

Analisando os mapas, observam-se algumas diferenças com a mudança de cenários. Uma das conclusões mais notáveis, é o facto de em alguns edifícios, apesar de a altura de água pertencer à classe mais alta (< 0.75 m), o custo associado não faz parte da classe de custos correspondentes. Este facto é explicado analisando as áreas de cada infraestrutura, ou seja, um edifício que seja inundado por uma altura de água elevada, pode não apresentar custos elevados se a sua área for pequena (Figura 4.20). O contrário também se verifica, edifícios

com alturas de água pertencentes a classes baixas e que passam a fazer parte de classes altas em termos de custos

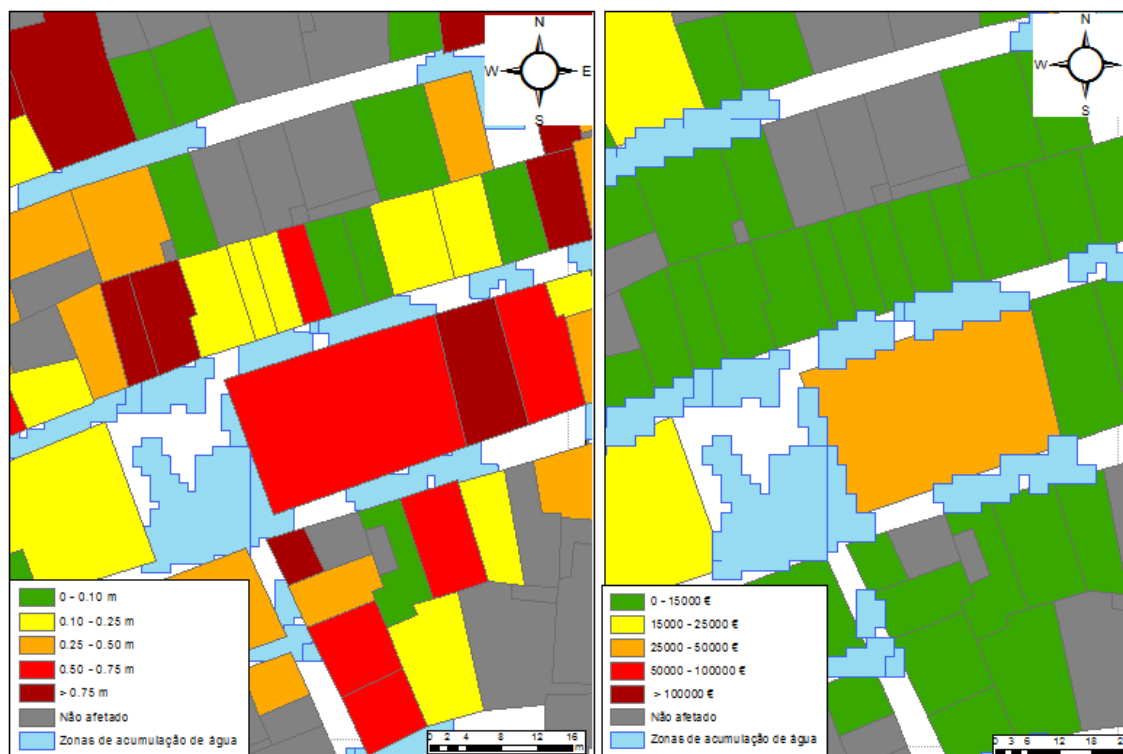


Figura 4.20 – Pormenor dos mapas de zonas inundáveis e dos mapas de risco, respetivamente, para o alto cenário e um período de retorno de 100 anos.

Ao observar estes mapas, pode-se concluir que o facto de um edifício ser afetado por uma altura de água elevado, não implica necessariamente que os custos dos danos provocados sejam elevados, pois o custo depende também da área do edifício, e áreas maiores afetadas conduzem a custos mais elevados.

Outra análise realizada aos resultados foi o cálculo do custo total da zona analisada. Conclui-se que, tal como esperado, o custo total maior associa-se ao Alto cenário. Todavia, observando o gráfico da Figura 4.21, percebe-se que a curva de crescimento de custos não é linear, sendo que, por exemplo, na passagem cenário atual para o baixo cenário, verifica-se um aumento de 2.22%, enquanto, na passagem do cenário atual para o RCP 8.5, observa-se um aumento de 5.06%, confirmando que o crescimento não é linear. Em suma, pode-se concluir que, o facto de a precipitação ter aumentado 10%, 16% e 20% para o baixo, RCP 8.5 e alto cenário, respetivamente, não significa que a altura de água aumente nas mesmas proporções, nem significa que o aumento do custo, associado aos danos das inundações varie

da mesma forma. Daí a importância de quantificar, caso a caso, o impacto das alterações climáticas nos sistemas de drenagem urbana, pois como se viu, este não tem um comportamento de todo linear. A título de exemplo: observando os resultados obtidos para o alto cenário, em que o aumento da precipitação foi de 20%, conclui-se que os custos associados a este cenário aumentaram cerca de 6.6%, o que significa que o aumento, em termos percentuais, do custo, não é igual ao aumento percentual, em termos de precipitação. Ou seja, mais uma vez prova -se que o comportamento da rede não é linear.

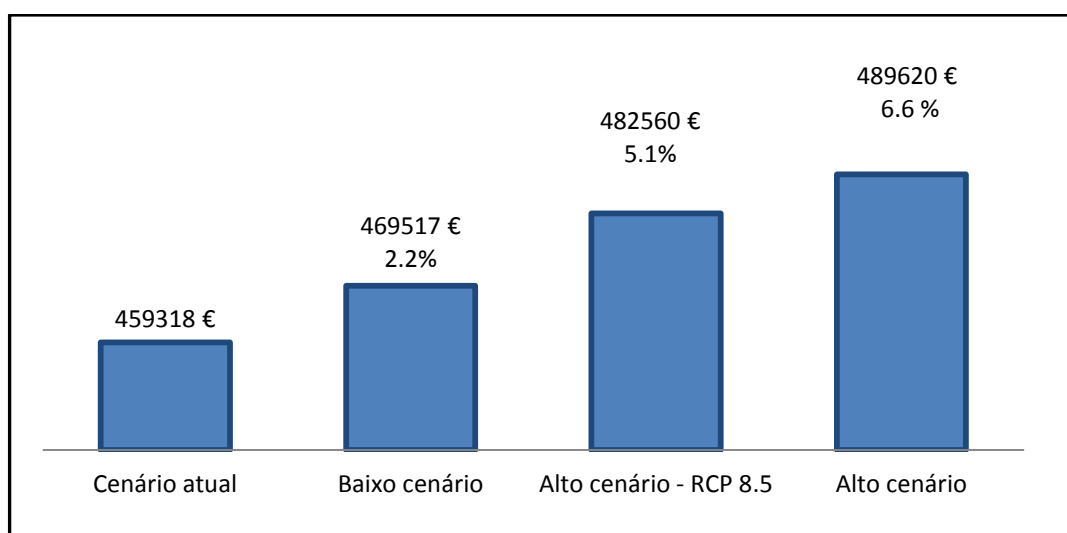


Figura 4.21 – Custos totais da zona analisada de acordo com os quatro cenários considerados. Percentagem de aumento de custos para cada cenário em relação ao cenário atual.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

As alterações climáticas constituem um problema com influência crescente nos diversos países do mundo. As mudanças climáticas aumentam a frequência de eventos de precipitação extrema. Este facto, juntamente com a alteração profunda do uso do solo, nomeadamente a crescente expansão e impermeabilização do solo, contribuem para a diminuição da capacidade dos sistemas de drenagem urbana.

As alterações climáticas vão ter impactos no funcionamento das redes de drenagem urbana, como se prova pelo notável aumento de solicitações da rede, e consequentemente de áreas inundadas, e no risco de inundação. É extremamente importante, estudar esta temática, na medida em que, as alterações climáticas constituem um problema real, a ser considerado no dimensionamento dos sistemas de drenagem urbana. A dimensão e velocidade das alterações climáticas, assim como os seus impactos, implicam a procura de respostas mais eficazes, capazes de minimizar os possíveis cenários, como os altos cenários, e aplicar estratégias de planeamento no dimensionamento dos sistemas de drenagem urbana, de forma às consequências nas infraestruturas serem reduzidas.

Neste trabalho, foram aplicadas duas metodologias distintas, para obter as chuvadas de projeto, que têm em conta o impacto das alterações climáticas. A metodologia 1 – IPCC, resulta da aplicação direta dos resultados obtidos, pela avaliação do 5º Relatório do IPCC (2013), enquanto a metodologia 2 – RCP 8.5 resulta da aplicação de fatores climáticos, (Casas Castillo e Rodriguez-Solo, (2014)). Através do método dos blocos alternados, obtiveram-se quatro chuvadas de projeto, para um período de retorno de 100 anos, que correspondem a quatro eventos de precipitação, com diferentes cenários climáticos:

- Cenário atual, obtido através das curvas IDF atuais;
- Baixo cenário – B2, que corresponde a um agravamento da intensidade em 10% (abordagem1);
- Alto cenário – RCP 8.5, que corresponde a um aumento de 16% da intensidade (abordagem2);
- Alto cenário – A2, que a um agravamento da intensidade em 20% (abordagem1).

Cada uma destas chuvadas foi simulada e modelada no SWMM, obtendo os dados necessários relativos às alturas de água, em pontos críticos da rede do estudo de caso. Para cada um dos cenários, elaboraram-se mapas de zonas inundáveis, e mapas de risco, representativos de uma pequena zona escolhida.

Conclui-se que, de facto, existem consequências para as alterações climáticas no funcionamento dos sistemas de drenagem urbana, e que de acordo com os diferentes cenários estudados, algumas têm consequências mais gravosas em termos económicos do que outros cenários. Outra conclusão importante relaciona-se com o facto da avaliação do impacto das alterações climáticas não ser linear. Deste modo, concluiu-se que um aumento de 10%, 16% ou 20% na precipitação, não conduz a aumentos, iguais em termos de percentagens, nas alturas de água, nem conduz a aumentos dos custos dos danos nas mesmas ordens de grandeza. Daí ser extremamente importante, a realização deste tipo de estudos.

O conceito de drenagem dual, permite uma representação mais clara da capacidade de drenagem de uma determinada área, pois coliga dois sistemas fundamentais, a rede dos coletores, que pode ou não estar em carga, e o escoamento superficial. O SWMM mostrou capacidade de modelar sistemas de drenagem dual.

Em relação ao ArcGIS, este mostrou ser uma ferramenta útil na análise dos resultados das simulações hidráulicas, sendo por isso uma ferramenta auxiliar no planeamento, na gestão dos riscos de inundação.

Cabe às organizações governamentais, instituírem mediadas de mitigação, que intervenham de modo a tornar menos intensos os impactos nos sistemas climáticos, e consequentemente nos sistemas de drenagem urbana.

A principal limitação deste trabalho prende-se, ao facto de não existirem estudos diretos, de adaptação das curvas IDF às alterações climáticas, para Coimbra. Tendo sido, por isso necessário, utilizar o estudo de Madrid para Coimbra. Para além disso, verificou-se uma forte lacuna na aplicação de modelos climáticos, como o GCM e o RCM a Coimbra, pois estes ainda não foram aplicados, e como tal ainda não existem resultados.

5.2 Trabalhos Futuros

No seguimento deste trabalho podem ser realizados outros trabalhos no âmbito das alterações climáticas. Seria extremamente interessante, se adaptar as curvas IDF, com base nas séries históricas de Coimbra, nos modelos climáticos, utilizando técnicas de *downscaling* de acordo com diversos cenários climáticos. Deste modo, era possível avaliar o impacto das alterações climáticas na drenagem urbana de uma forma mais real. A utilização de modelos climáticos, como o GCM e o RCM, à escala da drenagem urbanas, para a previsão de novos cenários climáticos, constitui outro complemento muito interessante.

Outro trabalho interessante, seria no âmbito da quantificação económica dos danos das inundações mapas de risco inundação, como por exemplo: calcular os danos das inundações em função da altura de água mas com outro tipo de categorias dos edifícios, isto é, ter em conta que existem edifícios que podem ter custos associados mais elevados. Por sua vez, também se poderia utilizar a variável profundidade juntamente com a de velocidade do escoamento, pois segundo alguns autores, condiciona estragos das infraestruturas.

Outra sugestão de trabalho para o futuro, seria elaborar este estudo substituindo a rede 1D/1D por uma rede 1D/2D, pois tal como o referido na revisão bibliográfica, as redes 1D/2D apresentam uma maior certeza em termos da fiabilidade de resultados. Para além da tipologia da rede a ser testada, poderiam recorrer-se a outros *softwares* comerciais de modelação hidráulica e hidrológica, com mais funcionalidades, para se compararem os resultados obtidos com o SWMM.

Para finalizar, poderão ser desenvolvidos estudos em que sejam implementados SUDS nesta rede como medida de atenuação do risco de inundações urbanas causadas pelas alterações climáticas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BancodePortugal@.(2014).<https://www.bportugal.pt/ptPT/Estatisticas/Dominios%20Estatisticos/EstatisticasCambiais/Paginas/Conversor.aspx> Banco de Portugal. (acedido a 28/05/2014)
- Barreiros, C., Costa, E. e Pires, P. (2009). "Guia para a caracterização de risco no âmbito da elaboração de planos de emergência de Proteção Civil - Cadernos Técnicos" Autoridade Nacional de Protecção Civil, Carnaxide.
- Butler, D. e Davies, J. W. (2011). "Urban Drainage". Spon Press, Oxon.
- Casas-Castillo, M. C. e Rodriguez, R. S. (2014). Comunicação pessoal, 23 de Maio, 2014.
- Clemens, F. H. L. R. (2001). "Hydrodynamic Models in Urban Drainage Application and Calibration". DUP Science, Delft.
- Corrêa, M. M. R. (2013). "Contribuição para Avaliação e Gestão de Riscos de Inundações. Caso de estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Nabão" Tese de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- D.C.@ (2013). <http://www.diariocoimbra.pt/noticias/baixa-de-coimbra-esteve-inundada-durante-uma-hora>. Portugal. (acedido em 23/04/2014)
- DD@ (2007). http://diariodigital.sapo.pt/news.asp?id_news=261226. Portugal. (acedido em 16/03/2014)
- Decreto - lei nº115/2010 (2010). - " Diário da República, 1.^a série — N.º 206 — 22 de Outubro de 2010."
- Dias, Luis (2011). " Cartas de Inundação e Riscos de cheias em Cenários de Alterações Climáticas" (Projeto CIRAC) - Mapeamento do Risco de Inundações , Lisboa.
- Djordjevic, S., Prodanovic, D. e Maksimovic, C. (1999) "An approach to simulation of dual drainage", In Water Science and Technology, Vol. 39, No. 9, pp. 95-103.
- Diretiva 2007/60/CE. (2007). "Avaliação e Gestão do Risco de Inundação, Parlamento Europeu e Conselho de 23 de Outubro de 2007 relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações", Jornal Oficial da União Europeia.
- EEA (2012). "European Waters - current status and future challenges - a synthesis." European Environment Agency.

EN (752). (2008). BS EN (752). Drain and sewer systems outside buildings. Européen Normalization.

EPA (2012). SWMM - Modelo de Gestão de Drenagem Urbana - 5.0. Manual. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica de Saneamento, Universidade Federal da Paraíba, UFPBs Brasil.

Fernandez, P. (2012). "Cartografia de Risco de Inundação em Zonas Urbanas. Metodologia para a sua elaboração". Instituto Politécnico de Castelo Branco, Tomar.

Garret, P. (2013). "Cartas de Inundação e Risco de Cheias em Cenários de Alterações Climáticas." (Projeto CIRAC) - brochura de apresentação, Lisboa.

Hammond, M. J., Chen, A. S., Djordjević, S., Butler, D., Khan, D. M., Rahman, S. M. M., Haque, A. K. E. e Mark, O. (2012). "The development of a flood damage assessment tool for urban areas". 9th International Joint IWA/IAHR Conference on Urban Drainage Modelling, Belgrade, Serbia.

Hildén, M., Dankers, R., Kjeldsen, T., Hannaford, J., Kuusisto, E., Makropoulos, C. e Linde, A. T. (2012). "Floods - Vulnerability, risks and management - a joint report of ETC CCA and ICM" European Environment Agency (EEA), Tapio, Finlândia.

INAG@. (2014). <http://www.inag.pt> "Plano Nacional da Água." Instituto da Água.

IPCC. (2007). Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Synthesis Report.

IPCC. (2011). "Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX), First Joint Session of Working in Groups I and II: 29." United Nations Environment Programme (UNEP), Cambridge, University Press, UK.

IPCC. (2013). "Climate change 2013. The Physical Science Basis."Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." United Nations Environment Programme (UNEP), Cambridge, University Press, UK.

Leitão, J. P. (2009). "Enhancement of digital elevation models and overland flow path delineation methods for advanced urban flood Modelling" Tese de Doutoramento. Londres.

Leitão, J. P., Almeida, M. d. C., Simões, N. E. e Martins, A. (2013). "Methodology for qualitative urban flooding risk assessment ", In Water Science & Technology, Vol. 68, No. 4, pp. 829-38.

Mailhot, A. e Duchesne, S. (2009). "Design Criteria of Urban Drainage Infrastructures under Climate Change." In Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.136, No.2 pp:201-208.

Mameren, H. J. V. e Clemems, F. H. L. R. (1997). "Guidelines for hydrodynamic calculations on urban drainage: overview and principles.", In *Water Science & Technology*, Vol. 36, No. 8-9, pp. 247-252.

Marques, J. A. S., Sousa, J., Simões, N. E. e Pina, R. D. (2013). "Cap3 - Simulação em Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais". "Hidrologia Urbana - Sistemas de Drenagem de águas Pluviais Urbanas ". Lisboa ERSAR e Universidade de Coimbra.

Marsalek, J., Rochfort, Q. e Savic, D. (2001). "Urban water as a part of integrated catchment management." In *Frontiers in Urban Water Management*. IWA Unesco.

Moel, H., Van Alphen, J. (2009). "Flood maps in Europe - methods, availability and use." *Nature Hazards Earth System Science*, Vol. 9 No.2 , pp.289-301.

Muñoz, A. H., Lenhmann, A. H., e Martinez, P. G. (2004). *Manual de depuración de Uralita: Sistemas para depuración de aguas residuales en núcleos de hasta 20.000 habitantes*. Paraninfo. Madrid.

N.M.@ (2014). http://www.noticiasominuto.com/mundo/173369/cheias-desalojam-seis-mil-familias-em-inglaterra#.UyW29PI_s-I/615/0. Portugal. (acedido em 16/03/2014).

Nielsen - Arnbjerg, K. (2008). "Qualification of climate change impacts on extreme precipitation used for design of sewer systems". 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.

Nielsen - Arnbjerg, K. (2012). "Quantification of climate change effects on extreme precipitation used high resolution hydrologic design", In *Urban Water Journal*, Vol.9, No.2 pp:57-65.

Nguyen, T. D. Desramaut, N. (2008). "Estimation of Design Storms in Consideration of Climate - Variability and Change. "11th International Conference on Urban Drainage", Edinburgh, Scotland, UK.

Paula, T. (2013). "Zonas inundáveis e quantificação do risco de inundação em meios urbanos." Tese de mestrado, Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

Paulino, J. e Santos, E. (2013). "Relatório de Progresso da Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas". APA, Amadora, Portugal.

Peck, A., Prodanovic, P., e Simonovic, P. P. S. (2013). "Rainfall Intensity Duration Frequency Curves Under Climate Change: City of London, Ontario Canada. ", In *Canadian Water Resources Journal*, Vol.37, No. 3, pp. 177-189.

Penning-Rowsell, E., Tunstall, S., Tapsell, S., Morris, J., Chatterton, J e Green, C. (2005). "The Benefits of Flood and Coastal Risk Management: A Handbook of Assessment Techniques Edmund". Middlesex University Press, Londres.

Portela, M. M., Marques, P. e Carvalho, F. F. d. (2000). Hietogramas de Projeto para a análise de cheias baseadas no modelo do hidrograma unitário do Soil Conservation Service (SCS). 5º Congresso da Água - A água e o desenvolvimento sustentável: Desafios para o novo Século, Lisboa.

Portela, M. M. (2006). Modelação Hidrológica - Apontamentos da disciplina de Modelação Hidrológica do Instituto Superior Técnico. DECivil, 2005/2006, 2º semestre. Lisboa.

Rocha, J. S. (1998). "O risco das inundações e a sua gestão. Uma visão Nacional e uma visão Europeia.". 4º Congresso da APRH, Lisboa.

Rodríguez, J. M. M., Lope, C. M., Alonso-Muñoyerro, J. M., Ruggeroni, J. R. P., González, F. F. e Treviño, A. C. (2005). "Principales Conclusiones de la Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático." Ministerio de Medio Ambiente.

Rodríguez, R., Navarro, Xavier., Casas, C. M., Ribalaygua, J., Russo, Beniamino., Pouget, L. e Redaño, A. (2014). "Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain)." In International Journal of Climatology, Vol.34, No. 3, pp. 643-654.

Ryu, J. (2008). "Decision Support for Sewer Flood Risk Management" Tese de Doutoramento, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College Londres. Londres.

Santos, F. D. (2006). "Alterações climáticas em Portugal, cenários, impactos e medidas de adaptação - Projeto SIAM II". Gradiva, Lisboa.

Schardong, A. e Simonovic, S. P. (2013). "Possíveis impactos de mudanças climáticas em curvas intensidade duração frequência.". Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, Brasil.

Schmidt, L. (2008). "Cap.14 - Ambiente e políticas ambientais: escalas e ajustes"."In Itinerários, Universidade de Lisboa". Lisboa; Universidade de Lisboa

Silveira, C. S., Filho, F. A. S., Cabral, S. L., Lemos, W. E. D. e Porto, V. C. (2013). "Avaliação de desempenho dos modelos de mudança cliática do CMIP5 quanto à representação da precipitação sobre as bacias do setor elétrico brasileiro no século XX e análises das projecções para o cenário RCP 8.5." Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, Brasil.

Simões, N., Ochoa, S., Leitão, J. P., Pina, R., Marques, A. S. e Maksimović, Č. (2011). "Urban drainage models for flood forecasting: 1D/1D, 1D/2D and hybrid models.". 12th International Conference of Urban Drainage, Porto Alegre/Brasil.

Simões, N. E. (2006). "Modelação bidimensional de escoamentos variáveis em superfície livre: aplicação ao estudo de cheias" Tese de mestrado, Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

Simões, N. E., Leitão, J. P., Pina, R, Sá Marques, J. A. e Maksimovic, C. (2010)." Urban Floods Monitoring in Coimbra, Portugal". 10ª International Precipitation Conference. Coimbra, Portugal.

Simões, N. E. (2012). "Urban Pluvial Flood Forecasting. "Tese de Doutoramento, Department of Civil Engineering, Imperial College, Londres.

Skilton, D. (2010). "Implementation of Blue-Green Corridors in Urban Environments" Tese de Doutoramento, Department of Civil and Environmental Engineering Implementation. Londres.

Sousa, E. R., e Matos, J. S. (2001). Sistemas de drenagem de águas residuais e pluviais. Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, IST/UTL, Lisboa.

Stavroula, P. P. (2008). "Modelling and attenuation of torrent stream urban floods caused by forest fires " Tese de Mestrado. Londres.

Tucci, C. E. M. (2005). "Gestão das Inundações urbanas". GWP, Porto Alegre/Brasil.

Wanielista, M., Kersten, R., e Eaglin, R. (1997). Hydrology: Water quantity quality control 2ª Edition, John Wiley and Sons, Inc., USA.

Willems, P., Olson, J., Nielsen, K. A., Beecham, S., Pathirana, A. e Gregersen, I. (2013). "Impacts of Climate Change on Rainfall Extremes and Urban Drainage Systems", In Water Science & Technology, Vol. 68, No.1, pp: 16-28.

Williams, P. (2011). "Revision of urban drainage design rules based on extrapolation of design rainfall statistics". 2th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brasil.

Wind, H.G., Nierop, T.M., de Blois, C.J. and de Kok, J.L. (1999). Analysis of Flood Damages from the 1993 and 1995 Meuse Floods, Water Resources Research, Vol. 35, pp. 3459-3465.

Woods, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R. e Shaffer, P. (2007). "The SuDS manual". Ciria, Londres.