



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil - Construções Cívicas

Estudo hidrológico da Ribeiria do Amparo

Marta Alexandra Pereira Dias

Leiria, setembro de 2017



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil - Construções Cívicas

Estudo hidrológico da Ribeira do Amparo

Marta Alexandra Pereira Dias

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Professor Ricardo Gomes e coorientação da Professora Luísa Gonçalves, Professores da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, setembro de 2017

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Dedicatória

À minha família

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Este espaço é dedicado a todas as pessoas que tornaram esta dissertação de mestrado possível, quer fisicamente, quer emocionalmente. Como tal vou fazer uma breve referência a cada um, que foi o pilar para, espero, um futuro profissional preenchido.

Um Agradecimento

Para o meu pai, por me apoiar incondicionalmente, transmitindo-me sempre força e coragem para lutar perante as adversidades.

Para o meu Orientador, Professor Ricardo Gomes, que ao longo destes meses, me orientou, sempre se mostrou disponível a receber-me e a apoiar-me.

Para a minha Coorientadora, Professora Luísa Gonçalves, que me apoiou, incentivou e pelos seus sensatos conselhos.

Para os meus colegas por todo o apoio ao longo da execução desta dissertação.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

Excluindo as águas dos mares e calotes polares, é cada vez menor a quantidade de água potável disponível devido ao crescimento da população mundial, alterações climáticas e contaminação das massas de águas superficiais e subterrâneas. Por sua vez, o crescimento das áreas urbanas incita ao aumento de impermeabilização do solo que, conseqüentemente provoca o aumento de caudais de escorrência superficial, levando à ocorrência de inundações cada vez mais frequentes.

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) constituem uma ferramenta de apoio crucial à tomada de decisão e gestão dos recursos hídricos e simplificam o processo de obtenção e tratamento de informação, necessária ao desenvolvimento de modelos hidrológicos/hidráulicos. O software utilizado para a integração e processamento da informação que visou criar o modelo hidrológico, e a sua respectiva parametrização para este trabalho foi o HEC-HMS (The Hydrologic Modeling System). Este programa é atualmente um dos mais utilizados por empresas e instituições académicas de todo o mundo, sendo considerado líder no seu segmento de mercado.

Este documento tem por objeto de estudo hidrológico da Ribeira do Amparo, cuja área de influência abrange parte da união das freguesias de Marrazes e Barosa, concelho de Leiria. A linha de água em questão foi objeto de trabalho de campo para colheita de dados, imprescindíveis à calibração dos modelos utilizados. Por esta forma, pretende-se assegurar uma representação mais fidedigna dos resultados obtidos pela conjugação dos Sistemas de Informação Geográfica e do software de Modelação Hidrológica. Como objetivo pretende-se apresentar uma metodologia sólida para avaliar potenciais aproveitamentos de águas com o apoio de tecnologia SIG e determinar o caudal de ponta de cheia associada aos vários períodos de retorno, tendo em conta a morfologia e a ocupação do terreno.

Palavras-chave: *Sistemas de Informação Geográfica, Modelo hidrológico, HEC-HMS*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

Excluding the waters of the seas and polar caps, the quantity of potable water is becoming increasingly available due to the growth of the world population, climatic changes and contamination of the masses of superficial and groundwater waters. In turn, the growth of urban areas encourages the increase in soil waterproofing which consequently causes the increase of superficial runoff tails, leading to the occurrence of increasingly frequent flooding.

Geographic Information systems (GIS) constitute a crucial support tool for decision-making and water resources management and simplify the process of obtaining and processing information, necessary for the development of hydrological/hydraulic models. The software used for the integration and processing of the information that aimed to create the hydrological model, and its respective parameterization for this work was the HEC-HMS (the Hydrologic modeling System). This program is currently one of the most widely used by companies and academic institutions worldwide, being considered a leader in its market segment.

This document is subject to the hydrological study of Ribeira do Amparo, whose area of influence covers part of the Union of Freguesias de born marrazes Leiria and Rosa, the municipality of Leiria. The water line in question was the field work object for harvesting data, indispensable to the calibration of the models used. In this way, it is intended to ensure a more reliable representation of the results obtained by combining geographic information systems and the hydrological modeling software. The objective is to present a solid methodology to evaluate potential water utilization with the support of technology SIG and determine the full-tip flow associated with the various periods of return, taking into consideration the morphology and occupation of the terrain.

Keywords: *Geographic Information Systems, Hydrological model, HEC-HMS*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

| | |
|---|-----------|
| DEDICATÓRIA | 3 |
| AGRADECIMENTOS | 5 |
| RESUMO | 7 |
| ABSTRACT | 9 |
| ÍNDICE | 11 |
| LISTA DE FIGURAS | 14 |
| LISTA DE TABELAS | 17 |
| LISTA DE GRÁFICOS | 18 |
| LISTA DE FLUXOGRAMAS | 18 |
| LISTA DE SIGLAS | 20 |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Enquadramento do Tema | 1 |
| 1.2. Objetivos do trabalho | 4 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1. Bacias Hidrográficas | 6 |
| 2.1.1. Ciclo Hidrológico | 6 |
| 2.1.2. Caracterização de uma bacia hidrográfica | 8 |
| 2.1.3. Caracterização geométrica | 9 |
| 2.1.4. Caracterização do sistema de drenagem | 9 |
| 2.1.5. Caracterização orográfica | 14 |
| | 11 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 2.1.6. | Caraterização geológica | 16 |
| 2.1.7. | Tipo de uso e ocupação do solo | 17 |
| 2.2. | Inundações Urbanas | 17 |
| 2.2.1. | Causas e tipos de inundações | 18 |
| 2.2.2. | Impacte das inundações | 24 |
| 2.2.3. | Caraterização geral dos sistemas de drenagem urbana sustentáveis | 27 |
| 2.2.4. | Medidas estruturais | 30 |
| 2.2.4.1. | Barragens e açudes | 31 |
| 2.2.4.2. | Diques | 32 |
| 2.2.4.3. | Sistemas públicos de drenagem urbana | 33 |
| 2.2.4.4. | Outras medidas estruturais | 34 |
| 2.2.5. | Medidas não estruturais | 35 |
| 2.2.5.1. | Pavimentos permeáveis | 35 |
| 2.2.5.2. | Bacias de retenção | 37 |
| 2.2.5.3. | Trincheiras de infiltração | 40 |
| 2.2.5.4. | Bacias de infiltração | 41 |
| 2.2.5.5. | Poços absorventes | 42 |
| 2.2.5.6. | Faixas filtrantes | 43 |
| 2.2.5.7. | “Swales” ou valas revestidas com coberto vegetal | 44 |
| 2.2.5.8. | Sistemas de bio-retenção | 45 |
| 2.2.5.9. | Telhados com vegetação | 46 |
| 2.2.5.10. | Caldeiras | 46 |
| 2.2.5.11. | Cisternas | 47 |
| 2.2.5.12. | Medidas de Planeamento Urbano | 48 |
| 2.2.6. | Medidas de proteção individual | 50 |
| 2.3. | Modelação Hidrológica | 51 |
| 2.3.1. | Contextualização | 51 |
| 2.3.2. | Precipitação | 52 |
| 2.3.3. | Modelos Hidrológicos | 61 |
| 2.3.3.1. | Pré-determinação das Pontas de Cheia | 63 |
| 2.3.3.2. | Integração com Ferramentas SIG | 67 |
| 2.3.4. | Softwares de Modelação | 72 |
| 2.3.4.1. | Modelos Digitais do Terreno (MDT) | 72 |
| 3. | MODELAÇÃO HIDROLÓGICA DA RIBEIRA DO AMPARO – CASO DE ESTUDO | 75 |

| | |
|--|------------|
| 3.1. Enquadramento | 75 |
| 3.2. Descrição da Área de Estudo | 78 |
| 3.2.1. Localização Geográfica | 78 |
| 3.2.2. Caraterização do sistema de drenagem | 86 |
| 3.2.2.1. Área de drenagem | 87 |
| 3.2.3. Caraterização geométrica | 87 |
| 3.2.3.1. Coeficiente de compacidade | 88 |
| 3.2.3.2. Fator de forma | 88 |
| 3.2.4. Caraterização orográfica | 89 |
| 3.2.5. Caraterização geológica | 90 |
| 3.2.6. Ocupação do solo | 92 |
| 3.3. Modelação hidrológica | 94 |
| 3.3.1. Modelo de simulação hidrológica | 94 |
| 3.3.1.1. Modelo de bacia | 94 |
| 3.3.1.2. Modelo de Precipitação | 98 |
| 3.3.1.3. Especificações de controlo | 98 |
| 3.3.2. Análise dos resultados do modelo de simulação hidrológica | 107 |
| 4. CONCLUSÕES | 114 |
| 5. PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS | 116 |
| BIBLIOGRAFIA | 117 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Distribuição da água no planeta..... | 1 |
| Figura 2 - Ciclo Hidrológico..... | 6 |
| Figura 3 - Esquema de bacias hidrográficas | 7 |
| Figura 4 – Rede de drenagem de uma bacia hidrográfica..... | 10 |
| Figura 5 – Influência da forma da bacia na captação da água da chuva..... | 16 |
| Figura 6 - Perfil transversal tipo de linha de água | 19 |
| Figura 7 - Classificação da precipitação de acordo com a origem meteorológica..... | 23 |
| Figura 8 - Impacte de uma inundação, Amazonas, Brasil | 25 |
| Figura 9 - Impacte de uma inundação, Rio do Janeiro, Brasil | 26 |
| Figura 10 - Impacte de uma inundação, Seixal, Portugal..... | 27 |
| Figura 11 - Fases do desenvolvimento da drenagem urbana | 29 |
| Figura 12 - Comportamento do sistema fluvial sem (a) e com (b) cobertura vegetal..... | 31 |
| Figura 13 – Diques de defesa do Rio Liz na cidade de Leiria | 33 |
| Figura 14 - Sistema de drenagem urbana | 34 |
| Figura 15 - Secção transversal de um pavimento poroso com armazenamento | 36 |
| Figura 16 - Perfil transversal de uma bacia de retenção a seco | 38 |
| Figura 17 - Perfil transversal de uma bacia de retenção com nível de água permanente..... | 38 |
| Figura 18 - Esquema de bacia em série..... | 39 |
| Figura 19 - Esquema de bacia em paralelo | 39 |
| Figura 20 - Corte transversal de uma trincheira de infiltração | 40 |
| Figura 21 - Bacia de infiltração | 41 |
| Figura 22 - Esquema de um poço de infiltração | 42 |
| Figura 23 - Esquema de um poço de injeção..... | 43 |
| Figura 24 - Esquema de uma faixa filtrante | 44 |
| Figura 25 - Sistema de Bio-Retenção | 45 |
| Figura 26 - Caldeira com sarjeta | 47 |
| Figura 27 - Exemplo de uma cisterna..... | 47 |
| Figura 28 – Diagrama de fluxo numa bacia hidrográfica | 52 |
| Figura 29 – Distómetro | 54 |
| Figura 30 – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos..... | 55 |
| Figura 31 - Representação dos padrões de distribuição de blocos de precipitação em hietogramas | 60 |
| Figura 32 - Classificação de modelos hidrológicos | 61 |
| Figura 33 – Relação entre a precipitação total e a precipitação útil para diversos tipos de escoamento..... | 66 |
| Figura 34 - Exemplo de um modelo digital do terreno | 72 |
| Figura 35 - Localização da área de estudo | 79 |
| Figura 36 – Localização dos pontos de referência para o estudo..... | 80 |
| Figura 37 – Percurso da Ribeira Amparo, desde Estrada Nacional Nº1 até à Nova Leiria; (a) Ribeira do Amparo a oeste da Rua de Dublin; (b) Ribeira do Amparo a norte da Rua da Matinha; (c) Ribeira do Amparo a oeste da Travessa Manuel Gomes dos Santos..... | 81 |

| | |
|---|-----|
| Figura 38 – Modelo Digital do Terreno da área de estudo. | 83 |
| Figura 39 - Direção de escoamento da área de estudo. | 83 |
| Figura 40 - Caracterização das sub-bacias em estudo. | 85 |
| Figura 41 - Caracterização do sistema de drenagem. | 86 |
| Figura 42 - Caracterização geológica da bacia. | 91 |
| Figura 43 - Carta de uso e ocupação do solo de 2007 (nível 2; fonte DGT) da área de estudo. | 93 |
| Figura 44 - Regiões Pluviométricas. | 99 |
| Figura 45 - Gráficos obtidos devido aos dados hidrológicos para um período de retorno de 10 anos | 110 |
| Figura 46 - Gráficos obtidos devido aos dados hidrológicos para um período de retorno de 20 anos..... | 111 |
| Figura 47 - Gráficos obtidos devido aos dados hidrológicos para um período de retorno de 50 anos | 111 |
| Figura 48 - Gráficos obtidos devido aos dados hidrológicos para um período de retorno de 100 anos..... | 112 |

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Fatores condicionantes do escoamento superficial | 11 |
| Tabela 2 - Classificação das cheias..... | 21 |
| Tabela 3 – Classificação dos tipos de precipitação | 24 |
| Tabela 4 – Formas de precipitação | 53 |
| Tabela 5 – Valores médios do coeficiente C..... | 64 |
| Tabela 6 - Valores médios do coeficiente C | 65 |
| Tabela 7 - Áreas de uso e ocupação do solo segundo a COS_07 na área de estudo (sub-bacias de QM e NL). | 93 |
| Tabela 8 - Elementos retirados no ArcGis para a caracterização da zona de estudo | 97 |
| Tabela 9 - Valores de intensidade de precipitação..... | 100 |
| Tabela 10 - Valores obtidos para a construção do hietograma para um período de retorno de 10 anos..... | 102 |
| Tabela 11 - Valores obtidos para a construção do hietograma para um período de retorno de 20 anos..... | 103 |
| Tabela 12 - Valores obtidos para a construção do hietograma para um período de retorno de 50 anos..... | 104 |
| Tabela 13 - Valores obtidos para a construção do hietograma para um período de retorno de 100 anos..... | 105 |
| Tabela 14 - Resultados dos caudais de ponta de cheia para o período de retorno de 10 anos..... | 107 |
| Tabela 15 - Resultados dos caudais de ponta de cheia para o período de retorno de 20 anos..... | 107 |
| Tabela 16 - Resultados dos caudais de ponta de cheia para o período de retorno de 50 anos..... | 108 |
| Tabela 17 - Resultados dos caudais de ponta de cheia para o período de retorno de 100 anos... | 108 |

Lista de gráficos

| | |
|---|-----|
| Gráfico 1 - Curva exponencial da Intensidade – Duração – Frequência | 57 |
| Gráfico 2 - Curva Hiperbólica da Intensidade – Duração – Frequência | 58 |
| Gráfico 3 – Componentes de um hidrograma | 62 |
| Gráfico 5 - Curva exponencial da Intensidade – Duração – Frequência | 101 |
| Gráfico 6 - Hietograma de Precipitação para período de retorno de 10 anos | 103 |
| Gráfico 7 - Hietograma de Precipitação para período de retorno de 20 anos. | 104 |
| Gráfico 8 - Hietograma de Precipitação para período de retorno de 50 anos. | 105 |
| Gráfico 9 - Hietograma de Precipitação para período de retorno de 100 anos. | 106 |
| Gráfico 10 - Gráficos obtidos devido aos dados hidrológicos para um período de retorno de 10 anos..... | 110 |
| Gráfico 11 - Gráficos obtidos devido aos dados hidrológicos para um período de retorno de 20 anos..... | 111 |
| Gráfico 12 - Gráficos obtidos devido aos dados hidrológicos para um período de retorno de 50 anos..... | 111 |
| Gráfico 13 - Gráficos obtidos devido aos dados hidrológicos para um período de retorno de 100 anos..... | 112 |

Lista de fluxogramas

| | |
|---|----|
| Fluxograma 1 - Metodologia | 77 |
| Fluxograma 2 - Metodologia usada para delimitação das sub-bacias hidrográficas..... | 84 |

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

- ARH - Administrações de Regiões Hidrográficas
- BMP - Best Management Practices
- CAD - Computer Aided Design
- CEH - Centro de Engenharia Hidrológico
- CFEST - Coupled Fluid Energy and Solute Transport
- CN - Curve Number
- D.R. – Diário da República
- EM-DAT - Emergency Events Database
- ERDAS - Earth Resources Data Analysis System
- ESRI - Environmental System Research Institute, Inc
- EUA – Estados Unidos da América
- EWR - Environmental water resource
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente
- FRWG - Federal Interagency Stream Restoration Working Group
- GUI – Graphical User Interface
- HEC - Hydrologic Engineering Center
- HEC-GeoHMS – Hydrologic Engineering Center – Geospatial Hydrologic Modelling Extension
- HEC-GeoRAS – Hydrologic Engineering Center – River Analysis System - Geospatial Hydrologic Modelling Extension
- HEC-HMS - Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
- HEC-RAS – Hydrologic Engineering Center – River Analysis System
- IDF – Curvas de Intensidade, Duração e Frequência
- IGEOE - Instituto Geográfico do Exército

IGP - Instituto Geográfico Português

LID - Low Impact Development

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MDT – Modelo Digital do Terreno

ONG – Organização Não Governamental

PBH – Planos de Bacia Hidrográfica

PRMS - Sistema de Modelagem de Precipitação-Escoamento

RAS - River Analysis System

RJIGT - Regime Jurídico dos Instrumentos de Gestão do Território

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SAAP - Sistema de Aproveitamento de Águas Pluviais

SAR - Sistema de Análise de Rios

SCS - Soil Conservation Service

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

SMA – Soil Moisture Accounting

SNIRH - Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos

TIN - Triangulated Irregular Network

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

URH - Unidades de Resposta Hidrológica

US – United States

WSUD - Water Sensitive Urban Design

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

1. Introdução

1.1. Enquadramento do Tema

A água é a força vital da biosfera e a espinha dorsal do desenvolvimento socioeconómico de um país. É um bem essencial à vida. Devido ao aumento de população, crescente industrialização e excessiva poluição das massas de água superficiais e subterrâneas, a escassez de água potável é um problema grave em várias partes do mundo. Este recurso está-se a tornar mais escasso e a tendência é no sentido de que a maior parte da população mundial não terá um fácil acesso a ele.

Cerca de 70% da superfície terrestre é constituída por água, no entanto, apenas 2,5% está disponível para o uso das populações (Figura 1). Como conseguir água potável é um dos maiores desafios em várias partes do mundo, especialmente em países em desenvolvimento. A ONG *Tearfund* fez um estudo onde a conclusão é a de que no último século o consumo de água cresceu duas vezes mais rápido do que a população mundial. De acordo com as previsões do *World Water Council (WWC)*, 23 países poderão vir a enfrentar em 2025 uma escassez absoluta de água e entre 46 e 52 países (totalizando cerca de 3 mil milhões de pessoas), poderão sofrer de stress hídrico nessa data.

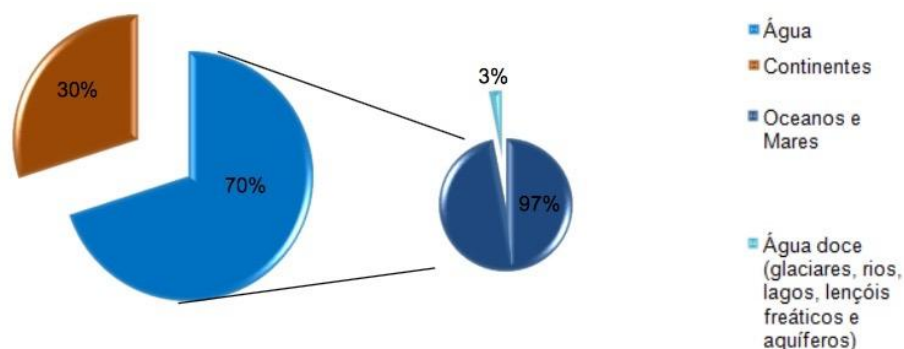


Figura 1 - Distribuição da água no planeta

Fonte: <http://bit.ly/distribuicaoaguaplaneta> (2014) (adaptado)

A crescente escassez de água potável representa uma ameaça grave ao desenvolvimento humano sustentável, conduzindo à rápida redução das reservas de recursos hídricos e tornando a conservação deste recurso um desafio vital para a humanidade.

Face a este cenário, torna-se evidente a urgência em repensar o uso da água. Propõe-se uma adaptação do princípio dos 3R (Reduzir, Reutilizar, Reciclar) enunciado para os resíduos no quinto Programa de Ação em Matéria de Ambiente da União Europeia. Contudo, em relação à água, será mais correto definir um princípio de 4R, dado que, para além da redução dos consumos, da reutilização da água e da sua reciclagem, é importante considerar também, numa perspetiva de sustentabilidade, o recurso a origens alternativas. É importante salientar que a qualidade da água deve ser ajustada às necessidades de utilização, pois um tratamento “excessivo” da água para fins não potáveis implica consumos desnecessários de recursos tais como produtos químicos e energia.

A recolha de águas da chuva tem emergido como uma das mais importantes ferramentas para a conservação de água, que poderá assegurar água segura, acessível e económica para consumo e outros usos domésticos, como agricultura, pecuária e pequenas indústrias, além da sua significativa contribuição para o aumento de recursos hídricos subterrâneos (Inamdar *et al.*, 2013). Existem ainda vários benefícios na recolha de águas da chuva, como impedir escoamentos excessivos, controlo de cheias, melhoria dos solos e conservação dos mesmos (Inamdar *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2009).

Atualmente, o aproveitamento e utilização das águas da chuva é já uma realidade em vários países, tais como na Alemanha, Estados Unidos da América, Austrália e Holanda:

- Na Alemanha (e.g. Berlim) é cobrada uma taxa pela introdução de água da chuva no sistema de drenagem urbana.
- Nos Estados Unidos da América o aproveitamento de água de chuva destina-se à lavagem de sanitas, veículos, refrigeração, rega de jardins e hortas.
- Na Austrália, o sistema de captação e aproveitamento de água da chuva proporciona uma economia de 45% do consumo total de uma residência e 65% na agricultura. Tem uma política com regras severas e elevadas multas por desobediência. Assim, pessoa, singular ou coletiva, que regar o seu jardim com mangueira fora do período estipulado por lei, usar mangueira para lavar o carro, encher piscinas novas ou qualquer local novo que solicite uso de grande quantidade

de água, está sujeita a ser penalizada , visto ser um país muito seco, com poucos cursos de água natural, onde toda a água é preciosa;

- Na Holanda , a água é captada para evitar o transbordo de canais que se situam abaixo do nível do mar . A água armazenada é geralmente utilizada na agricultura e abastecimento de fontes ornamentais.

Em Portugal, os primeiros projetos de aproveitamento de águas da chuva datam do ano de 2005 com a construção do Empreendimento Cooperativo da Ponte da Pedra, em Leça do Bailio, onde, entre muitas inovações decorrentes da ideia de “habitação sustentável”, recorreu-se à água da chuva para utilizar, por exemplo, nos sanitários. Foi, então, construído um reservatório enterrado para o armazenamento das águas da chuva e posterior encaminhamento para o sistema de rega de jardins e autoclismos das habitações (Bartolo, 2006).

As comunidades são hoje em dia confrontadas com a necessidade de diversificar as suas fontes de abastecimento de água, para suprir as crescentes necessidades da população (Goonrey et al., 2007; Lloyd et al., 2001). No entanto, existem mais desafios para com as comunidades, nomeadamente no que respeita às cheias e às inundações. Apesar de muitas vezes confundidos, estes dois conceitos são na realidade diferentes. Como afirma Ramos (2005), todas as cheias provocam inundações, no entanto, nem todas as inundações são devido a cheias.

Ramos (2005) define cheias como sendo um fenómeno hidrológico extremo, de frequência variável, que consiste no transbordo de um curso de água relativamente ao seu leito normal, originando assim a inundação de terrenos ribeirinhos. Já Portela (2008) define cheia quando se verifica a alimentação intensa de uma bacia hidrográfica, fazendo com que o caudal que aflui à rede hidrográfica esteja acima da capacidade normal de transporte, provocando assim transbordo das suas margens, alagando as suas zonas contíguas.

Por sua vez, as inundações são fenómenos hidrológicos extremos que podem ter origem natural assim como origem humana, consistindo na submersão de uma área geralmente emersa. Enquanto as cheias são temporárias as inundações podem ter um carácter permanente, como é o caso do alagamento de terras devido à construção de uma barragem ou a inundação de zonas costeiras devido à subida do nível médio das águas do mar devido ao aquecimento global (Ramos, 2013). Os estudos hidrológicos realizados a bacias hidrográficas permitem perceber o funcionamento do balanço hídrico, os sistemas

que controlam o movimento da água e os impactos da alteração do uso do solo sobre a qualidade e a quantidade da água (Whitehead e Robinson, 1993).

Os SIG (Sistemas de Informação Geográfica) têm surgido na última década como sistemas de software de ampla utilização para entrada (input), armazenamento, manipulação e saída (output) de dados geográficos de referência. O SIG é atualmente utilizado para reunir e gerir grandes bases de dados espaciais, levar a cabo análises estatísticas e espaciais e produzir representações visuais eficazes dos resultados do modelo. Os primeiros passos para ligar mais estreitamente as abordagens já foram dados, incluindo embutir a modelação no SIG. A modelagem multidisciplinar integrada criou novas oportunidades para as tecnologias SIG, particularmente nas áreas da modelação e funcionalidade dos dados (Steyaert et Goodchid,1993).

1.2. Objetivos do trabalho

A presente dissertação de mestrado apresenta os resultados do estudo hidrológico da Ribeira do Amparo, cuja bacia hidrográfica insere-se na área urbana da união das freguesias de Marrazes e Barosa, concelho de Leiria.

Os principais objetivos deste estudo são:

- Apresentar uma metodologia sólida para avaliar potenciais aproveitamentos de águas com o apoio de tecnologia SIG.
- Determinar o caudal de ponta de cheia associada aos vários períodos de retorno, tendo em conta a morfologia e a ocupação do terreno.

Nas próximas páginas encontram-se apresentados conhecimentos de base para a elaboração deste caso de estudo, particularmente, a definição de bacia hidrográfica a sua caracterização, os avanços ao nível da modelação à escala da bacia, a metodologia adotada para a execução deste estudo, a explicação do impacto das inundações e a caracterização geral dos sistemas de drenagem urbana sustentáveis e a explicação das fórmulas que têm vindo a ser usadas na modelação hidrológica para a determinação dos caudais de ponta de cheia, bem como a incerteza que integram. Assim, a presente tese encontra-se dividida do seguinte modo:

- Revisão Bibliográfica: No capítulo 2 será realizado o enquadramento teórico, começando por descrever as bacias hidrográficas, realizando a sua caracterização e a caracterização dos conceitos mais importantes, como é o caso do ciclo hidrográfico, sistemas de drenagem, entre outros. Nesta parte foi ainda descrito as principais características das inundações urbanas, fazendo a distinção entre este conceito e o das cheias (conceitos facilmente confundíveis);
- Metodologia: no capítulo 3 é apresentada a metodologia escolhida para realizar a presente investigação com a respetiva justificação e quais as técnicas de análise escolhidas de modo a analisar os dados obtidos;
- Resultados: no capítulo 3 é apresentado os resultados obtidos;
- Conclusão: no capítulo 4 serão apresentadas as principais conclusões e reflexões retiradas depois da análise dos dados;
- Propostas para desenvolvimento futuro: No Capítulo 5 são apresentadas propostas para estudos futuros, a partir de questões colocadas durante a realização do presente trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Bacias Hidrográficas

2.1.1. Ciclo Hidrológico

O conceito de ciclo hidrológico (Figura 2) relaciona-se com o movimento e com a troca de água nos seus diferentes estados físicos, ocorrendo na hidrosfera, entre os oceanos, as calotas polares, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera.

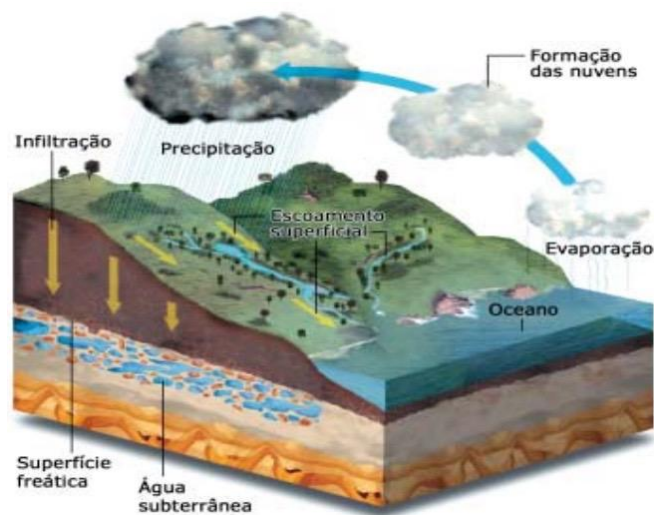


Figura 2 - Ciclo Hidrológico

Fonte: FEAM, 2006

Na literatura da especialidade, existem diferentes pontos de vista para descrever uma bacia hidrográfica. De acordo com Lencastre e Franco (1992) bacia hidrográfica é a área limitada por um conjunto de cursos de água ligados entre si, desaguando numa única saída, drenada por um curso de água. O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) define uma bacia hidrográfica como um sistema receptor fechado, formado por um determinado volume subterrâneo e uma superfície de intercepção, delineada por uma rede hidrográfica constituída pelos escoamentos superficiais. Carvalho e Silva (2006) define bacia

hidrográfica como uma área de captação natural da água da precipitação que faz encaminhar a água para um único ponto. Esta é composta basicamente por um conjunto de superfícies de escoamento e de uma drenagem constituída por cursos de água até resultar num único leito, conforme mostra a figura 3.

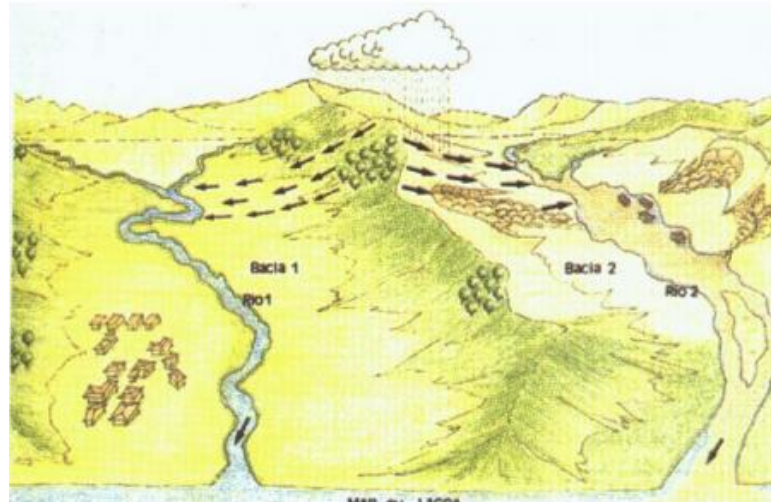


Figura 3 - Esquema de bacias hidrográficas

Fonte: Carvalho e Silva, 2006

Ainda, associados às bacias hidrográficas, surgem os conceitos de sub-bacia e microbacia. A definição de microbacia não é unânime na comunidade científica. Cecílio et al. (2006) entende microbacia como uma sub-bacia hidrográfica de área reduzida, não havendo consenso na decisão da área máxima, tendo apenas explicitado que a área máxima de uma microbacia pode variar entre $0,1 \text{ km}^2$ a 200 km^2 , já Faustino (1996) refere que uma microbacia tem uma área de drenagem inferior a 100 km^2 . As sub-bacias constituem áreas de drenagem dos afluentes do curso de água principal (Teodoro et al., 2007). Para Faustino (1996) as sub-bacias possuem áreas que podem variar entre 100 km^2 e 700 km^2 , porém, para Santana (2003) as bacias podem ser desmembradas num número qualquer de sub-bacias dependendo da secção de referência considerada.

No cenário nacional, foram desenvolvidos estudos por Girão em 1922 e 1953 e por Martins no ano de 1940, afetos às bacias hidrográficas do rio Vouga e Mondego. Alguns anos depois, no início de 1994, surgiu em Portugal, o Decreto-Lei n.º 45/94 de 22 de fevereiro, que estabelece a gestão e planeamento dos recursos hídricos por bacia

hidrográfica, definindo as diretrizes para a elaboração dos Planos de Bacia Hidrográfica (PBH).

Atualmente, no território português as bacias hidrográficas estão organizadas por Administrações de Regiões Hidrográficas (ARH), a saber (www.apambiente.pt):

- RH1 Minho / Lima;
- RH2 Norte Cávado / Ave / Leça;
- RH3 Douro;
- RH4 Centro Vouga / Mondego / Lis e Ribeiras do Oeste;
- RH5 Tejo;
- RH6 Alentejo Sado / Mira;
- RH7 Alentejo Guadiana;
- RH8 Algarve Ribeiras do Algarve.

2.1.2. Caracterização de uma bacia hidrográfica

As características de uma bacia hidrográfica estão relacionadas com a forma como a precipitação na bacia vai influenciar o caudal do respetivo curso de água principal. Os fatores mais preponderantes no regime de escoamento de uma dada bacia são:

- Características fisiográficas: área, forma, geologia e posição do nível freático, cobertura vegetal da bacia, orientação, utilização e declive.
- Características climáticas: regime de precipitação na bacia – tipo de precipitação (orografia, convectiva ou ciclónica), forma de precipitação (neve, granizo ou chuva), intensidade, duração, frequência, distribuição no tempo e no espaço e direção dominante das tempestades; evapotranspiração (dependente da temperatura e do tipo de vegetação), vento, radiação solar e humidade do solo e no ar.
- Características da rede de drenagem: dimensão e forma da secção transversal, declive, rugosidade e comprimento dos cursos de água.

A delimitação da bacia pode ser efetuada de forma manual através de uma carta topográfica, seguindo as linhas das cristas das elevações circundantes ao curso de água em

estudo ou de forma automática recorrendo a ferramentas de SIG que permitem determinar as direcções de escoamento e delimitar a área da bacia hidrográfica.

2.1.3. Caracterização geométrica

A caracterização geométrica de uma bacia hidrográfica engloba dois conceitos principais, sendo eles a área de drenagem e a forma da bacia (Tonello, 2006):

- **Área da bacia** - É a área que direciona a água das precipitações aí caída para a alimentação do curso de água. Entende-se a área de drenagem como sendo a área plana em projecção horizontal limitada pelas linhas de separação topográfica. Geralmente vem expressa em quilómetros quadrados ou hectares (Teodoro et al., 2007).
- **Forma da bacia** - A forma da bacia pode ser caracterizada através de uma descrição qualitativa e quantitativa (Lencastre et al., 1992). Do ponto de vista qualitativo uma bacia hidrográfica pode ser classificada como sendo alongada, arredondada ou ramificada. A classificação quantitativa engloba o coeficiente de compacidade e o fator de forma (Villela et al., 1975).

2.1.4. Caracterização do sistema de drenagem

A drenagem de uma bacia hidrográfica é constituída pelo canal principal de escoamento e respetivos afluentes (Figura 4). A quantidade de água depende da sua capacidade de alcançar os cursos de água existentes. Podem assim variar em função do tipo de uso e ocupação dos solos, da precipitação total em determinada zona e ainda devido às diversas perdas devido a infiltrações, evapotranspiração e retenção superficial (Lança et al, 2001).

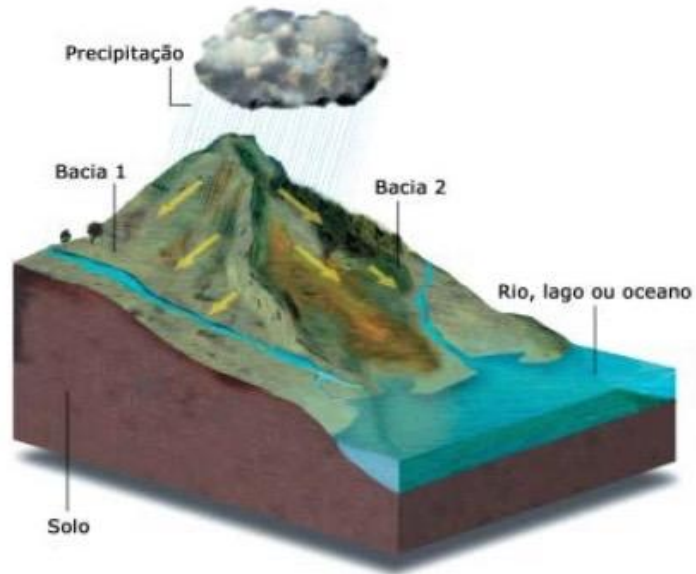


Figura 4 – Rede de drenagem de uma bacia hidrográfica

Fonte: FEAM, 2006

O estudo das características e funcionamento de uma bacia hidrográfica e o cálculo de caudais afluentes a uma determinada estrutura de drenagem implica conhecer a porção de precipitação que resulta em escoamento superficial. De acordo com Chow et al. (1988), os fatores que influenciam o escoamento superficial numa bacia hidrográfica, podem ser agrupados em dois grupos: climáticos e fisiográficos conforme ilustra a tabela 1.

Tabela 1 - Fatores condicionantes do escoamento superficial

| Grupo | Tipo | Fatores |
|---------------|-----------------------------------|---|
| Climáticos | Precipitação | Modalidade (chuva, neve, granizo, orvalho, neblina ou geada), distribuição no tempo e no espaço, frequência de ocorrência, direção dominante das tempestades, precipitação precedente e humidade do solo. |
| | Evaporação | Temperatura, vento, pressão atmosférica, natureza e superfície de evaporação. |
| | Transpiração | Temperatura, radiação solar, vento, humidade do ar, humidade do solo e tipo de vegetação. |
| Fisiográficos | Características da bacia | Geométricas – forma, tamanho, declive, orientação e elevação. |
| | | Físicas – cobertura e utilização do solo, tipo do solo, infiltração, permeabilidade, topografia e capacidade de formar lençóis freáticos. |
| | Caraterísticas dos cursos de água | Capacidade de escoamento: dimensão da secção transversal, forma da secção transversal, declive, rugosidade, caraterísticas da rede hidrográfica e comprimento do curso de água. Capacidade de armazenamento. |

Fonte: Chow et al.,1988 (adaptado)

A quantidade de água , usualmente denominada precipitação útil ou efetiva , é o resultado da diferença entre a quantidade de água precipitada e as perdas para o escoamento superficial por Interceção, Retenção, Infiltração e Evapotranspiração.

- Interceção: parte da água que, durante uma determinada chuvada, não chega a atingir o solo porque é intercetada pela vegetação e/ou construções existentes;
- Retenção: parte da precipitação que atinge o solo e que fica retida nas várias depressões existentes (pequenas poças e lagos).

- Infiltração: a água que se infiltra e que escoar até atingir a camada não saturada do solo, ou percola verticalmente até atingir a camada saturada do solo, reforça as reservas subterrâneas e constitui as perdas por infiltração que representam a maior perda para o escoamento superficial.
- Evapotranspiração: forma pela qual a água da superfície terrestre passa para a atmosfera no estado gasoso. Este processo envolve a evaporação de água de superfícies de água, tais como os rios, lagos, oceanos, dos solos, da vegetação e a transpiração das plantas.

Quando a água se escoar superficialmente ao longo das encostas da bacia, convergindo para pequenas linhas de água que, por sua vez, se vão unindo e formando linhas de água cada vez maiores, constitui a rede de drenagem da bacia hidrográfica. Este fenómeno acontece quando a capacidade de interceção, retenção e infiltração do solo é ultrapassada (assumindo que o efeito da evapotranspiração é pouco significativo durante os períodos de precipitação).

Os cursos de água podem ser classificados, recorrendo à constância de escoamento, que permite a classificação em perenes, intermitentes e efémeros (Lencastre et al., 1992):

- Cursos de água perenes: existe um escoamento em todo o ano, nunca descendo o nível freático abaixo do nível do leito do curso de água.
- Cursos de água intermitentes: regra geral escoam nas estações mais húmidas, pois o nível freático mantém-se acima do leito do curso de água (na época seca, verifica-se o abaixamento do nível freático, descendo para níveis mais baixos que o curso de água, cessando assim o escoamento ou ocorrendo o mesmo durante ou imediatamente após precipitação mais intensa).
- Cursos de água efémeros: existe apenas durante ou após períodos de precipitação, mantendo apenas o escoamento superficial, uma vez que o nível freático se situa sempre a um nível inferior ao leito do curso de água.

O sistema de drenagem de uma bacia hidrográfica pode ser descrito de forma qualitativa através do padrão de drenagem e de forma quantitativa através dos parâmetros: número de ordem e densidade de drenagem (Shaw, 1994).

As drenagens possuem padrões diferentes, sendo classificadas do seguinte modo (Summerfield, 1991):

- Drenagem dendrítica: apresenta um desenvolvimento semelhante à configuração dos ramos de uma árvore, onde os rios confluem em braços agudos, formando várias ramificações. Este padrão desenvolve-se tipicamente sobre rochas de resistência uniforme tais como as sedimentares com acamamento horizontal e rochas ígneas ou metamórficas sem orientações preferenciais e nem foliações.
- Drenagem em treliça: os rios principais consequentes correm paralelamente e recebem rios subsequentes, que fluem transversalmente aos primeiros. Por sua vez, subsequentes, recebem afluentes obsequentes e ressequentes.
- Drenagem retangular: constitui uma variedade da drenagem em treliça, caracterizada pelo aspecto ortogonal devido às bruscas mudanças em ângulo reto nos cursos fluviais, tanto nos principais, como nos tributários. Este padrão é consequência da influência exercida por falhas ou pelos sistemas de diaclasamentos que propiciam uma rede de cursos em moldes geométricos que convergem em ângulos quase retos.
- Drenagem radial: formada por correntes fluviais que se apresentam como raios de uma roda em relação a um ponto central. Esta pode ser do tipo centrífuga, quando os rios divergem a partir de um centro mais elevado irradiando-se por várias direções, e do tipo centrípeto, quando os rios convergem para um ponto central mais baixo.

O número de ordem dos cursos de água permite-nos demonstrar o grau de ramificação ou bifurcação existente dentro de uma bacia hidrográfica. Serão considerados de primeira ordem, os cursos de água que não possuem afluentes. De segunda ordem, os que resultam da união de dois cursos de água de primeira ordem, e assim sucessivamente (Wanielista 1990).

Por sua vez a densidade de drenagem exprime a relação entre o comprimento total dos cursos de água e a área total da bacia. É um parâmetro que varia diretamente com a extensão do escoamento superficial e indica a eficiência da drenagem natural da bacia (Lança et al, 2001).

2.1.5. Caraterização orográfica

O relevo de uma bacia hidrográfica tem enorme influência sobre os fatores meteorológicos e hidrológicos, pois a velocidade do escoamento superficial é determinada pela declividade do terreno, enquanto a temperatura, a precipitação e a evaporação são funções da altitude da bacia.

As características do relevo são informações recolhidas através da análise de curvas de nível ou pontos cotados da área em estudo. Através destas características é possível analisar a variação de altitude dos terrenos e identificar os sentidos dos escoamentos e associá-los aos cursos de água recetores (Lencastre et al., 1992).

As características associadas ao relevo, serão descritas em seguidas, são elas: a curva hipsométrica, a curva hidrodinâmica, a altitude/altura média da bacia, o coeficiente de massividade, o coeficiente orográfico, o índice de declive da bacia e a inclinação média do leito do curso de água.

A curva hipsométrica é dada pela curva integral da curva de frequência altimétrica que apresenta para cada cota a superfície da bacia localizada à cota superior ou igual e relaciona diretamente a superfície da bacia com a respetiva altitude (Sousa e Sena, 2007).

Já a curva hidrodinâmica diz respeito à correspondência entre as cotas do leito do rio e a área da respectiva bacia hidrográfica. Esta curva tem uma importância fundamental no estudo das possibilidades energéticas de um rio (Sousa e Sena, 2007).

Altitude média da bacia corresponde à ordenada média da curva hipsométrica enquanto a altura média da bacia é a diferença entre a altitude média e a altitude mínima da bacia (Sousa e Sena, 2007).

O coeficiente de massividade (1) apresenta valores maiores em bacias pequenas de enormes desníveis e relaciona a altura média da bacia (h_m) em metros e a sua área (A_b) em Km^2 (Lencastre e Franco, 1992).

$$C_m = \frac{h_m}{A_b} \tag{1}$$

O coeficiente orográfico (2) é o resultado da multiplicação entre a altura média da bacia e o coeficiente de massividade. O relevo é pouco acentuado quando o coeficiente orográfico toma valores igual ou inferiores a 6 e muito acentuado quando apresenta valores superiores a 6.

$$C_o = C_m \times h_m \quad (2)$$

A determinação do índice de declive da bacia encontra-se hoje facilitada com recurso aos SIG e à cartografia digital. Na ausência de meios, existem, definidos na bibliografia, alguns índices de declive para a bacia desde que, previamente, se determine o correspondente rectângulo equivalente. O rectângulo equivalente ou índice de alongamento equivalente de uma bacia hidrográfica (KL) é definido como o rectângulo cuja área e perímetro coincidem com a área e perímetro da bacia. O comprimento, L_{eq} , e a largura, b_{eq} , do rectângulo equivalente de uma bacia de área A e perímetro P, obtêm-se a partir do seguinte sistema de equações (quando se verifica a condição $P^2 \geq 16A$) (3):

$$\begin{aligned} L_{eq} \cdot b_{eq} &= A \\ 2(L_{eq} + b_{eq}) &= P \\ L_{eq} &= \frac{P}{4} + \sqrt{\frac{P^2}{16} - A} \\ b_{eq} &= \frac{P}{4} - \sqrt{\frac{P^2}{16} - A} \\ K_L &= \frac{L_{eq}}{b_{eq}} \end{aligned} \quad (3)$$

O Índice de Gravalius ou o Fator de Forma é representado como a razão entre a largura média da bacia e o comprimento axial da mesma (Porto et al, 1999):

- O comprimento axial é calculado da saída da bacia até ao seu ponto mais longínquo, seguindo-se as grandes curvas do rio principal (não se consideram as curvas dos meandros).
- A largura média é conseguida dividindo-se a área da bacia em faixas perpendiculares, onde o polígono formado pela união dos pontos extremos dessas perpendiculares se aproxime da forma da bacia real.

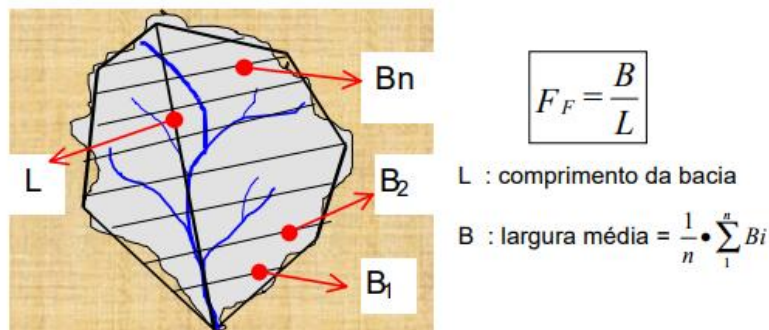


Figura 5 – Influência da forma da bacia na captação da água da chuva

Fonte: Porto et. al, 1999

A inclinação média do leito do curso de água (5) é a relação entre o desnível existente entre a cabeceira do rio e a secção em estudo, Δ_H e a extensão do mesmo, L (Sousa e Sena, 2007).

$$I_m = \frac{\Delta_H}{L} \quad (4)$$

2.1.6. Caraterização geológica

O estudo geológico permite que seja feita a classificação dos solos de acordo com a sua maior ou menor permeabilidade, dada a influência que esta caraterística tem no desenvolvimento de cheias.

A caraterização geológica de uma bacia hidrográfica é importante pois influencia a distribuição e o movimento de água nessa mesma bacia. Dependente do tipo de constituição do substrato geológico, seja rocha ou cascalho e areias, temos um diferente

impacto no escoamento, pois a capacidade de permeabilização dos materiais é diferente. Desta forma, um substrato com permeabilidade maior facilita a infiltração de água no solo, o que implica uma diminuição do escoamento superficial – amortecimento das cheias. Por outro lado, um substrato geológico de baixa permeabilidade reduz a infiltração de água no solo e favorece o escoamento superficial, dando origem a cheias de rápido crescimento (Ramos, 2005).

2.1.7. Tipo de uso e ocupação do solo

O tipo de uso e ocupação do solo podem condicionar significativamente os valores de escoamento superficial e dos caudais de ponta de cheia (Lencastre et al., 1992).

A presença de vegetação no solo, impede que as águas da chuva atinjam diretamente a superfície do solo, favorecendo a infiltração das águas da chuva e, conseqüentemente, a redução do escoamento superficial e a erosão dos solos (Cristofolletti, 1974).

Por oposição, zonas da bacia hidrográfica, urbanizadas com reduzida criação de espaços verdes, trazem dificuldades de retenção e infiltração de águas superficiais, favorecendo os escoamentos superficiais. Aparecem assim, com maior frequência as cheias e inundações, que em certas zonas de uma bacia poderão tornar-se recorrentes durante os períodos de maior intensidade de precipitação (Tucci et al., 1998).

O escoamento em superfícies impermeáveis resulta em maiores volumes e tempos de concentração menores do que o escoamento em superfícies permeáveis com as mesmas dimensões e declives. Estes dois exemplos mostram como o tipo de ocupação do solo afecta as características do escoamento de uma bacia.

2.2. Inundações Urbanas

De acordo com Tingsanchali (2011), mais de metade dos impactes negativos das cheias e inundações ocorre na Ásia. As causas devem-se a fatores naturais como chuvas fortes, marés altas, etc, e a fatores humanos como a obstrução de canais ou a construção

excessiva de canais de escoamento, uso impróprio do solo, desflorestação em regiões de nascentes, etc. Esse risco foi ganhando expressividade, uma vez que nos últimos anos, as cheias e as inundações são dadas como os desastres naturais, com mais frequência no planeta, e um dos mais mortíferos contabilizando um total de mais de 12 mil mortos (Marafuz, 2011; Ramos, 2005).

As cheias e inundações podem afetar significativamente as atividades económicas e, nalguns casos, resultam mesmo em perdas de vidas e danos materiais bastante avultados. Nas últimas décadas, as áreas urbanas têm vindo a expandir-se a um ritmo avulso, sem ser dada a devida atenção aos sistemas de drenagem, pelo que os problemas já recorrentes poderão vir a agravar-se ainda mais no futuro devido às alterações climáticas.

A prevenção e respetiva mitigação de inundações incluem medidas estruturais de controlo de inundações, como a construção de barragens ou diques, e medidas não estruturais que incluem os sistemas de alerta de inundação e planeamento de evacuação da população das cidades já em risco de inundação e ainda a gestão e planeamento do uso do solo.

2.2.1. Causas e tipos de inundações

Muitas cidades e áreas urbanas estão localizadas em planícies aluviais, porque aí o solo é fértil e plano, o que é apropriado para a agricultura e desenvolvimento urbano. Os rios providenciam fornecimento de água para usos domésticos, industriais e de irrigação; mas também fornecem meios convenientes à navegação, transportes e comunicações (Morris. et al,2004) (Pauleit et al,2000).

O escoamento superficial pode produzir inundações e impactes negativos nas áreas urbanas devido a dois processos, que podem ocorrer isoladamente ou combinados (Figura 8):

- **Inundações das zonas ribeirinhas:**

As linhas de água possuem, geralmente, dois leitos, o leito menor em que a água se escoia na maioria do tempo, e o leito maior (leito de cheia). Quando o leito maior é

inexistente ou foi suficientemente ocupado, podem ocorrer cheias, um fenómeno perfeitamente natural, mas que se revela bastante preocupante devido às perdas materiais e vidas humanas envolvidas (figura 6).

- **Inundações devido à urbanização:**

As cheias aumentam a sua frequência e a sua amplitude em consequência da impermeabilização causada pela ocupação do solo, mas também devido à construção nos vales. O desenvolvimento urbano pode, ainda, constituir obstáculo ao escoamento, através da construção de aterros e pontes, drenagens inadequadas e obstruções diversas.

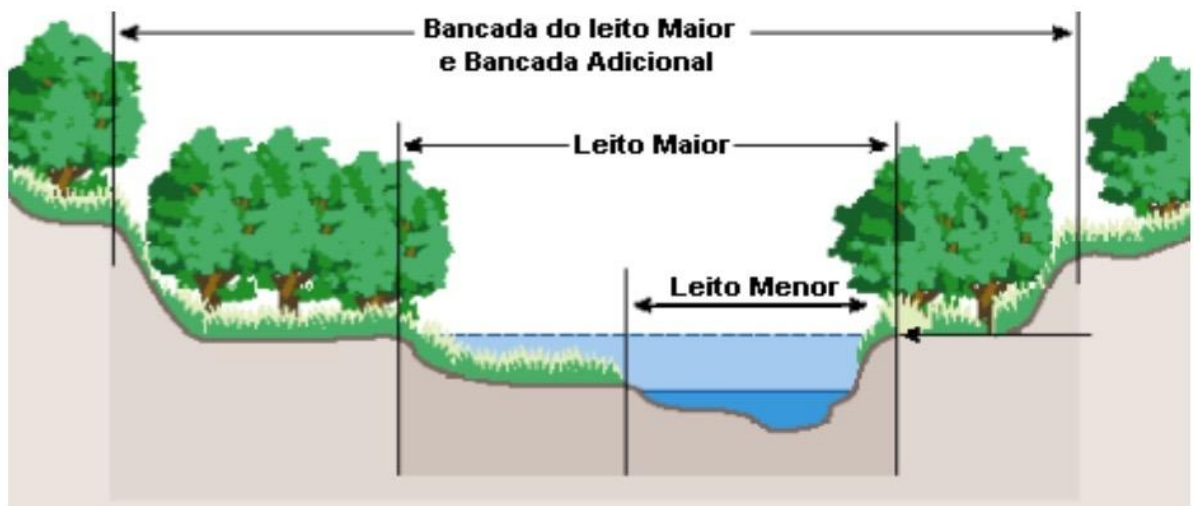


Figura 6 - Perfil transversal tipo de linha de água

Fonte: FRWG 1998

O conceito “inundação” é muitas vezes confundido com o conceito “cheia”, no entanto, os mesmos não são sinónimos, uma vez que, “Todas as cheias provocam inundações, mas nem todas as inundações são devidas às cheias, (...), existem inundações que não são devidas aos rios” (Ramos, 2005).

“Inundação” é definido por Gonçalves (2012) como um “evento igualmente hidrológico, de frequência variável, natural ou induzido pela ação humana, que compreende a submersão de uma área usualmente emersa”. O Estado Português, no Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro, define Inundação como “uma cobertura

temporária de água num local fora do leito, provocada por fenómenos naturais como a precipitação”.

O conceito de “cheia” varia de autor para autor. A Autoridade Nacional de Proteção Civil descreve as “cheias” como fenómenos provocados por precipitações moderadas e permanentes ou repentinas e com uma forte intensidade, sendo que este excesso de precipitação origina o aumento do caudal dos cursos de água e o transbordo das margens. Para Zêzere *et al.*, (2005) as cheias são “fenómenos naturais extremos e temporários, provocadas por precipitações excessivas que fazem aumentar o caudal dos cursos de água, originando o extravase do leito menor e a inundação das margens e áreas circunvizinhas, que se encontram frequentemente ocupadas por atividades humanas”.

Segundo Portela (2008) as cheias “apresentam-se como intumescências graduais e progressivas da superfície livre de cursos de água a que correspondem alturas máximas do escoamento que se propagam para jusante”. Na tabela 2 é possível observar a classificação dada aos diferentes tipos de cheias. Seguindo este raciocínio, Ramos (2005) define cheia como “fenómenos hidrológicos extremos devidos à dinâmica fluvial”, isto é, existe uma cheia sempre que o rio transborda em relação ao seu leito ordinário”, sendo referenciado por Ramos (1994) como o “caudal de margens plenas” e sempre que é ultrapassado, atinge o que se designa por “caudal mínimo de cheia”, que nos permite classificar as cheias nos seus diferentes tipos, detetar os períodos e a frequência de ocorrência, assim como a duração de cada cheia.

Tabela 2 - Classificação das cheias

| | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| Velocidade de propagação | Rápidas |
| | Progressivas |
| | Inundações Urbanas |
| Número de pontas de cheia | Simple |
| | Complexas |
| Tempo de duração | Horas |
| | Dias |
| | Semanas |
| | Meses |
| Frequência e época de ocorrência | Locais e estações mais afetadas |
| Magnitude | Potência |
| Recorrência | Período de retorno |

Fonte: Ramos,2005 (adaptado)

Para Costa (1986), em Portugal as cheias podem ser classificadas essencialmente em três tipos (tabela 2):

- Cheias rápidas
- Cheias progressivas
- Inundações urbanas

As cheias rápidas ocorrem quando se verificam períodos pluviosos muito intensos e concentrados em algumas horas, ocorrendo, sobretudo, em pequenos cursos de água (Zêzere et al., 2005). Este processo, em termos meteorológicos, resulta essencialmente de depressões convectivas que na prática dizem respeito a gotas frias extremamente activas ou depressões estacionárias causadas devido à interacção entre as circulações polar e tropical que se traduzem em elevados caudais instantâneos, sendo por isso muito violentas (Ramos, 2005).

As cheias progressivas estão relacionadas com a dinâmica do escoamento que ocorre na sequência de períodos chuvosos prolongados, podendo estes ser ou não de grande intensidade. Estes longos períodos de precipitação fazem com que os solos saturem a sua capacidade de armazenamento de água e que as reservas subterrâneas sejam repostas, ocorrendo, em consequência, o transbordo do curso de água (Ramos, 2005).

Segundo Ahmad e Simonovic (2013), as inundações urbanas são consideradas grandes ameaças nas cidades, já Soares et al. (2005) afirmam que estas provocam um forte impacto nas atividades comerciais, nos serviços, na interrupção dos transportes e no alagamento das zonas residenciais. As inundações urbanas podem ser classificadas como:

- Devidas a forte pluviosidade local, causando o extravasamento de cursos de água;
- Devido a marés altas ou surtos de tempestade. Este tipo de inundação ocorre geralmente em bacias hidrográficas médias e grandes (> 100 km²). A inundação do leito maior é um processo natural, como consequência do ciclo da água. Quando a população povoa o leito maior, que é uma área de risco, os impactes são frequentes.

A precipitação ou pluviosidade pode ser classificada de acordo com a sua origem, ou seja, pelos fenómenos meteorológicos que a provocaram (Figura 7 e Tabela 3).

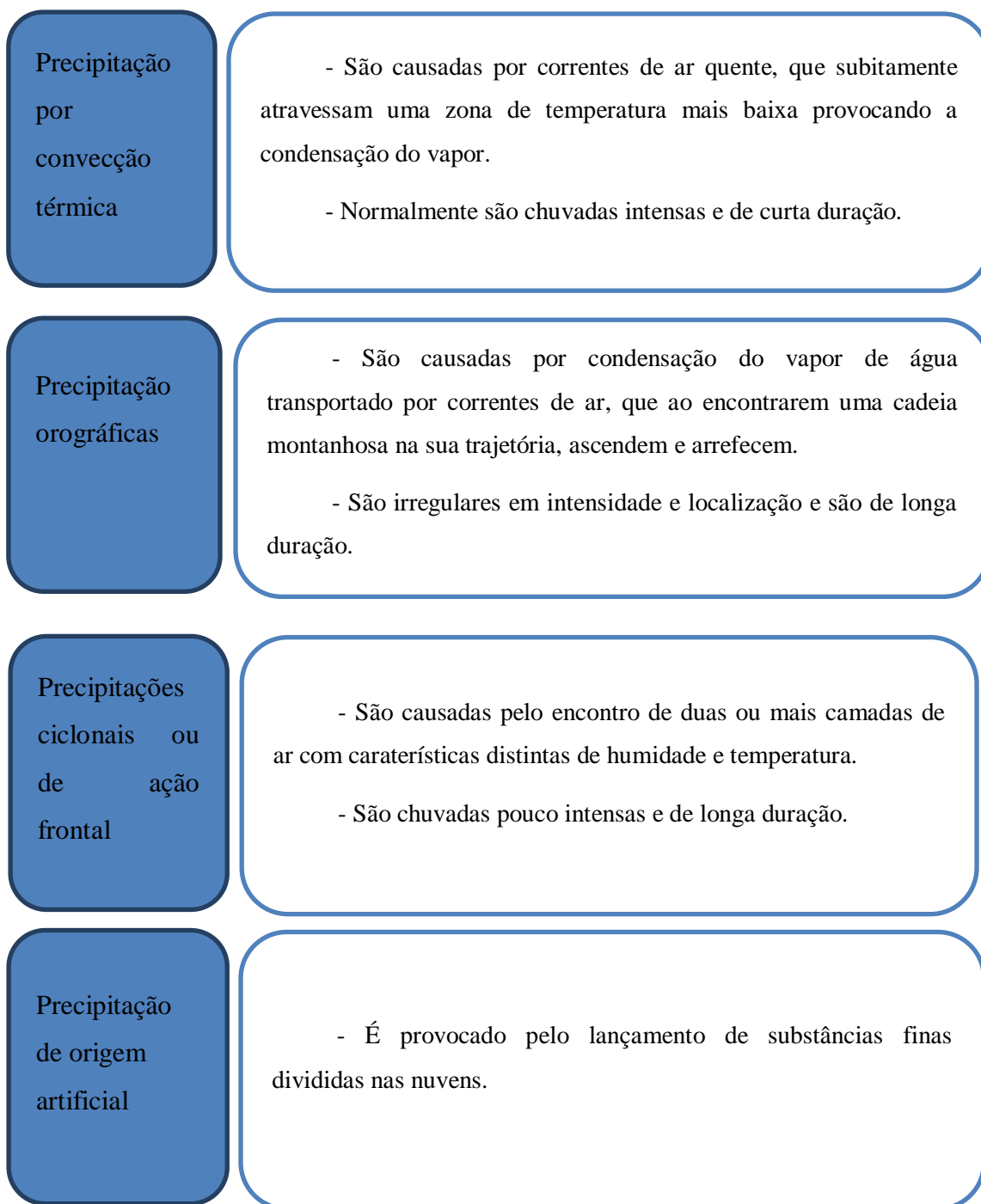


Figura 7 - Classificação da precipitação de acordo com a origem meteorológica

Fonte: Ribeiro, 1987 (adaptado)

Tabela 3 – Classificação dos tipos de precipitação

| Tipos de precipitações | Intensidade I [mm/h] | Diâmetro médio das gotas D [mm] | Velocidade de queda V [m/s] |
|-------------------------------|---------------------------------|--|--|
| Orvalhada | 0,25 | 0,20 | — |
| Chuva ligeira | 1 a 5 | 0,45 | 2,0 |
| Chuva forte | 15 a 20 | 1,50 | 5,5 |
| Tempestade muito violenta | 100 | 3,00 | 8,0 |

Fonte: Ribeiro, 1987 (adaptado)

2.2.2. Impacte das inundações

As inundações são uma realidade continuamente presente no decurso histórico do país, pois, desde sempre assolaram vastas áreas de Portugal (Saraiva & Carvalho, 2009).

O Impacte das inundações devido às inundações urbanas é significativo em termos de perdas económicas, tanto direta como indiretamente. Isto deve-se a uma alta densidade populacional, grandes áreas impermeáveis, entupimento de sistemas de drenagem, altos valores económicos de propriedades e infraestruturas, etc. Os impactes das inundações urbanas podem ser físicos, económicos, sociais e ambientais. As potenciais perdas primárias podem ser evitadas através de um melhor planeamento do uso do solo, o que também tem impacto ao nível de potenciais perdas secundárias. Enquanto em áreas rurais os estragos devido a inundações estão na maior parte das vezes relacionados com perdas de produção agrícola, os estragos em contexto urbano são mais complexos. A acrescentar à vulnerabilidade, a magnitude dos estragos depende do tipo de inundação, especialmente no que diz respeito à sua profundidade, velocidade do escoamento e duração. (Tingsanchali, 2011).

Os rios têm geralmente dois tipos de leito: o leito menor, onde a água corre a maior parte do tempo. O leito menor é delimitado pelo risco de 1,5 a 2 anos. Tucci y Genz (1994) obtiveram um valor médio de 1,87 anos para rios no alto Paraguai. A inundação ocorre

quando a água corre acima do nível do leito menor e entra no leito maior (Figuras 8 e 9). Os níveis do leito maior determinam a magnitude e o risco de inundação. A inundação do leito maior é um processo natural, como consequência do ciclo da água.



Figura 8 - Impacte de uma inundação, Amazonas, Brasil

Fonte: <http://bit.ly/impactoinundacoes>

Quando a população povoa o leito maior, que é uma área de risco, os impactes são frequentes. Estas condições são causadas pelos planos de desenvolvimento urbano das cidades que geralmente, não impõem limites relativos à ocupação de áreas em risco de inundação, pela invasão de propriedades estatais ribeirinhas por população com baixo rendimento e pelo povoamento de áreas de médio risco, sujeitas a inundações menos frequentes, mas que quando inundadas sofrem danos significativos. Os principais impactes para a população são os danos materiais e perdas de vidas, a interrupção de atividades económicas nas áreas inundadas; as infeções por doenças transmitidas pela água, como a cólera, leptospirose, etc. e a poluição da água devido a inundação de lixeiras de material tóxico, estações de tratamento, etc.

As inundações têm-se tornado cada vez mais frequentes e severas devido à impermeabilização do solo e à construção de sistemas de escoamento de águas pluviais. O desenvolvimento urbano pode também criar barreiras ao escoamento, como aterros sanitários, pontes, drenagem inadequada e obstrução/entupimento de condutas e canais. À medida que uma cidade se desenvolve, geralmente ocorre um aumento do pico do caudal de cheia (até 7 vezes), devido a uma maior capacidade de escoamento através de condutas e canais, e impermeabilização das superfícies. Dá-se um aumento da produção de sedimentos devido a superfícies não protegidas e à produção de resíduos sólidos urbanos e também a deterioração em qualidade das águas de superfície e subterrâneas, devido à limpeza de ruas, transporte de materiais sólidos e esgotos clandestinos, e canalizações de águas pluviais (Tucci, 2007).



Figura 9 - Impacte de uma inundação, Rio do Janeiro, Brasil

Fonte: <http://bit.ly/impactoinundacoesbrasil2010>

Quanto aos problemas relacionados com as infraestruturas, Tucci (2007) refere que os maiores problemas em países em desenvolvimento são as altas concentrações da população em pequenas áreas com sistema de transportes inadequado, a poluição do ar e da água e as inundações. Estas deficientes condições ambientais são as principais limitações

ao desenvolvimento, já que determinam as condições de higiene e a qualidade de vida das populações e têm impactes ambientais graves.

Na ausência de planeamento do uso do solo, as habitações são construídas em áreas de risco de inundação e aluimento de terras, levando à mortalidade frequente nas estações chuvosas (Tucci, 2007).

Concluindo, de todos os eventos naturais ocorridos em Portugal, as inundações são aquelas que mais prejuízos causam no país, registando valores elevados de mortes e de pessoas afetadas, sendo necessário existir fortes medidas de atenuação contra este fenómeno de forma a minimizar estes valores (Figura 10).



Figura 10 - Impacte de uma inundação, Seixal, Portugal

Fonte: <http://bit.ly/impactoinundacaobarreiro2016>

2.2.3. Caraterização geral dos sistemas de drenagem urbana sustentáveis

Os sistemas de drenagem urbana têm como principal objetivo a minimização de dano, quer económico ou de vidas humanas, tentando prevenir o risco de inundações urbanas. As medidas de resposta são implementadas durante ou imediatamente após o

incidente de inundação. Elas necessitam de planejamento avançado e preparação de resposta a situações de emergência. São essas medidas, medidas estruturais e não estruturais (Tingsanchali, 2011).

Atualmente, a política de desenvolvimento e controle dos impactos quantitativos da drenagem ainda continua, essencialmente, a basear-se no conceito de “*escoar a água precipitada o mais rápido possível*”, designado na terminologia francesa por “*tout à l’égout*”. Este princípio foi sendo abandonado nos países desenvolvidos a partir do início da década de 1970.

A consequência imediata baseada neste conceito resulta no acréscimo dos caudais de ponta e das inundações a jusante por insuficiência da rede de drenagem, na medida em que acelera o encaminhamento das águas para os vales e aumenta, consideravelmente, o volume a escoar pelos coletores devido à diminuição da capacidade de infiltração da água resultante da precipitação.

A tendência natural da urbanização e, conseqüentemente, da drenagem urbana é a de ocorrer no sentido de jusante (foz) para montante (nascente), dadas as características do relevo e as práticas habituais de implantação urbana.

Geralmente, quando um loteamento é projetado, os serviços técnicos-municipais costumam exigir apenas que o sistema de drenagem pluvial seja eficiente no sentido de escoar a água que se precipita no próprio loteamento.

A combinação do impacto de diferentes loteamentos e ocupações do solo produz, muitas vezes, o aumento da frequência de cheias a jusante. Esse processo ocorre por sobrecarga da drenagem secundária (dos coletores) sobre a drenagem primária (rios e canais) que drena as áreas urbanas. As áreas mais afetadas, devido à construção de novas habitações a montante são, normalmente, as áreas mais antigas localizadas a jusante. As conseqüências dessa falta de planejamento e regulamentação são sentidas em muitas cidades.

A canalização dos pontos críticos acaba apenas por transferir a inundação de um lugar para outro da bacia. Esse processo, em geral, ocorre como é apresentado na figura 11:

Fase 1: A bacia começa a ser urbanizada de forma distribuída, com maior adensamento a jusante, aparecendo no leito natural, os locais de inundação devido ao estrangulamento ao longo do curso do rio principal.

Fase 2: as primeiras canalizações são efetuadas a jusante, com base na urbanização atual; com isso, o hidrograma a jusante aumenta, mas é ainda contido pelas áreas que inundam a montante, que fazem o efeito de um reservatório de amortecimento de enchentes.

Fase 3: com o maior adensamento urbano, a imposição dos moradores de montante faz com que as autarquias prossigam o procedimento de canalização para montante. Quando o processo se conclui, ou mesmo antes, as inundações retornam a jusante.

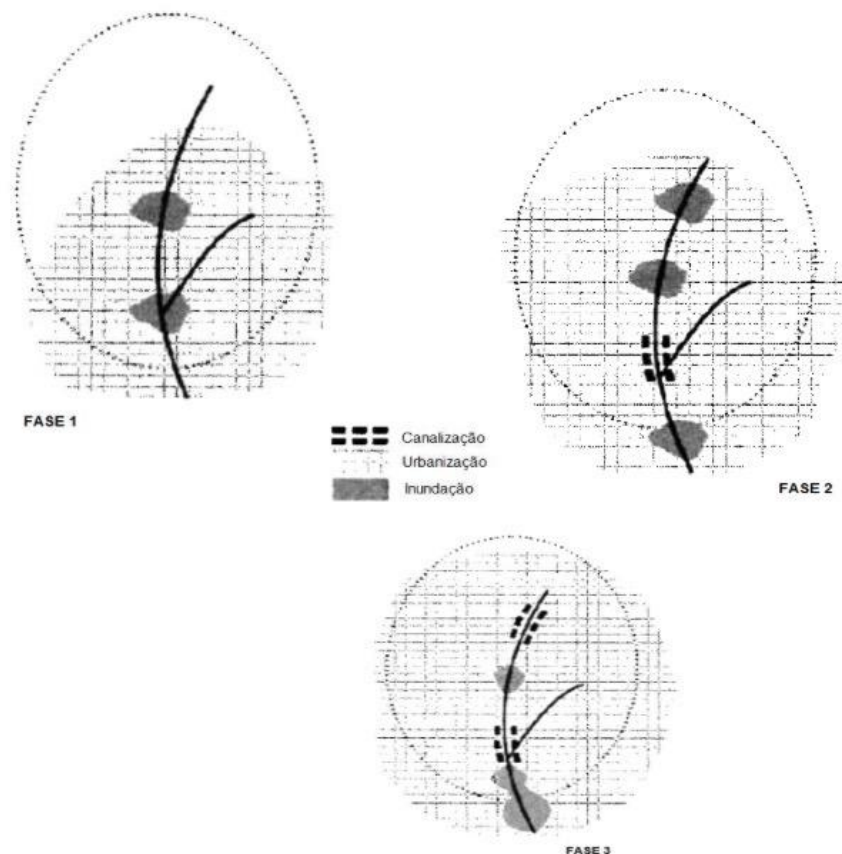


Figura 11 - Fases do desenvolvimento da drenagem urbana

Fonte: Tucci, 2003

Water Sensitive Urban Design (WSUD) e Low Impact Development (LID) são duas denominações diferentes para expressar o mesmo conceito sendo que, a primeira é usada principalmente na Austrália e a segunda nos Estados Unidos da América (Tucci, 2005). O WSUD representa o planejamento integrado de todo o ciclo urbano da água, incluindo o abastecimento de água, gestão de águas residuais, pluviais e subterrâneas, planejamento urbano e proteção ambiental (JSCWSC, 2009). Através do WSUD procura-se reduzir a extensão de superfícies impermeáveis, promover a acumulação temporária das águas e o

seu reaproveitamento o mais próximo possível da fonte, minimizando assim os impactos negativos do desenvolvimento urbano. Tem como objetivos (Victorian Stormwater Committee, 1999):

- Reduzir tanto os picos como o volume de escoamento superficial;
Minimizar o transporte de poluição das zonas urbanas para o meio hídrico recetor;
- Proteger os sistemas naturais;
- Recolher as águas pluviais de forma a substituir a água da rede em aplicações que não exijam níveis de qualidade elevados;

As técnicas de WSUD podem ser divididas em dois grandes grupos:

- Melhores Práticas de Gestão (Best Management Practices - BMPs):
 - ✓ BMP Estruturais – abrange sistemas projetados e constituídos;
 - ✓ BMP Não Estruturais – abrange práticas institucionais e de prevenção da poluição (USEPA, 1999).
- Melhores Práticas de Planeamento (Best Planning Practices - BPPs) – refere-se à avaliação e planeamento para que possam ser atingidos os objectivos propostos (McAlister, 2007).

2.2.4. Medidas estruturais

As cheias são passíveis de ser mitigadas, através de medidas estruturais que visam a alteração da própria rede hidrográfica com recurso a obras de engenharia de forma a ser possível controlar a capacidade de transporte e escoamento em situações extremas como por exemplo a construção de barragens, diques, açudes e a correção do traçado.

A implementação das medidas estruturais influencia os volumes dos detritos, os sedimentos e poluentes transportados pela água durante a ocorrência de cheias e modificam o volume da cheia, o seu nível máximo, o tempo de subida da mesma e a sua duração total,

a extensão da zona inundada e a velocidade e a profundidade da inundação (Rocha, sem data).

2.2.4.1. Barragens e açudes

As barragens são obras de engenharia construídas em todo o mundo, há mais de 6 mil anos. De facto, as medidas estruturais sempre foram consideradas as melhores medidas a tomar para a resolução de grande parte dos problemas de inundação (Rocha, s.d.).

É verdade que as barragens e açudes podem garantir a regularização de uma cheia de média dimensão, contudo, também pode gerar uma falsa sensação de segurança, já que pode conduzir à ocupação de zonas de risco a jusante, que por sua vez, pode aumentar os prejuízos no caso de ocorrência de uma cheia de grande dimensão ou então, no caso de falhas ao nível do seu funcionamento.

O sistema fluvial tem diferentes comportamentos perante uma determinada intervenção, como é o caso da colocação de árvores para reduzir a erosão do leito, conforme ilustra a figura 12. A construção de um dique irá provocar erosão imediatamente a jusante e para minimizar esse efeito é colocada vegetação para fixação do solo.

Existe outro procedimento, mais utilizado, que consiste na colocação de dissipadores de energia a jusante, o que nalguns casos diz respeito à colocação de blocos de pedra de grande dimensão para reduzir a velocidade da água a jusante e, conseqüentemente, a erosão do leito do rio.

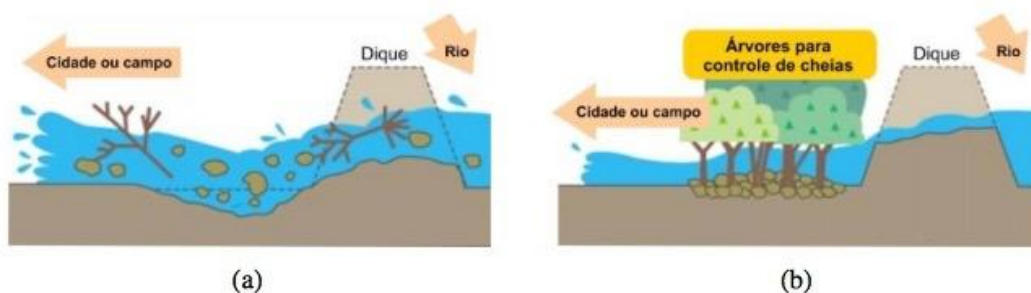


Figura 12 - Comportamento do sistema fluvial sem (a) e com (b) cobertura vegetal.

Fonte: Barbosa, 2006

Como vantagens inerentes à construção de barragens, podem citar-se as seguintes:

- Criação de postos de trabalho durante a fase de construção da obra;
- Regularização dos caudais de cheia e de estiagem;
- Reserva de água para consumo humano, agropecuária e combate a incêndios;
- Produção de energia hidroelétrica e aproveitamento de outras fontes de energia renováveis;
- Navegação fluvial, desportos náuticos e outros fins.

Embora sejam reconhecidas variadas vantagens a nível económico e social das quais algumas foram enumeradas, importa ter presente que um empreendimento desta dimensão também acarreta algumas desvantagens:

- Interferem com os ecossistemas e provocam alterações profundas na fauna e flora circundante;
- Provocam alterações geomorfológicas em consequência da alteração da dinâmica fluvial;
- Afetam os regimes hidrológicos de superfície e subterrâneo;
- Contribuem para a interrupção do trânsito de sedimentos nos cursos de água.
- Inundações provocadas pelas albufeiras e instabilidade das encostas marginais da albufeira.

2.2.4.2. Diques

Os diques são constituídos por muros laterais formados por terra ou cimento, inclinados ou retos, construídos a uma certa distância das margens, para proteger as áreas ribeirinhas contra inundações. É importante referir que se deve evitar a construção de diques com grandes alturas pois existe sempre a possibilidade de rotura causada por uma inundação maior que a projetada aquando o seu projeto. Conclui-se então que a maior dificuldade no planeamento de um dique é a definição correta da inundação máxima provável pois existirá sempre um risco de rutura (Correa et al, 2013). A figura 13 mostra o dique de defesa construído no Rio Liz, na cidade de Leiria.



Figura 13 – Diques de defesa do Rio Liz na cidade de Leiria

Fonte: [http:// bit.ly/diquesRioLis](http://bit.ly/diquesRioLis)

Esta medida estrutural é considerada a mais antiga. Só no rio Tejo existem mais de 100 km de diques, mas estas estruturas podem ser encontradas em todos os rios desde os maiores aos mais pequenos para defender os terrenos agrícolas de possíveis inundações. Em zonas residenciais já é exigido um projeto mais cuidado para impedir riscos elevados criados pela rotura dos diques.

2.2.4.3. Sistemas públicos de drenagem urbana

Os sistemas públicos de drenagem urbana têm como função impedir/evitar a acumulação das águas pluviais nos pontos de cota mais baixos, que advêm da impermeabilização dos solos, possibilitando o seu encaminhamento para o sistema fluvial (Figura 14).

Os sistemas de drenagem são dimensionados para períodos de retorno geralmente inferiores a 10 anos, o que implica um risco associado que se traduz na probabilidade de ocorrência de inundações ao longo dos arruamentos devido à falta de capacidade do sistema.



Figura 14 - Sistema de drenagem urbana

Fonte: Google, 2017.

A consequência directa dos projetos com base neste conceito é o aumento das inundações a jusante. Na medida em que a precipitação ocorre, e a água não é infiltrada, gera-se um aumento de caudal, que escoar pela rede de drenagem de águas pluviais. Para transportar todo esse caudal, é essencial ampliar a capacidade dos coletores ao longo de todo o seu trajeto dentro da cidade até um local onde o seu efeito de ampliação não alcance a população. A irracionalidade destes projetos leva a custos muito elevados, sendo a utilização de bacias de retenção, uma das possíveis soluções para evitar a substituição da rede coletora a jusante (Matias, 2006).

2.2.4.4. Outras medidas estruturais

Não foram incluída nesta secção da dissertação todas as medidas estruturais, apenas aquelas que poderão de alguma forma ter maior impacto na redução dos volumes de escorrências e dos picos de cheia.

Existem mais Medidas Estruturais, algumas delas extremamente complexas e patenteadas, com vista exclusivamente à melhoria da qualidade das águas pluviais. Estas apresentam as mais variadas formas de atuação, tentando solucionar problemas de

naturezas diferentes, desde a retenção e eliminação de resíduos de grande porte (p.e. RSU), à remoção de poluentes em partículas ou dissolvidos (p.e metais e nutrientes).

São consideradas essencialmente preventivas, e pela maneira como são tratados os dados, a longo prazo, são consideradas medidas não estruturais. Referem-se ao planeamento e controle de uso dos solos, para que sejam atribuídas áreas para uso adequado, tendo em atenção especial as zonas de implantação urbana. Estas não envolvem instalações como as Medidas Estruturais, em vez disso levam o público em geral e os intervenientes na gestão de águas pluviais em particular a alterar o seu comportamento.

2.2.5. Medidas não estruturais

Existem as mais variadas formas de se poder tentar minimizar os efeitos das inundações em zonas urbanas, sendo que podem ser tomadas medidas não estruturais.

A definição de bacia hidrográfica urbana é a primeira ação para um planeamento em termos de medidas não estruturais. Esta definição é baseada na subdivisão de rios que correm para um sistema maior (lago, rio, reservatório ou estuário), para além dos limites da cidade (Tucci, 2007).

Estas medidas, podem ser implementadas para mitigar inundações urbanas devido a extravasamento de cursos de água através da detenção ou desvio do escoamento, como por exemplo: pavimentos permeáveis; bacias de retenção; trincheiras de infiltração; bacias de infiltração; poços absorventes, faixas filtrantes *swales*, entre outras que serão desenvolvidas nesta secção (Tingsanchali, 2011).

2.2.5.1. Pavimentos permeáveis

A distinção entre pavimentos permeáveis e pavimentos tradicionais é a de que os primeiros contêm uma superfície porosa (Figura 15), que armazena o escoamento antes deste se infiltrar no subsolo. Este pavimento pode ser asfalto poroso ou betão permeável

mantendo assim a sua aparência semelhante ao tradicional, ou como alternativa, caso seja possível, por um pavimento relvado (SMRC, sem data).

Segundo Matos (2003) pode existir uma diferenciação entre pavimentos porosos e pavimentos reservatório, considerando que os primeiros apenas incluem a superfície porosa, sem o armazenamento, enquanto os segundos incluem também o armazenamento, podendo a superfície de desgaste (a primeira camada) ser permeável ou não. A principal vantagem que este tipo de pavimentos apresenta é a redução da área impermeável e o aumento do espaço de armazenamento, permitindo assim reduzir os volumes e picos de caudais de águas pluviais. Acresce que, como a água deixa de estar à superfície, a segurança nos arruamentos é também melhorada, já que reduz o risco de projeção de água e aquaplanagem, permitindo igualmente uma maior visibilidade das marcas do pavimento. Além disso, devido à sua constituição, permite realizar a filtração e adsorção de uma série de poluentes perto da sua origem (Victorian Stormwater Committee, 1999).

Devido à sua natureza porosa, este tipo de pavimentos está sujeito a efeitos de colmatação por matéria fina, necessitando por isso de manutenção mais exigente, nomeadamente ao nível da frequência de limpeza, o que poderá aumentar o seu custo de manutenção (Matos, 2003). Por este motivo a sua aplicação é particularmente benéfica em locais que não estejam sujeitos a grandes níveis de tráfego, como zonas residenciais e parques de estacionamento (Victorian Stormwater Committee, 1999) onde o transporte de sedimentos também é menor.

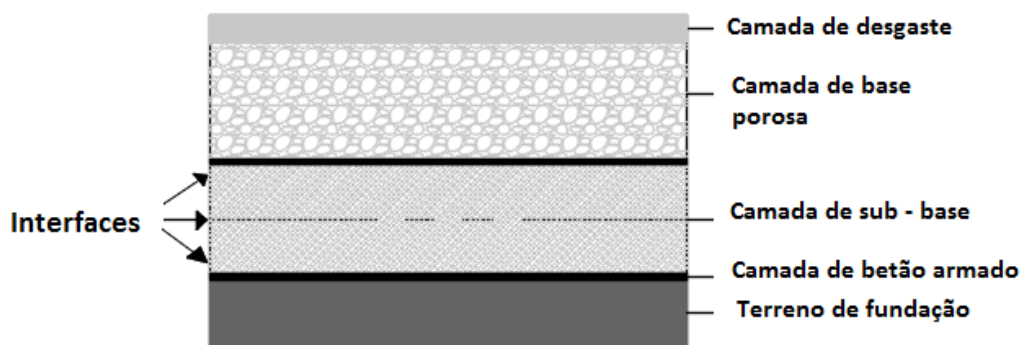


Figura 15 - Seção transversal de um pavimento poroso com armazenamento

Fonte: Matos, 2003 (adotado)

2.2.5.2. Bacias de retenção

O escoamento de águas da chuva, principalmente em zonas densamente urbanizadas, é frequentemente sujeito a longas travessias, através de obras artificiais, como coletores subterrâneos. O efeito cumulativo a que estão sujeitos faz com que as suas dimensões sejam elevadas, acarretando assim um investimento avultado. A solução para este tipo de problema passa muitas vezes pela recolha dos caudais que ultrapassem um determinado valor definido e o seu encaminhamento para lagoas ou bacias de retenção desenhadas para o efeito, que permitam o armazenamento temporário das águas da chuva (Matos, 2003).

As bacias de retenção podem ser construídas a céu aberto ou enterradas, embora as bacias de retenção enterradas sejam mais indicadas para as zonas urbanas, onde a disponibilidade ou o custo do terreno são limitações ao projeto, porque de outra forma a sua aplicação a céu aberto é usualmente mais barata (Matos, 2003). Neste tipo de bacias de retenção (enterradas) é praticamente indispensável o recurso a meios de bombagem para proceder ao esvaziamento das bacias no seguimento de um período de precipitação (Matias, 2006).

As bacias de retenção a céu aberto são classificadas em bacias a seco e em bacias com nível de água permanente.

- As bacias a seco são construídas para que na maior parte do tempo estejam, como a sua designação indica, secas, acumulando água por um período curto de tempo (no máximo alguns dias) (Matias, 2006) apenas durante e após episódios de pluviosidade mais ou menos significativos (Matos, 2003) (Figura 16). Se o nível freático máximo se encontrar acima da cota mínima da bacia existe a hipótese de formação de uma zona pantanosa com os problemas típicos associados a este tipo de zonas (Matias, 2006), em particular ao nível da saúde pública.
- As bacias com nível de água permanente são concebidas para manter uma porção de água de forma contínua (Figura 17). Por este motivo, ao contrário do que acontece nas bacias a seco é suposto que o nível freático se mantenha a uma cota superior à da bacia de forma a assegurar a sua alimentação (Matias, 2006). Esta solução envolve mais custos não só de investimento, mas também de manutenção.

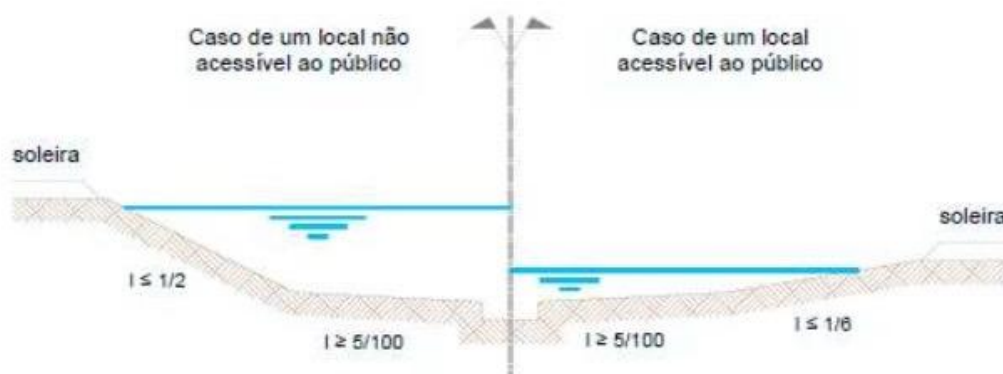


Figura 16 - Perfil transversal de uma bacia de retenção a seco

Fonte: Matias, 2006

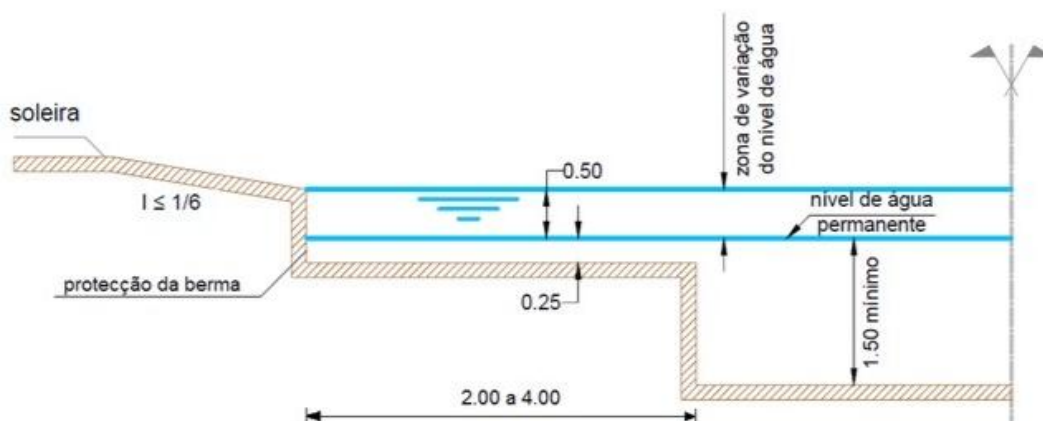


Figura 17 - Perfil transversal de uma bacia de retenção com nível de água permanente

Fonte: Modificado de Matias, 2006 com as especificações de Matos, 2003

É recomendável a conceção de várias estruturas de armazenamento de pequena dimensão distribuídas pela área de drenagem em vez da construção de estruturas de grandes dimensões em baixo número (Victorian Stormwater Committee, 1999), para que as bacias de retenção não funcionem de forma singular. A disposição então pode ser:

- Em série – a bacia é colocada no alinhamento do coletor/canal, de modo a que toda a água daí proveniente afluja à bacia (Matias, 2006). Estas serão normalmente de nível de água permanente e de maiores dimensões (Figura 18).

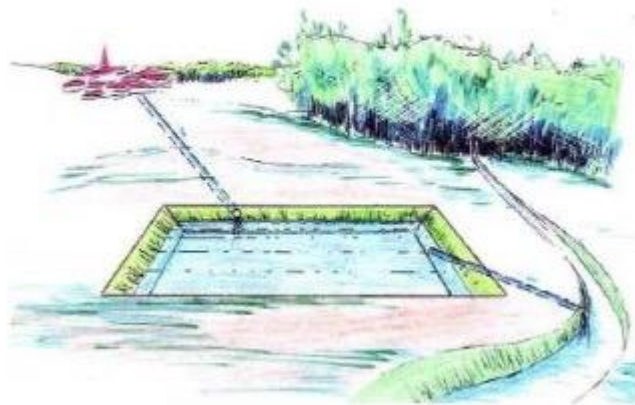


Figura 18 - Esquema de bacia em série

Fonte: Dohy, 1997 em Matias, 2006

- Em paralelo – a bacia é colocada lateralmente ao coletor/canal, para que apenas o caudal em excesso seja direcionado e armazenado (Matias, 2006). Frequentemente estas são bacias a seco (Figura 19).

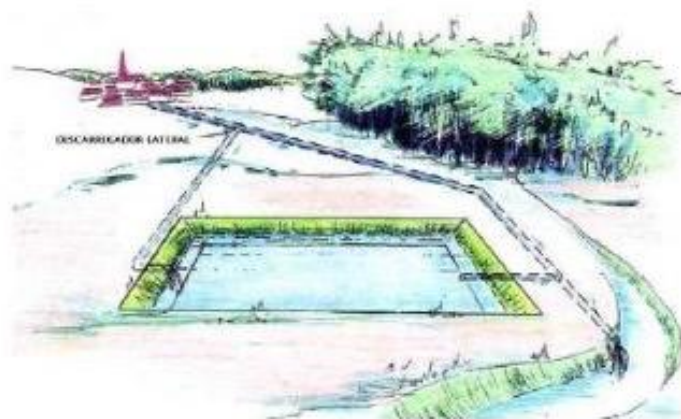


Figura 19 - Esquema de bacia em paralelo

Fonte: Dohy, 1997 em Matias, 2006

As bacias de retenção além de reduzirem os riscos de inundação são:

- Criação de reservas de água que podem ser usadas para irrigação, limpeza de ruas ou extinção de incêndios;

- Melhorar a qualidade da água pluvial por sedimentação (redução dos sólidos em suspensão) e por degradação (diminuição da concentração de matéria orgânica).

2.2.5.3. Trincheiras de infiltração

Podemos definir trincheira de infiltração (Figura 20) como um dispositivo de fácil execução, escavado e pouco profundo (normalmente tem profundidade inferior a 1,0 metro), enchido com rocha ou gravilha, para onde são drenadas as águas pluviais, para facilitar a sua infiltração no solo (Victorian Stormwater Committee, 1999; Matos, 2003). De forma a impedir a deslocação do solo para o enchimento, na periferia da secção da trincheira é normal colocar uma tela de geotêxtil (Victorian Stormwater Committee, 1999). A camada superior geralmente é coberta com terra e vegetação ou, caso a água esteja pouco poluída, a cobertura pode mesmo ser completamente eliminada (Matos, 2003). A alimentação da trincheira pode ser feita diretamente através das escorrências superficiais ou então a partir da rede de coletores de drenagem, funcionando também como mecanismo de retenção e armazenamento (Matos, 2003).

O uso de trincheiras de infiltração apresenta um ponto forte na sua baixa necessidade de espaço, podendo ser aplicado em locais com disponibilidades limitadas, fazendo desta prática uma ótima solução para, por exemplo, os separadores centrais das autoestradas (Swartz e Belan, 2010). Refira-se ainda que podem ser facilmente integradas na mancha urbana, permitindo valorizar o local.

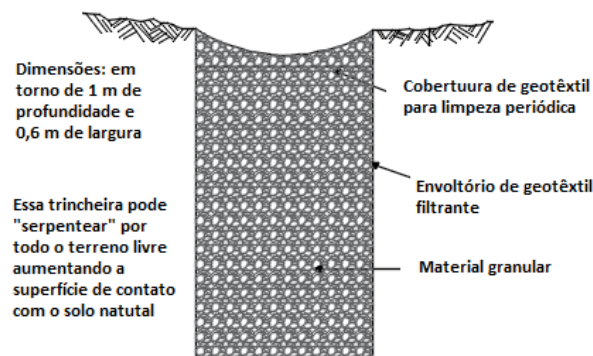


Figura 20 - Corte transversal de uma trincheira de infiltração

Fonte: <http://bit.ly/cortetransversaltrincheira>

Estes dispositivos permitem também e remover poluentes dissolvidos por processos químicos e biológicos. Uma das principais vantagens da sua utilização está no seu custo, que é relativamente baixo comparado com outras alternativas (Matos, 2003; Victorian Stormwater Committee, 1999). No entanto, os custos de manutenção podem ser elevados pois necessita de manutenção regular devido à possibilidade dos poluentes e sedimentos colmatarem os espaços vazios, principalmente quando em contacto com solos finos (Victorian Stormwater Committee, 1999). Todavia, é importante ter em consideração que se a presença de poluentes nas águas pluviais for elevada, existe o risco de contaminação das massas de águas subterrâneas (Matos, 2003).

2.2.5.4. Bacias de infiltração

Entende-se por bacias de infiltração, bacias escavadas e que permitem a infiltração e o armazenamento temporário das águas da chuva, de forma a remover alguns dos poluentes através dos processos de filtração e adsorção (Figura 21). Permitem também reduzir os volumes e velocidades do escoamento superficial, necessitando usualmente de grandes áreas para ser eficiente (Victorian Stormwater Committee, 1999).

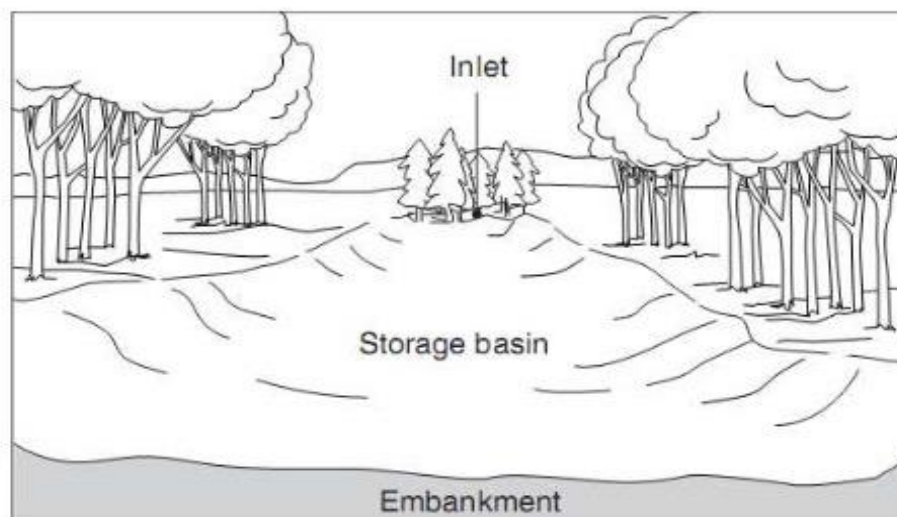


Figura 21 - Bacia de infiltração

Fonte: Victorian Stormwater Committee, 1999

2.2.5.5. Poços absorventes

Os poços absorventes são infraestruturas cuja profundidade pode ter dezenas de metros e que permitem a infiltração direta das águas da chuva no solo. São vantajosos nas zonas urbanas, em locais onde a camada superficial do solo é impermeável, desde que estas contenham uma boa capacidade de infiltração numa camada mais profunda do solo. Dependendo da posição da base do poço, relativamente ao nível freático, distinguem-se dois tipos de poços absorventes (Matos, 2003):

- Poços de infiltração: caso a cota do nível da base do poço esteja acima do nível freático e a água infiltra-se por percolação para a camada não saturada do solo (Figura 22).

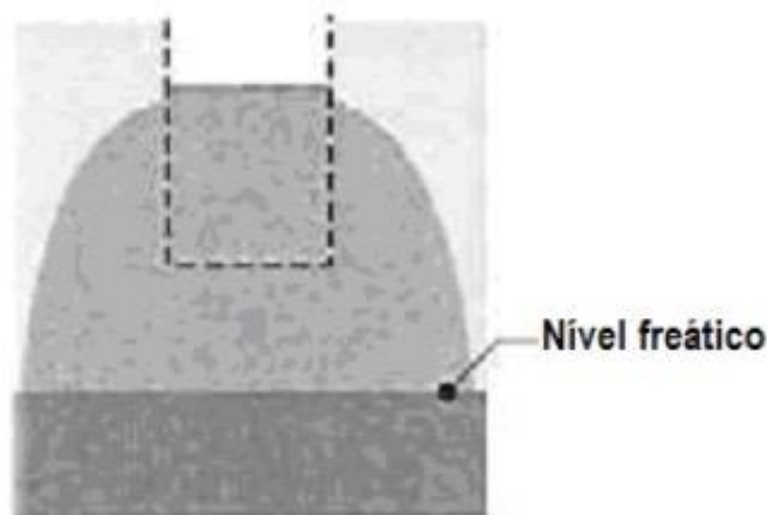


Figura 22 - Esquema de um poço de infiltração

Fonte: Azzout et al. 1994 em Matos, 2003

- Poços de injeção: se a cota do nível da base do poço estiver abaixo do nível freático, a água recolhida é direcionada diretamente para o aquífero (Figura 23).

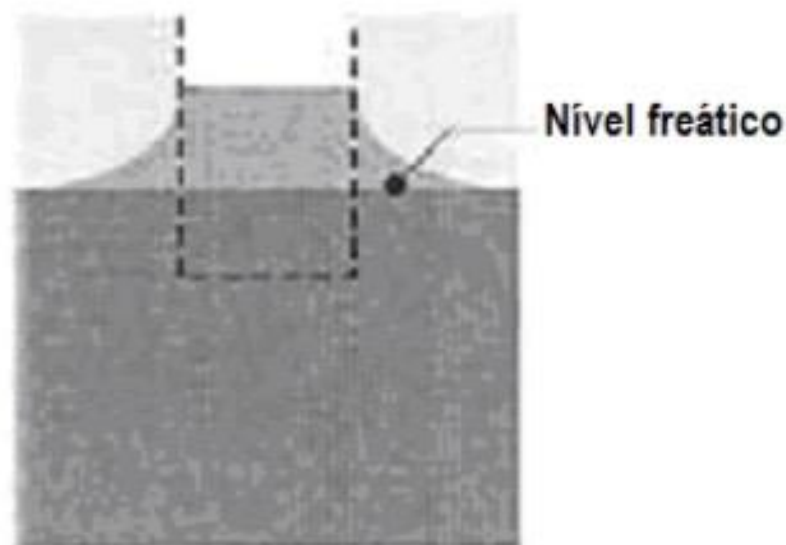


Figura 23 - Esquema de um poço de injeção

Fonte: Azzout et al. 1994 em Matos, 2003

Como benefícios destas infraestruturas, atendendo à sua disposição, estes dispositivos permitem economizar na utilização de espaço, sendo facilmente integrados ou dissimulados no tecido urbano. A sua constituição pode ir desde um simples buraco até uma estrutura complexa, conforme o local em que é aplicado. Por vezes é também associada a outras técnicas de controlo de caudal por filtração (trincheiras e bacias de infiltração) que atuam principalmente nas camadas superiores do solo, potenciando desta forma a infiltração nas camadas mais profundas do solo (Matos, 2003).

A grande desvantagem dos poços absorventes encontra-se nos reduzidos volumes de armazenamento, na necessidade de manutenção regular para evitar a colmatação dos poros e caso as águas apresentem elevados índices de poluição, existir ainda o risco de contaminação das águas subterrâneas (Matos, 2003).

2.2.5.6. Faixas filtrantes

As faixas filtrantes são bandas de vegetação permanente, aplicadas num terreno inclinado. A sua principal função está associada à qualidade da água, sendo por isso frequentemente colocadas entre uma superfície impermeável e uma outra qualquer medida

não estrutural que permita a infiltração das águas da chuva no solo (Swartz e Belan, 2010). As faixas filtrantes permitem também reduzir o volume de pequenas chuvadas desde que os solos sejam suficientemente permeáveis e o tempo de contacto seja o suficiente para que possa ocorrer infiltração no solo. Servem essencialmente para reter sedimentos ou outros materiais que posteriormente poderiam colmatar outro tipo de mecanismos a jusante conseguindo-o recorrendo à filtração e infiltração potenciada pela vegetação (Figura 24).

A sua eficiência está dependente da densidade e tempo de contacto com a vegetação (Swartz e Belan, 2010). A capacidade de retenção de sedimentos, aliada à melhoria estética que fornece, torna as faixas filtrantes adequadas para estradas e parques de estacionamento.

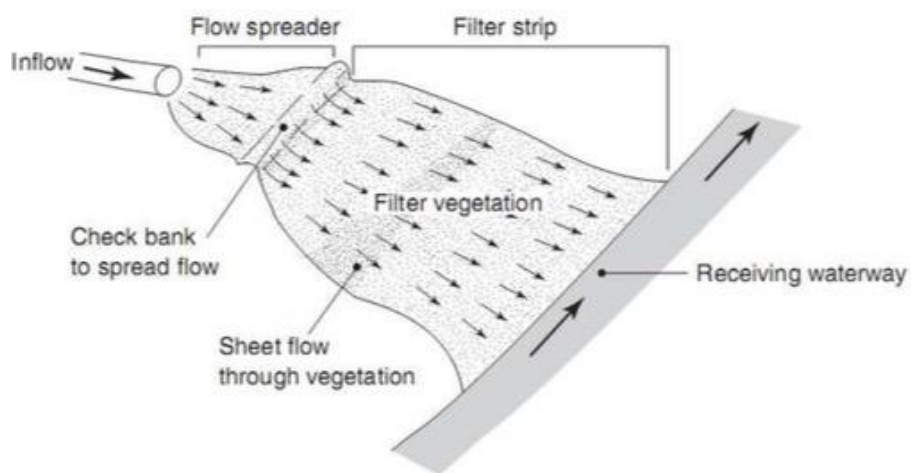


Figura 24 - Esquema de uma faixa filtrante

Fonte: Swartz e Belan, 2010

2.2.5.7. “Swales” ou valas revestidas com coberto vegetal

São medidas facilmente executáveis que requerem um baixo custo de instalação e manutenção e são compostos por canais a céu aberto, de pequena profundidade e secção variável, e conforme o próprio nome indica, revestidas com vegetação (normalmente relva). São usados para recolher as escorrências superficiais e fazer o seu transporte lentamente, propiciando assim o efeito de armazenamento, e caso o solo proporcione as

condições necessárias, a sua infiltração (Matos, 2003). Podem funcionar como alternativa a um sistema de drenagem tradicional em locais onde a formação de escorrências seja relativamente baixa (Victorian Stormwater Committee, 1999) e têm funcionamento hidráulico, privilegiando a filtração ou a retenção (com libertação subsequente).

2.2.5.8. Sistemas de bio-retenção

Também apelidados de “jardins de chuva” (*rain gardens*), são bacias pouco profundas e de pequenas dimensões com a finalidade de captar e filtrar quantidades moderadas de escorrências, usando para isso o solo e a vegetação (Swartz e Belan, 2010; McCarthy, 2008). Na sua forma mais simples são apenas pequenos jardins, a uma cota ligeiramente inferior ao resto do solo e densamente preenchidos com várias plantas. Também pode ter camadas de areia e gravilha para aumentar os seus efeitos de infiltração (Watershed Management Services, sem data).

Pode ainda incluir uma tubagem enterrada para receber e transportar a água acumulada para uma zona de descarga (McCarthy, 2008). Este tipo de prática está largamente difundido em várias comunidades nos Estados Unidos da América, apresentando grande aderência das populações. A grande vantagem está no segmento residencial, já que a componente estética que este tipo de prática oferece e os baixos custos associados, faz com que facilmente seja incutida aos habitantes (Swartz e Belan, 2010; Dempsey, 2006; Bannerman e Considine, 2003).



Figura 25 - Sistema de Bio-Retenção

Fonte: Annerman e Considine, 2003

Os sistemas de bio-retenção são direcionados para o tratamento da qualidade das águas da chuva, no entanto, segundo Dempsey (2006) também podem reduzir significativamente o volume das escoências (Figura 25).

2.2.5.9. Telhados com vegetação

Como o próprio nome indica são telhados que contêm vegetação de forma a reduzir a impermeabilidade habitual que causam, absorvendo as águas da chuva que aí precipitam (Swartz e Belan, 2010).

Este tipo de telhado melhora a qualidade das águas pluviais e permite a redução do volume e pico máximo dos escoamentos. Apesar de serem mais frequentes em telhados rasos, com as devidas alterações podem também ser aplicados em telhados com declives (Swartz e Belan, 2010).

2.2.5.10. Caldeiras

As caldeiras consistem em caixas de betão enchidas com um solo poroso, onde são plantadas árvores ou arbustos, usadas para interceptar e filtrar o escoamento antes de este entrar no colector (Swartz e Belan, 2010; McCarthy, 2008).

As caldeiras geralmente são colocadas a montante de uma sarjeta ou sumidouro (Figura 26). Isto ocorre para assegurar a ligação aos colectores e para que em caso de transbordamento o excesso de água possa ser captado imediatamente pela infraestrutura tradicional existente a jusante (Swartz e Belan, 2010).



Figura 26 - Caldeira com sarjeta

Fonte: Swartz e Belan, 2010

2.2.5.11. Cisternas

As cisternas são na sua essência recipientes, constituídos pelos mais diversos materiais, usadas para recolher e acumular as águas da chuva, para utilização posterior (Figura 27). Estes são assim, uma fonte de água pouco dispendiosa que pode ser facilmente utilizada para fins menos nobres. O seu contributo singular na redução do volume de água que aflui ao sistema de drenagem é bastante reduzido, no entanto se o uso for disseminado, pode ter efeitos notáveis em alguns pontos específicos.

Normalmente a colecta de água é feita a partir dos telhados dos edifícios, porque de forma geral contém menores quantidades de poluentes que a maioria das outras superfícies (Swartz e Belan, 2010).



Figura 27 - Exemplo de uma cisterna

Fonte: Swartz e Belan, 2010

2.2.5.12. Medidas de Planeamento Urbano

As medidas de planeamento urbano são a principal forma para evitar inundações urbanas. Isto, pois a longo prazo podem traduzir-se em mais efetivas e mais económicas soluções. O planeamento antecipado, o estudo da área em questão e da envolvente do curso de água tendo em conta também os cenários de urbanização, podem delinear-se planos, que incluem zonas com a mínima probabilidade de inundação. Os planos de ação em caso de inundação devem ser comunicados previamente, em especial em zonas mais sensíveis (Tucci,2007).

Medidas de planeamento urbano são cada vez mais reconhecidas como centrais para a prevenção de desastre de inundação urbana porque podem levar a soluções mais eficazes e economicamente mais eficientes a longo prazo do que as soluções tradicionais do desenvolvimento de áreas expostas e posterior proteção das mesmas através da construção de diques (Moll,2005).

Planos de Evacuação:

Através da combinação de modelos de inundação com cenários de urbanização em cenários modelando a delimitação de zonas que definem a probabilidade de inundação e o respetivo tipo de uso de solo para minimizar os danos de inundação. Outra abordagem é a redução da vulnerabilidade física de habitantes através do desenvolvimento de planos de evacuação manobráveis, em cooperação estreita com as pessoas afetadas. Provisão de abrigos de evacuação, fornecimento de água fresca, alimentos, medicação, etc., deve ser considerada nos planos de evacuação.

Construção de códigos

A construção de códigos tem um papel muito importante na diminuição da vulnerabilidade de habitações e infraestruturas. Baseado na delimitação de zonas de risco, a construção de códigos fornece regulamentação com referência ao tipo de materiais de construção, características estruturais da construção e, em alguns casos, também da

ocupação e do uso dos edifícios. Os sistemas de alerta de inundações devem ser comunicados às comunidades em risco, convertendo a informação da previsão em prática e disseminando os avisos pelas populações. O sucesso deste sistema está intimamente ligado ao conhecimento da população dos riscos de inundação e a sua familiaridade com a resposta de emergência às inundações que se avizinham (Tingsanchali,2011).

Práticas educativas

A consciencialização da população e dos trabalhadores das indústrias pode servir como uma forma de redução da carga poluente a entrar em contacto com as águas pluviais (USEPA, 1999) fazendo com que as populações ganhem consciência das implicações das suas ações.

Exemplos de práticas deste tipo são as campanhas nos média ou os programas de treino realizados em empresas (Taylor e Wong, 2002).

Manutenção

Relacionado com a manutenção dos diversos componentes do sistema de drenagem de águas pluviais (como tubagens, sarjetas, bacias e outras estruturas), e de forma geral à manutenção de diversos componentes das zonas urbanas, (como arruamentos, vegetação e parques de estacionamento), pelo que a construção de planos de manutenção é essencial.

Entre estas práticas podem-se enumerar a limpeza de ruas, a desobstrução de sarjetas, a remoção de sedimentos das BMPs estruturais e a remoção de vegetação.

Controlo regulamentar

Elaboração de regulamentos e a obrigação de cumprimento dos mesmos; uso de licenças ambientais; elaboração de novas leis e realização de programas que minimizem as descargas para as águas pluviais.

2.2.6. Medidas de proteção individual

De acordo com a Associação Portuguesa de Segurança (APS), há medidas importantes que se podem tomar, individualmente, em caso de inundação, tais como (APS, 2017):

- Não deixar no exterior objetos que possam ser arrastados pela água e bloquear os sistemas de escoamento;
- Certificar que são colocados em lugar seguro e selado embalagens com produtos poluentes e tóxicos;
- Soltar os animais domésticos e deixar o gado num local seguro;
- Colocar em lugar seguro documentos e objetos pessoais considerados essenciais;
- Ter um estojo de emergência com primeiros socorros; rádio e lanterna; pilhas de reserva; agasalhos e medicamentos essenciais;
- Ter uma reserva de água potável e alimentos embalados ou enlatados;
- Arranjar um anteparo de metal ou madeira para as portas de casa que dão para o exterior;
- Definir um ponto de encontro em caso de separação de pessoas da família.

Também de acordo com a APS, são enumeradas algumas formas de agir em caso de inundação (APS, 2017):

- Dar apoio a crianças, idosos e deficientes;
- Seguir as indicações da Proteção Civil;
- Desligar a eletricidade e cortar a água e o gás;
- Só utilizar o telefone em caso de extrema urgência para não sobrecarregar as linhas;
- Não utilizar o carro pois pode ser arrastado para fora da estrada;
- Beber apenas água engarrafada;
- Não comer alimentos que tenham estado em contacto com a água da cheia.

2.3. Modelação Hidrológica

2.3.1. Contextualização

Um modelo hidrológico pode ser designado como uma interpretação matemática do escoamento de água, e seus constituintes, sobre uma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre. Há uma relação próxima entre as modelações hidrológica, química e ecológica, uma vez que esse mesmo escoamento será o transporte de todo e qualquer constituinte que exista, potencialmente, na bacia hidrográfica. A hidrologia também está intimamente relacionada com as condições climáticas, troposféricas e biosféricas, e, como tal, modelos hidrológicos, atmosféricos e de outra natureza deveriam estar conectados, sendo que, na prática, esta ligação se torna bastante trabalhosa, uma vez que os modelos atmosféricos trabalham com resoluções espaciais muito maiores que as utilizadas na modelação hidrológica (Maidment, 1993).

A bacia hidrográfica é o objeto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos, agrupando as áreas que captam e dirigem a água para uma rede de escoamento, composta por um ou mais canais, desaguando estes numa única secção terminal.

Para que melhor se compreendam os modelos hidrológicos, é essencial estudar as componentes envolvidas no ciclo hidrológico. Embora não se possa considerar um princípio ou um fim para o ciclo hidrológico, tomando a atmosfera como ponto de partida, verifica-se que nesta se acumula vapor de água que, em determinadas condições, origina precipitação: chuva, granizo, neve, orvalho e geada.

Uma fração da precipitação é interceptada pelas folhas das plantas e estruturas urbanizadas, sendo evaporada e retornando para a atmosfera. Outra fração é evaporada durante a queda, voltando também à atmosfera. A restante parte atinge a superfície da terra.

Uma parte da precipitação que atinge a superfície da terra fica retida nela, dando início à evaporação e ao escoamento superficial, na rede hidrográfica, de onde é também evaporada ou alcança o oceano que compõe a maior fonte de evaporação. Outra parte da precipitação que atinge a superfície dá origem à infiltração, humedecendo o solo que é

também fonte de evaporação, alimentando as plantas, através das quais volta à atmosfera por transpiração, ou alimentando os cursos de água ou diretamente os oceanos, de onde será evaporada, fechando-se o ciclo (Lencastre e Franco, 1984).

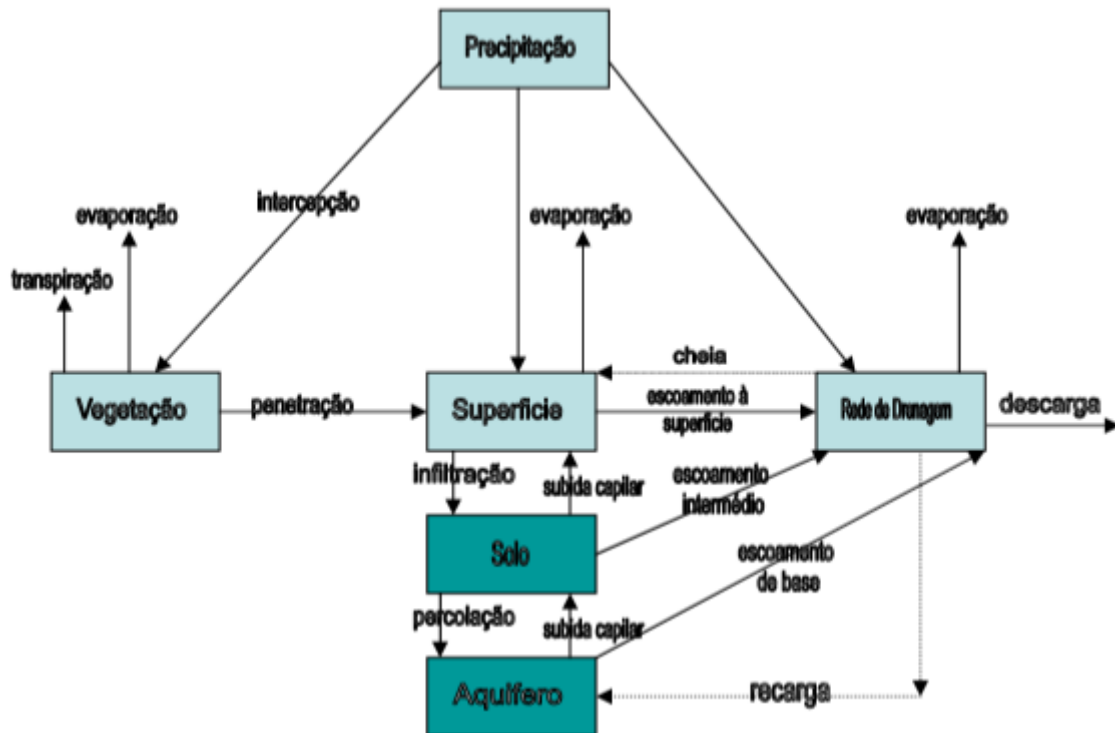


Figura 28 – Diagrama de fluxo numa bacia hidrográfica

Fonte: HEC, 2000 b

A hidrologia terrestre abrange assim o estudo da quantidade, distribuição e características das águas nas terras emersas, e das suas ligações com o meio ambiente sendo que a principal introdução de água no sistema é a precipitação (Figura 28).

2.3.2. Precipitação

De acordo com a tabela 4, com o movimento de massas de ar na vertical, podemos classificar a precipitação em 3 tipos (HRH – Precipitação, 2017):

- Precipitação convergente ou ciclónica: são chuvadas pouco intensas e de longa duração, relacionadas aos movimentos de massas de ar de regiões de

alta pressão para regiões de baixa pressão (ciclones). A precipitação frontal deriva da subida do ar quente sobre o ar frio na zona de contato entre duas massas de ar de particularidades distintas (temperatura e humidade diferentes).

- **Precipitação convectiva:** são chuvas de grande intensidade e curta duração, acompanhadas de trovoadas e vento. Acontece quando o ar em contato com a superfície aquece. O ar menos denso é obrigado a elevar-se na atmosfera, alcançará a sua temperatura de condensação com a consequente formação de nuvens.
- **Precipitação orográfica:** caracteriza-se por chuvadas irregulares, tanto em termos de intensidade como de localização, mas podem ser de longa duração. Acontece quando uma massa de ar impulsionada pelo vento depara com uma cadeia montanhosa que a obriga a ascender por deslizamento sobre as vertentes até arrefecer abaixo do seu ponto de saturação, originando as nuvens e futuramente dando origem à precipitação ou neve em vertentes montanhosas expostas ao vento.

Tabela 4 – Formas de precipitação

| Tipos de Precipitação | Intensidade (mm/h) | Diâmetro das gotas (mm) | Velocidade de queda correspondente ao diâmetro médio (m/s) |
|-----------------------|--------------------|-------------------------|--|
| Molinha | 0,25 | 0,2 | 0,2 |
| Chuva fraca | 1 - 5 | 0,45 | 2,0 |
| Chuva forte | 15 - 20 | 1,5 | 5,5 |
| Tempestade | > 100 | 3,0 | 8,0 |

Fonte: HRH – Precipitação, 2017

Equipamentos utilizados para registar os dados de precipitação

- **Distómetros:** estes aparelhos permitem controlar o número e o tamanho das gotas da chuva através de uma ótica e de um díodo a laser que gera um feixe

de luz infravermelho (Figura 29). Quando a precipitação interceta o feixe, o sinal do detetor é reduzido. A amplitude de redução está associada ao tamanho das partículas e a duração da redução está relacionada com a velocidade de queda (HRH – Precipitação, 2017).

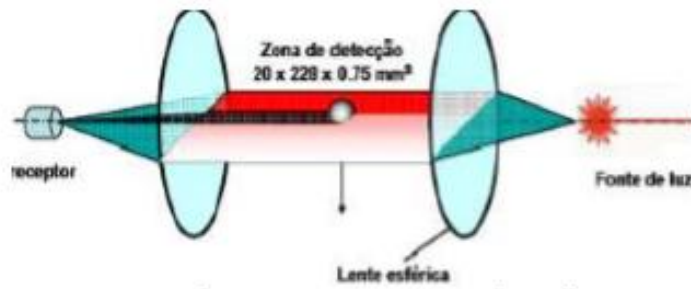


Figura 29 – Distômetro

- **Rede udométrica:** estes aparelhos são compostos por uma campânula de dimensões normalizadas que acolhe a água de precipitação que escoar para um recipiente onde a quantidade é medida em intervalos de tempo certos (udômetros - usualmente com período de leitura de 24 horas) ou registado em contínuo (udógrafos) (Figura 30) (HRH – Precipitação, 2017).

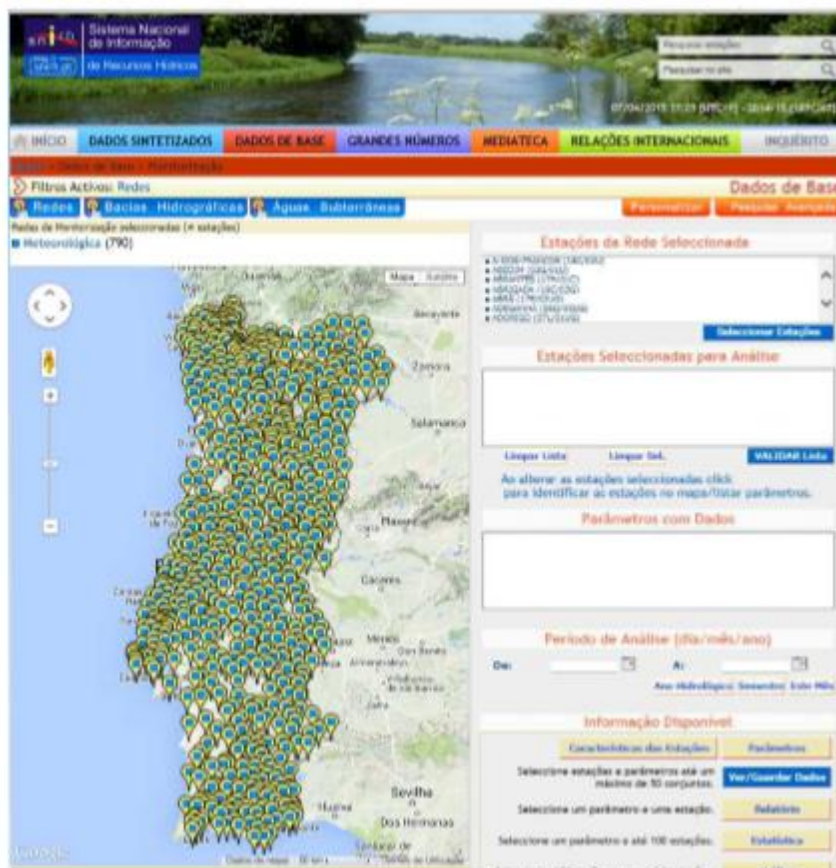


Figura 30 – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

Fonte: <http://www.snirh.pt/>

- **Udómetros ou Pluviómetros** são aparelhos de medição da altura de precipitação não registadores. São receptores normalizados e calibrados que colhem a chuva caída diretamente sobre eles (totalizadores). A medição do “equivalente em água” da precipitação de neve faz-se com nevómetros (HRH – Precipitação, 2017).
- **Udógrafos ou Pluviógrafos:** são aparelhos cujos recetores estão ligados a sistemas de registo contínuo. Possibilitam um melhor conhecimento da evolução da intensidade e da duração da precipitação (HRH – Precipitação, 2017).

No cálculo dos dados das precipitações máximas, torna-se necessário o conhecimento da relação entre o conhecimento das características fundamentais da precipitação: intensidade, duração e frequência.

Cálculo da intensidade:

A intensidade média de uma precipitação, i , (5) num intervalo de tempo, Δt , é definida pela seguinte razão:

$$i = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (5)$$

com: Δp (mm) - altura da precipitação ocorrida no intervalo de tempo Δt .

Relação intensidade – duração:

Quanto maior é a intensidade de precipitação, menor é a sua duração.

Relação intensidade – frequência

É importante o conhecimento da intensidade listada com determinada duração observada no passado, mas também interessa prever com base nos dados observados e com ajuda dos princípios das probabilidades, quais as máximas precipitações que futuramente irão ocorrer em certa localidade com determinada frequência.

Partimos de uma base de dados das precipitações mais elevadas, durante um certo período e por aplicação da estatística tentar-se-á prever a precipitação máxima esperada.

Relação intensidade – duração – frequência

A intensidade depende do período de retorno (6) (este depende da frequência da precipitação) e da duração da precipitação.

$$I = f(T, t) \quad (6)$$

Para um determinado período de retorno T , a intensidade de precipitação de duração t pode ser apresentada por uma curva exponencial ou hiperbólica.

O período de retorno está relacionado com os parâmetros **a** e **b** que por sua vez dependem da localização da bacia em estudo e, conseqüentemente, do histórico pluviométrico.

As regiões a que determinada bacia hidrográfica pertence são definidas no cálculo da intensidade (7), por dois parâmetros **a** e **b**, que são próprios de cada região.

No caso da curva hiperbólica, os valores dos parâmetros **a** e **b** têm de ser calculados recorrendo aos registos do Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos (SNIRH), pois as curvas IDF (Intensidade – Duração – Frequência) do D.R. nº 23/95 de 23 agosto apenas se aplicam à curva exponencial e quando o *t* não excede os 120 minutos.

O uso das curvas IDF do D.R. nº 23/95 de 23 agosto não é aplicável em grandes bacias hidrográficas ou quando o dimensionamento pretende ser mais rigoroso. Nestas situações, mesmo usando a curva exponencial (Gráfico 1), é necessário recorrer aos registos do SNIRH e tratar estatisticamente os valores da precipitação.

Curva Exponencial

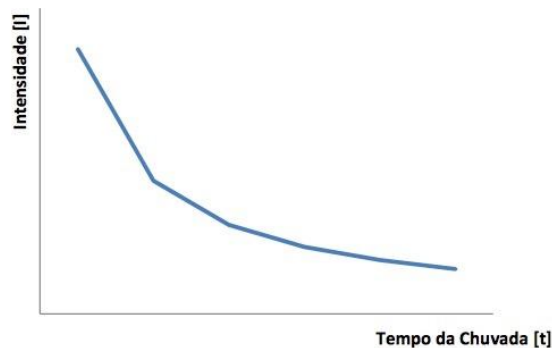


Gráfico 1 - Curva exponencial da Intensidade – Duração – Frequência

$$I = a(T) \times t^{b(T)} \tag{7}$$

Por aplicação logarítmica numa relação linear temos:

$$\log I = \log a + b \times \log t \tag{8}$$

Através desta relação linear, podem ser calculados pelo método dos mínimos quadrados, os parâmetros que definem a recta (b e $\log a$) e os valores dos parâmetros pretendidos a e b (Gráfico 2).

Curva Hiperbólica

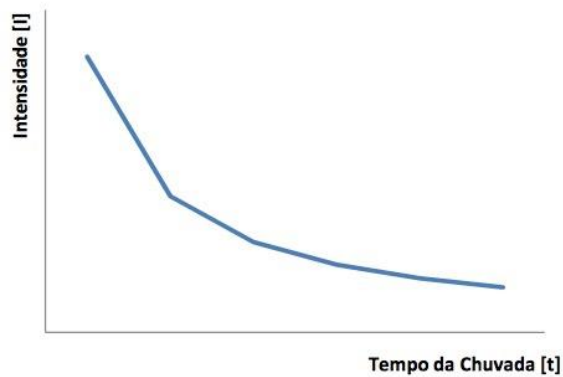


Gráfico 2 - Curva Hiperbólica da Intensidade – Duração – Frequência

No caso da curva hiperbólica as regiões a que determinada bacia hidrográfica pertence são definidas no cálculo da intensidade (9), por dois parâmetros a e b , que são próprios de cada região.

$$I = \frac{a(T)}{t + b(T)} \quad (9)$$

De onde obtemos a seguinte relação (10):

$$I = \frac{1}{a} \times t + \frac{b}{a} \quad (10)$$

Como anteriormente, aplicando o método dos mínimos quadrados podemos obter os valores dos parâmetros pretendidos a e b .

Período de retorno ou tempo de recorrência

O período de retorno de uma precipitação é T (11) quando o valor dessa precipitação é igualado ou excedido, em média, uma vez em cada intervalo T :

$$t = \frac{1}{f} \tag{11}$$

f – frequência da chuvada

Hietograma das Precipitações:

A rede udométrica nacional proporciona a aproximação da precipitação diária máxima anual com dado período de retorno, para as mais significativas bacias hidrográficas do País.

Como já foi referido anteriormente, a pluviosidade que importa do ponto de vista da análise de cheias só eventualmente ocorrerá com a precipitação máxima diária anual, para dado período de retorno. As durações críticas mais comuns no dimensionamento hidrológico de bacias hidrográficas portuguesas são da ordem de uma a vinte e quatro horas (Hipólito, 1985). Para bacias hidrográficas de áreas restringidas podem ser mais significativas durações de alguns minutos e, inversamente, para bacias hidrográficas de maiores dimensões durações de dias.

Os episódios de precipitação de curta duração podem ser caracterizados pela respetiva intensidade média. À medida que aumenta a duração da ocorrência, torna-se mais importante conhecer as intensidades da precipitação em sucessivos sub intervalos de tempo, principalmente quando se está perante um problema de determinação de caudais de ponta de cheia (Ponce, 1989).

A discretização temporal da ocorrência de precipitação é melhor traduzida por subterfúgio a diagramas cronológicos dos sucessivos valores da pluviosidade ou da respetiva intensidade. Estas interpretações podem ser discretas ou contínuas, correspondendo o primeiro caso ao hietograma da precipitação (distribuição da intensidade da precipitação em mm/h ao longo do tempo).

Os padrões mais frequentes em hietogramas referem-se a blocos decrescentes, blocos crescentes e blocos alternados, consoante os incrementos de precipitação nos sucessivos

intervalos de tempo são ordenados por valores decrescentes, por valores crescentes ou de modo alternado, respectivamente (Figura 31) (Portela, 2006 a).

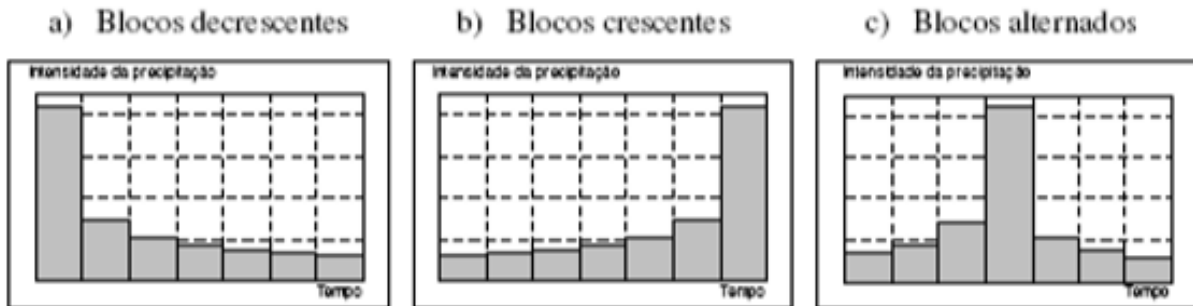


Figura 31 - Representação dos padrões de distribuição de blocos de precipitação em hietogramas

Fonte: Portela, 2006 a

Método dos Blocos Alternados:

É necessário o seguinte para a previsão de inundações a curto prazo: recolha de dados, sistemas transmissores e uma precipitação estimativa. Os sistemas são utilizados para transmitir dados de precipitação, nível e caudal, à medida que a ocorrência ocorre. As estimativas são realizadas utilizando modelos matemáticos representando o comportamento das várias fases do ciclo da água.

Para estimar o hietograma de projeto para cada uma das sub- bacias hidrográficas, e para cada período de retorno, será adoptado o Método dos Blocos Alternados. Para isso efetua-se os seguintes cálculos de acordo com as expressões (12), (13) e (14), sucessivamente:

- ❖ Intensidade da precipitação (mm/h):

$$I(t) = a(T) \times t^{b(T)} \quad (12)$$

- ❖ Altura da precipitação acumulada (mm):

$$P(t) = I(t) \times \frac{t}{60} \quad (13)$$

❖ Incremento da precipitação (mm):

$$IP(t_2) = P(t_2) - P(t_1)$$

(14)

2.3.3. Modelos Hidrológicos

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, assistindo no entendimento dos métodos que envolvem essa mesma realidade. O recurso à modelação, e inevitavelmente aos modelos que a constituem, é cada vez mais um instrumento de trabalho em planeamento ambiental, possibilitando efetuar o estudo não só da situação presente ou passada, como também executar e analisar cenários de situações futuras.

De uma forma geral, um modelo é um sistema de equações e procedimentos constituídos por variáveis e parâmetros. Os parâmetros preservam o seu valor inalterado durante todo o processo em estudo. Assim, um parâmetro é considerado como tendo o mesmo valor para todos os intervalos de tempo, o que não significa que não varie temporal e espacialmente.

Uma possível classificação para os modelos hidrológicos é apresentada na figura 32 (Quintela e Portela, 2000).

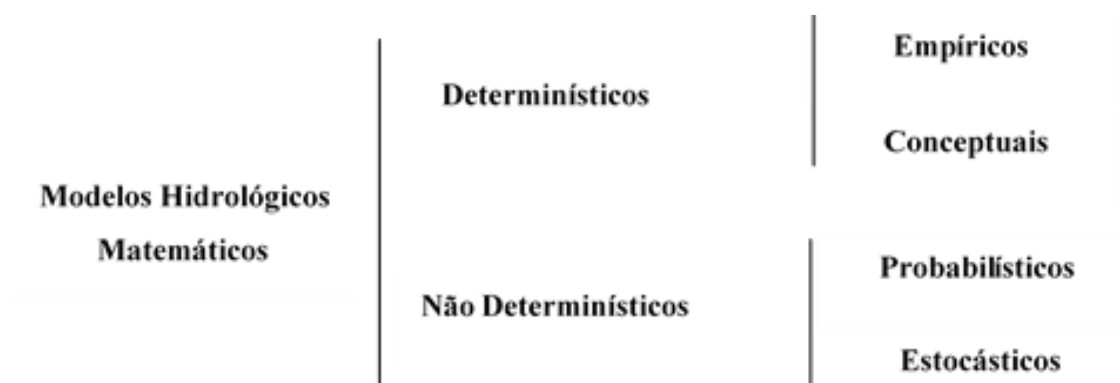


Figura 32 - Classificação de modelos hidrológicos

Fonte: Quintela e Portela, 2000

Aplicação da Modelação Hidrológica à Análise de Cheias

O estudo de cheias visa a obtenção de hidrogramas de cheia, em condições naturais, em secções de cursos de água. Tal objetivo, embora simples e muito geral, faz intervir os seguintes conceitos: cheia e hidrograma de cheia.

O conceito de cheia, embora de utilização trivializada, não tem uma definição precisa. De uma forma geral, as cheias apresentam-se como intumescências graduais e progressivas da superfície livre de cursos de água a que correspondem alturas máximas do escoamento que se propagam para jusante. A noção de cheia está, então, relacionada com a ocorrência de elevados níveis de água e, portanto, à ocorrência de elevados caudais (Portela, 2006 a).

Do ponto de vista hidrológico, verifica-se a ocorrência de uma cheia quando a bacia hidrográfica é sustentada por água de uma forma intensa e prolongada de tal forma que o caudal que daí advém e que afluí à rede hidrográfica excede a capacidade normal de transporte ao longo daquela rede, transbordando as margens naturais ou artificiais e alagando as zonas contíguas (Silva, 2008).

A caracterização de cheias que ocorrem numa dada secção de um curso de água na sequência de acontecimentos pluviosos excepcionais sobre a respetiva bacia hidrográfica requer o estabelecimento de hidrogramas de cheia, ou seja, de diagramas cronológicos de caudais instantâneos (Gráfico 3) (Silva, 2008).



Gráfico 3 – Componentes de um hidrograma

Fonte: Lencastre e Franco, 1984

- A curva de crescimento corresponde ao aumento de caudal justificada pelo incremento do escoamento, e que acontece durante o tempo de crescimento ou tempo para a ponta;
- A ponta do hidrograma é o respetivo valor máximo;
- A curva de decrescimento, correspondente à diminuição progressiva do escoamento direto, e que ocorre durante o tempo de decrescimento. A soma dos tempos de crescimento e decrescimento corresponde ao tempo de base do hidrograma;
- A curva de esgotamento corresponde ao decréscimo exponencial do escoamento de base, depois de terem terminado as contribuições das restantes componentes do escoamento superficial.

Designa-se tempo de resposta da bacia, o intervalo de tempo determinado pelos instantes correspondentes ao centro de gravidade da precipitação útil e à ponta do hidrograma. Reproduz o desfasamento entre a curva cronológica dos caudais na secção e a dos caudais correspondentes à precipitação, suposta uniformemente repartida por toda a bacia, no momento em que ela ocorre (Mourato et al, s/d).

2.3.3.1. Pré-determinação das Pontas de Cheia

No dimensionamento hidráulico é necessário o cálculo dos caudais de ponta de cheia , definidos como os máximos caudais suscetíveis de serem atingidos.

No caso de bacias hidrográficas com áreas na ordem dos 25 a 30 km² ou inferiores poderá aplicar-se o Método Racional que é , de entre os métodos simplificados, o mais utilizado e reconhecido a nível mundial. Apesar das suas limitações, que condicionam o seu domínio de aplicação, permite obter resultados satisfatórios, se aplicado de forma criteriosa.

Para bacias de dimensão superior será necessário considerar outros fatores, nomeadamente, a variação da intensidade das chuvadas. Nestes casos poderão adotar-se métodos de cálculo dos hidrogramas de cheia, baseados na teoria do hidrograma unitário.

Salienta-se, de entre os existentes, o método do Soil Conservation Service (SCS), por ser uma metodologia completa e consistente.

O Método Racional (15) estima um caudal de ponta , que ocorre no instante em que toda a bacia está a contribuir para o escoamento (Tabela 5 e 6), isto é, quando a duração da chuvada crítica é igual ao tempo de concentração .

Hipóteses consideradas no Método Racional:

- A relação entre o caudal máximo e a área drenante e entre o caudal máximo e a intensidade de precipitação é linear ;
- A intensidade de precipitação é constante ;
- O tempo de duração da chuvada é igual ao tempo de concentração;
- A precipitação e o caudal têm a mesma frequência ou período de retorno.

$$Q = CxIx A$$

(15)

onde: Q – caudal (m^3/s); C – coeficiente de escoamento; I – intensidade de precipitação (mm/h); A – área da bacia (ha).

Valores médios do coeficiente de escoamento, associado ao Método Racional:

Tabela 5 – Valores médios do coeficiente C

| Tipo de ocupação do solo | C |
|---------------------------------|-------------|
| Comercial | |
| no centro urbano | 0,70 – 0,95 |
| nos arredores | 0,50 – 0,70 |
| Residencial | |
| habitações unifamiliares | 0,30 – 0,50 |
| prédios isolados | 0,40 – 0,60 |
| prédios geminados | 0,60 – 0,70 |
| suburbanos | 0,25 – 0,40 |
| Industrial | |
| pouco denso | 0,50 – 0,80 |
| muito denso | 0,60 – 0,90 |
| Parques e cemitérios | 0,10 – 0,25 |
| Campos de jogos | 0,20 – 0,40 |

Fonte: ASCE, Manual n.º 37

Tabela 6 - Valores médios do coeficiente C

| Tipo de superfície | C |
|--------------------------------|-------------|
| Pavimentos | |
| asfáltico | 0,70 – 0,95 |
| betão | 0,80 – 0,95 |
| Passeios para peões | 0,85 |
| Cobertura (telhados) | 0,75 – 0,95 |
| Relvado sobre solo permeável | |
| plano < 2% | 0,05 – 0,10 |
| médio, 2% a 7% | 0,10 – 0,15 |
| inclinado > 7% | 0,15 – 0,20 |
| Relvado sobre solo impermeável | |
| plano < 2% | 0,13 – 0,17 |
| médio, 2% a 7% | 0,18 – 0,22 |
| inclinado > 7% | 0,25 – 0,35 |

Fonte: ASCE, Manual n.º 37

O método do Soil Conservative Service (16) é utilizado em bacias de dimensão superior. Na sua aplicação é necessário considerar outros fatores, como a variação da intensidade das chuvadas. O facto de este método ter uma metodologia completa e consistente permite o cálculo de hidrogramas de cheia em bacias das quais não existem registos hidrométricos suficientes (Figura 33).

$$Q_p = \frac{0,277 \times k \times A \times h_u}{t_p} \quad (16)$$

onde: k – factor de ponta, varia entre 1 e 0,5 (respectivamente para bacias muito declivosas e muito planas); A – área da bacia em km²; h_u – altura da precipitação útil (mm); t_p – tempo de crescimento ou tempo para a ponta (horas).

Para uma dada precipitação total (h), a precipitação útil é calculada pela expressão:

$$h_u = \begin{cases} \frac{(h - h_0)^2}{h + 4h_0}, & (h > h_0) \\ 0, & h \leq h_0 \end{cases} \quad (17)$$

onde h_0 corresponde ao valor das perdas iniciais e N ao número de escoamento que depende do tipo de solo e do tipo de ocupação:

$$h_0 = \frac{5080}{N} - 50,8 \quad (18)$$

O tempo de crescimento é dado pela expressão:

$$t_p = \frac{1}{2}t_r + 0,6 t_c \quad (19)$$

onde t_r corresponde à duração da precipitação útil em horas e t_c ao tempo de concentração da bacia em horas.

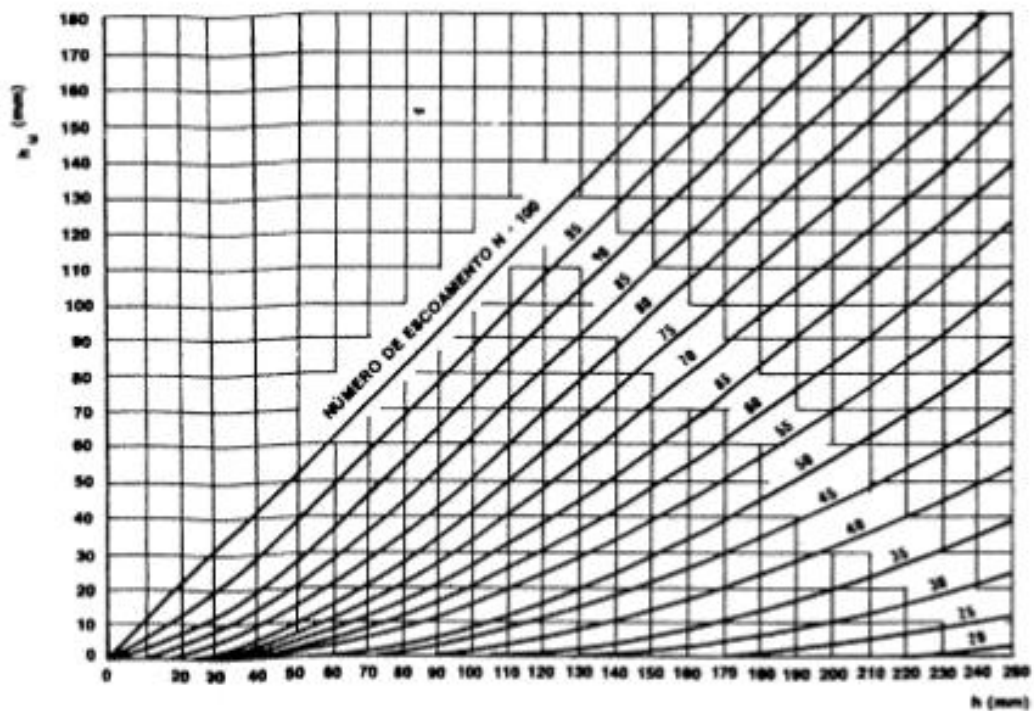


Figura 33 – Relação entre a precipitação total e a precipitação útil para diversos tipos de escoamento.

2.3.3.2. Integração com Ferramentas SIG

Segundo Tucci, (2007) o modelo do túnel é um modelo de bacia hidrográfica que calcula o caudal de entrada em túneis e os canais por precipitação.

O modelo de bacia hidrográfica abrange as funções hidrológicas para determinar o escoamento para as condutas de macro drenagem através de algoritmos como as perdas iniciais. Exemplos de modelos que usam unicamente este modelo são IPH-II (Tucci et al., 1981) e (SCS, 1975). O modelo IPHS1 (Tucci et al., 1998) inclui os algoritmos da bacia hidrográfica e do canal.

No modelo do túnel, o caudal é transportado por equações de armazenamento como Muskingum, ou versões modificadas deste, como o Muskingum-Cunge. Em bacias de retenção, é usado o método Puls. Este tipo de modelo identifica os lugares onde a inundação ocorre devido ao caudal exceder a capacidade de escoamento ou à subida das águas, com a ajuda de curvas de caudal de altura para as secções.

Lança (2004), desenvolveu um modelo hidrológico de superfície capaz de representar, de forma aproximada os processos hidrológicos numa determinada bacia hidrográfica para auxiliar na gestão dos recursos hídricos. Para a realização do estudo foi necessário fazer um levantamento de diversos fatores relativos à bacia hidrográfica: o modelo digital do relevo, a rede hidrográfica, hidrodinâmica, o transporte de sedimentos, a qualidade da água e o crescimento das plantas. Este modelo encontra-se em desenvolvimento, pelo que ainda não está concluído.

Dada a capacidade de extração de dados de diferentes origens e a sua integração num ambiente capaz de os processar, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) simplificam grandemente o processo de obtenção de informação, e seu tratamento, com vista ao desenvolvimento de modelos hidrológicos capazes. Permitem, de igual modo, estender a capacidade analítica dos resultados obtidos por estes mesmos modelos. Aplicações como o delimitar de bacias hidrográficas ou caracterização topográfica são exemplos de como a Modelação Hidrológica apoiada nos Sistemas de Informação Geográfica pode, de facto, constituir uma base de apoio à tomada de decisão na gestão de recursos hídricos.

Lança (2004) também refere que os SIG podem acrescentar especificidade espacial à modelação e visar problemas hidrológicos sem solução à escala local e continental. De

acordo com Maidment (1993), o modelo hidrológico pode ser definido como a representação matemática do caudal de água e os seus constituintes de uma dada parte da superfície terrestre ou sub-superfície ambiental. Ele sumaria o desafio da modelagem em três partes.

- Primeiro, a modelagem de caudal de água está relacionada com a disposição de precipitação em termos de escoamento, infiltração, recarga do lençol freático, evaporação e armazenamento de água.
- Em segundo lugar, a hidráulica do caudal é considerada com base na descarga de água num determinado ponto. Isto inclui a velocidade do caudal e a elevação da superfície da água num curso de água, o fluxo de Darcy e a piezometria de cabeceira num aquífero.
- Em terceiro, são consideradas questões de transporte relacionadas com qualidade da água e caudais poluentes.

Maidment (1993) define os componentes espaciais da modelagem hidrológica como bacias hidrográficas (como modelos discretos, modelos integrados discretos ou modelos de parâmetros distribuídos), canalizações e cursos de água relacionados com rugosidade de canais, aquíferos (transporte e caudal de águas subterrâneas), lagos e estuários. Ele classifica os modelos de acordo com uma taxonomia baseada em cinco fontes de variação: tempo, as três dimensões de espaço e aleatoriedade. Em contraste, Moore et al. (1993) define seis estruturas de modelos para modelos de superfície - sub-superfície que usam uma abordagem topográfica, incluindo modelos discretos, unidades de resposta hidrológica (URH), modelos de rede, modelos baseados na rede triangulada irregular (TIN), modelos de contornos, e modelos de águas subterrâneas bi e tridimensionais.

Segundo Maidment e Djokic, (2000), podem considerar-se como mais significativos os seguintes níveis de associação dos SIG à modelação hidrológica:

- A determinação de parâmetros hidrológicos;
- A ligação dos SIG a modelos hidrológicos já existentes;
- A modelação hidrológica no interior do software SIG.

As novas fronteiras na modelagem hidrológica com SIG incluem pesquisa na distribuição espacial de propriedades de bacias hidrográficas, caudal parcial da área, interação entre águas de superfície e águas subterrâneas e hidrologia local e global. (Maidment, 1993).

A obtenção de parâmetros hidrológicos nos SIG serve, geralmente, como forma de recolha de dados de entrada aos respetivos modelos, nomeadamente os que são baseados na análise de modelos digitais do terreno, representação numérica geograficamente referenciada do relevo de uma determinada região.

Os SIG são utilizados para o fornecimento informaticamente programado de dados que vão alimentar os modelos hidrológicos, ou para visualização dos resultados das simulações realizadas. A determinação de parâmetros é feita de uma forma automática e inserida numa estrutura de ficheiro digital característica do próprio SIG, que por sua vez é diretamente, ou indiretamente, utilizada pelo *software* de modelação hidrológica. O inverso é igualmente válido, i.e., os dados finais provenientes da modelação hidrológica são passíveis de ser incorporados, de volta, no SIG, permitindo a sua interpretação espacial com uma maior aproximação da realidade.

Os SIG atualmente incluem ferramentas capazes de processar informação específica que servirá de entrada no modelo hidrológico. É exemplo, o conjunto de ferramentas (designadas por extensões) capaz de gerar a rede de drenagem e a bacia hidrográfica, tendo por base o modelo digital do terreno.

Os próprios modelos hidrológicos são incorporados no SIG utilizando para o efeito as linguagens de programação próprias destes sistemas. A principal limitação operacional a este nível prende-se com a dificuldade de incluir uma dimensão temporal no ambiente dos SIG. Não obstante, surgem atualmente exemplos de módulos destinados à modelação hidráulica incluídos, por defeito, nos SIG comerciais. Caso a que não é alheio um maior desenvolvimento das respetivas linguagens de programação. Os autores Ferdinand e Maidment, 1999, afirmam que os SIG se têm tornado cada vez mais flexíveis, suportando uma variada gama de dados e de linguagens sofisticadas, progressivamente mais adaptadas às necessidades do modelador.

Hay et al. (1993) descrevem como o SIG é usado em abordagem de sistemas acoplados para avaliar a sensibilidade dos recursos de água da bacia do rio Gunninson em relação à variabilidade climática, incluindo potenciais cenários de alterações climáticas. O

resultado da saída da circulação geral aninhada e modelos meso escala está relacionado com um modelo de precipitação orográfica que fornece uma entrada de precipitação para um sistema de modelagem de precipitação-escoamento (PRMS), um modelo hidrográfico de parâmetro distribuído (Leavesley et al., 1983). O resultado do PRMS é usado num sistema de contabilização e de roteamento do caudal a jusante para estimar a descarga total da bacia de teste piloto.

O SIG é usado:

- Para gerir, manipular e analisar dados topográficos, de solos, vegetação, clima, e características derivadas da superfície terrestre que ajudam na determinação do comportamento dos principais processos desta abordagem de sistemas acoplados. Estes processos incluem a quantidade e variabilidade espacial de precipitação através da acumulação de neve no modelo de precipitação orográfica, processos de bacias hidrográficas (degelo, evapotranspiração, infiltração e escoamento) e roteamento de caudais de cursos de água (Hay et al., 1993).
- Para criar modelos digitais do terreno em formato raster constituídos por células com informação da elevação para uso em modelação de precipitação orográfica.
- Para avaliação dos efeitos de declive, orientações de encostas e elevação como uma função de escala da precipitação modelada. As estimativas do modelo em grelha de precipitação são então roteadas para ou URHs ou para uma segunda grelha de modelagem para PRMS.
- Pelo modelador PRMS para definir os limites URH, calcular parâmetros em URHs (ou células de grelha) e verificar os resultados do modelo. Leavesley and Stannard (1990) desenvolveram procedimentos para caracterização de URHs baseados em estatísticas do terreno (elevação, declive e aspeto), solo e tipos de vegetação e distribuição da precipitação. As ferramentas de delimitação de bacias hidrográficas de Jenson e Domingue (1988) e capacidades padrão de sobreposição do SIG são usadas para definir URHs a partir destes dados de solo.
- Para definir características de bacias em URHs para uma estimativa dos processos de subsistemas no PRMS: por exemplo, a intercepção da precipitação da vegetação com base no tipo e densidade da vegetação; infiltração com base no tipo de solo e

declive; ET com base no tipo de vegetação, tipo de solo, declive, aspeito e elevação; escoamento de superfície com base no tipo e densidade da vegetação, declive e tipo de solo; e caudal do curso de água como função para o declive e extensão do curso de água (Hay et al., 1993).

O relatório de Gao, Sorooshian, e Goodrich (1993) versa sobre a integração de GRASS SIG com o modelo precipitação-escoamento, com base em parâmetros distribuídos para análises de bacias hidrográficas. O modelo consiste na acoplação de modelos para processos hidrológicos separados, incluindo intensidade de precipitação, interseção da vegetação foliar, infiltração, caudal de superfície lateral em dadas condições de saturação de solo, caudal do curso de água e caudal sub-superficial.

Rundquis et al (1991) descreve o modelo de vulnerabilidade de águas subterrâneas DRASTIC para avaliação estatal.

Este modelo qualitativo requer a estimativa de vários parâmetros hidrológicos que determinam o nome do modelo: profundidade à água, recarga, média do aquífero, média do solo, topografia, impacto da zona vadosa, e condutividade hidráulica. A cada parâmetro é atribuído um peso geral relativo, e uma classificação para cada valor categórico possível do parâmetro. Por exemplo, como ilustrado por Rundquist et al. (1991), ao parâmetro profundidade à água é atribuído um peso de 5, e o parâmetro média de solo tem um peso geral de 2 na ameaça à vulnerabilidade das águas subterrâneas. A variação dos solos inclui fino ou ausente (classificação de 10), a barrento não agregado (classificação de 1). O índice do modelo DRASTIC é calculado como a soma do peso dos produtos e as classificações para cada parâmetro. Rundquist et al. (1991) descrevem como o ERDAS SIG foi usado para calcular cada parâmetro do modelo de entrada de dados baseados em mapas e seguidamente calcular o índice como um composto ponderado.

Harris et al. (1993) relatam a integração do ARC/INFO com caudal de águas subterrâneas e modelos de transporte de contaminantes para a análise do sistema de águas subterrâneas da bacia de San Gabriel. Nesta abordagem firmemente acoplada, um sistema integrado de programas pré e pós-processamento foi desenvolvido para facilitar o fluxo de dados entre o SIG e o modelo de caudal de águas subterrâneas CFEST (transporte acoplado de fluidos, energia e solutos). Em geral, o SIG foi usado para desenvolver e calibrar o modelo CFEST, construir e gerir uma grande base de dados espaciais, e realizar análises comparativas da saída do modelo.

De uma forma geral , é possível afirmar que a integração dos modelos hidrológicos no SIG permite que tais modelos sejam uma ferramenta mais útil no planeamento e gestão ambiental, e no ordenamento do território.

2.3.4. Softwares de Modelação

2.3.4.1. Modelos Digitais do Terreno (MDT)

Entende-se por Modelo Digital do Terreno qualquer conjunto de dados em suporte numérico que, para uma dada zona, permita associar a qualquer ponto definido sobre o plano cartográfico um valor correspondente à sua altitude (Figura 34) (Matos, 2001).

No domínio da hidrologia, a exploração dos MDT é particularmente útil para o delineamento automático de redes hidrográficas e respetiva delimitação de bacias hidrográficas. Esta é a operação hidrológica mais elaborada, envolve a aplicação de diversos algoritmos e tem sido objeto de algum debate e também de muitos estudos.

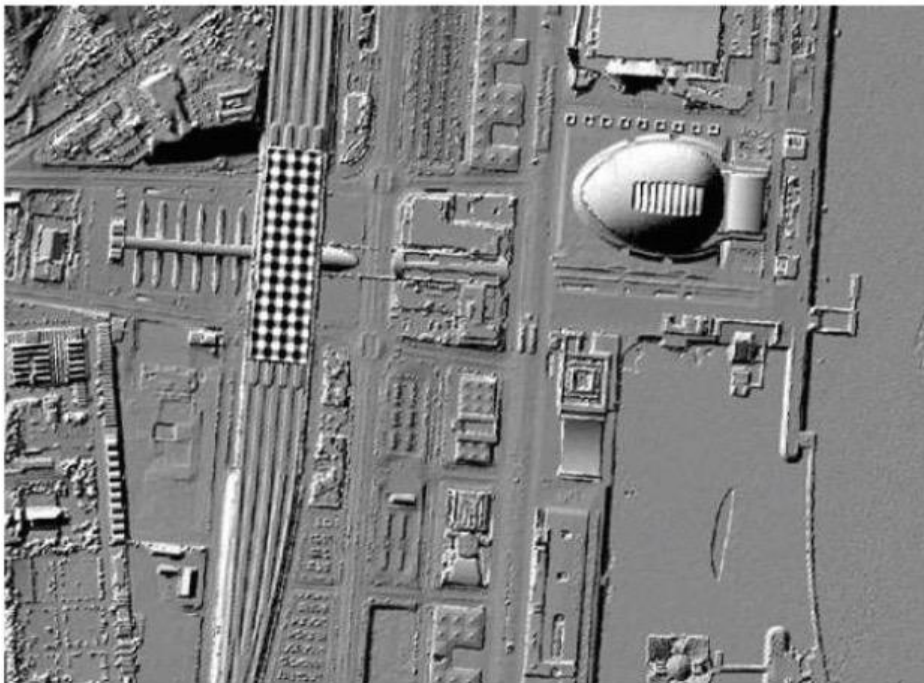


Figura 34 - Exemplo de um modelo digital do terreno

Fonte: Matos, 2001

A acessibilidade crescente a cartografia altimétrica em formatos digitais e em diversas escalas, proveniente de informação de satélites disponibilizada online facilita aos utilizadores a produção SIG de modelos digitais para regiões de interesse. Algumas entidades nacionais também já disponibilizam, entre os seus produtos, modelos digitais do terreno a escalas com interesse do ponto de vista da modelação hidrológica: o Instituto Geográfico do Exército (IGEOE) e o Instituto Geográfico Português (IGP).

A possibilidade de gerar redes hidrográficas por processos automáticos é uma das vantagens mais imediatas que advém da utilização dos MDT. São muito mais extensas e detalhadas que as que resultam dos processos convencionais, pois estes não consideram uma série de dados (linhas de água) consideradas de carácter efémero ou intermitente. Este conjunto de linhas desempenha um papel muito importante no processo de escoamento superficial.

A estrutura dos MDT pode ser introduzido através de:

- Quadrícula (*raster*)

Tem como principal vantagem a grande simplicidade com que os modelos são processados, apesar da dificuldade de representação de áreas complexas, em que ocorrem alterações bruscas de altitude, situações em que a simulação da realidade se torna mais grosseira, podendo só parcialmente ser compensada com o estabelecimento de quadrículas de dimensões reduzidas.

- Rede de triângulos irregulares (TIN)

É a forma mais utilizada nos dias de hoje e passa pela geração do MDT em estrutura TIN e sua posterior conversão para estrutura em quadrícula, garantindo uma maior representatividade do terreno sem prejuízo da sua capacidade de processamento. A estrutura em rede de triângulos irregulares (TIN), onde os vértices dos triângulos são pontos cotados, torna-se mais eficiente e flexível para a modelação do terreno. Os triângulos são gerados recorrendo à triangulação pelo método do varrimento radial ou pela triangulação de Delaunay.

Os MDT podem ser utilizados para diferentes desígnios:

- Visualização tridimensional do terreno, podendo esta ser baseada em imagens obtidas por satélite;
- Representação da carta hipsométrica de uma bacia hidrográfica, i.e., a sua classificação em função de classes de altitudes;
- Obtenção de perfis longitudinais de linhas de água ou de uma qualquer dada diretriz desenhada sobre o MDT;
- Cálculo de volumes, por interpolação com uma qualquer área de interesse;
- Determinação de zonas de visibilidade potencial para um dado ponto do MDT, embora geralmente esta operação não considere objetos existentes sobre o próprio MDT;
- Cálculo de declives, gradientes (máxima taxa de variação do declive), e orientações (direção em que ocorre o maior declive);
- Determinação de direções de escoamento e de linhas de água, e delimitação de bacias hidrográficas.

Por recurso a várias das operações em SIG e por recurso a *software* hidrológico específico, é possível gerar modelos do terreno compreensíveis hidrológicamente, individualizar as diferentes partes integrantes do modelo hidrológico e sua respetiva parametrização.

3. Modelação Hidrológica da Ribeira do Amparo – Caso de estudo

3.1. Enquadramento

A Ribeira do Amparo é um afluente do Rio Lis, localizada na União das Freguesias de Marrazes e Barosa, concelho de Leiria.

O mencionado curso de água apresenta como ponto pertinente ao seu estudo, o facto da área urbana em questão se encontrar em franca expansão, as alterações introduzidas no revestimento e na ocupação e uso do solo promoverem não só a intensidade das cheias (pela redução das perdas por interceção/retenção e favorecimento da impermeabilização da bacia) como reduzem significativamente a capacidade de escoamento da rede hidrográfica (pelos obstáculos nos leitos de cheia e agravamento dos fenómenos de erosão do solo). Estes fatores funcionando de forma simultânea tornam a definição de valores de ponta de cheia e respetivos tempos de ocorrência em importantes objetivos de planeamento. Assim, a possibilidade de ocorrência de cheias repentinas (*flash floods*) é ainda acrescida, sendo a sua capacidade de previsão em tempo real algo de desejável (Portela, 2000).

Segundo o Plano Diretor Municipal de Leiria: “*As freguesias abrangidas pelo risco de inundação são Cortes, Leiria, Pousos, Santa Eufémia, Caranguejeira, Azoia, Parceiros, Barosa, Marrazes, Amor, Regueira de Pontes, Ortigosa, Monte Real, Carvide, Carreira, Souto da Carpalhosa, Monte Redondo e Coimbrão. Estas zonas inundadas estão associadas à ultrapassagem das margens dos rios Lis, Lena, ribeira do Sirol, ribeira de Caranguejeira e ribeira de Caldelas, ribeiro do Picheleiro, Vala de Areia, ribeira de Amor e ribeiro de Escoura, e rio de Fora. Nas freguesias de Maceira, Azoia, Barosa, Marrazes, Colmeias e Souto da Carpalhosa, foram registadas inundações pontuais, associadas a condução de águas pluviais por redes de coletores, nem sempre dimensionadas para fazer face a situações de precipitação anormal e um dos locais de inundação na cidade de Leiria é a Quinta do Amparo junto à Ribeira do Amparo*” (PDML, 2010).

Este estudo tem como objetivo desenvolver um modelo hidrológico representativo e dinâmico que acompanhe as alterações registadas ao longo do tempo, que pode estabelecer a

base de decisão a processos de ordenamento do uso do solo e consideração de medidas estruturais.

Para o desenvolvimento deste estudo foram utilizados dois softwares, o ArcGIS e o HEC-HMS, uma vez que, o objetivo desta dissertação é estudar as características fisiológicas da bacia hidrográfica da Ribeira do Amparo e identificar os pontos críticos propícios à ocorrência de cheias e inundações.

O ArcGis é um software desenvolvido pela empresa americana ESRI no fim da década de 1990 e constitui uma plataforma primária de última geração para realizar as análises em ambiente de SIG. É um Sistema de Informação Geográfica (GIS) utilizado para criação e utilização de mapas, compilação de dados geográficos, análise de informações mapeadas e gestão de informações geográficas em bancos de dados.

O ArcGis possui as seguintes funções fundamentais:

- Utilização de várias projeções cartográficas definidas no momento da apresentação dos dados em tela, sem ser preciso fazer alterações físicas dos dados originais;
- Interface que pode ser adaptada às necessidades dos utilizadores;
- Disponibilidade de uma linguagem de programação orientada para objectos;
- Geração de mapas de alta qualidade;
- Geração de análises espaciais com dados vectoriais e raster;
 - Processamento de dados satélite;
 - Processamento de redes geográficas;
 - Processamento de dados 3D;
 - Leitura directa de arquivos shapefiles (ArcView), CAD (Computer – Aided Drafting), imagens (JPEG, BMP, etc), grids (raster), TINs (Triangulated Irregular Networks) e tabelas (atributos).

O ArcGIS utiliza um modelo de dados próprio denominado Geodatabase. Neste formato, as informações vectoriais são estruturadas em Features Classes, e são integradas juntamente com as imagens, grids, TIN's e tabelas em uma única base de dados.

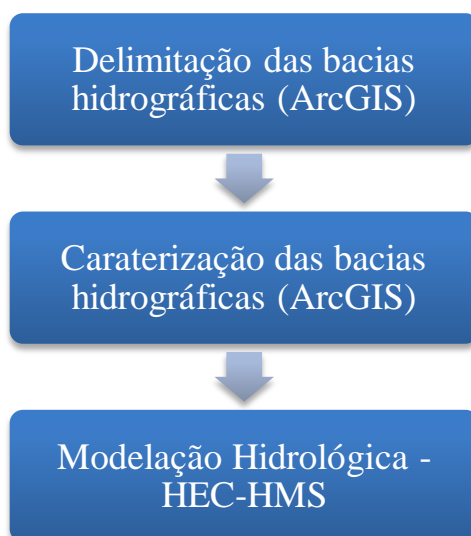
O HEC-HMS foi concebido para simular os processos de precipitação-escoamento das bacias de drenagem. Os hidrogramas produzidos pelo programa são usados diretamente ou em conjunto com outros softwares para estudos de disponibilidade de água, drenagem urbana, previsão de caudais de ponta de cheia, impacto futuro da urbanização, redução de danos causados por inundações, regulação da planície de inundação e operação de sistemas.

Em linhas gerais, o estudo hidrológico pode ser resumido na sequência metodológica indicada:

- Delimitação da bacia hidrográfica de contribuição;
- Cálculo das características físicas e parâmetros da bacia de contribuição;
- Definição do tempo de concentração da bacia de contribuição;
- Determinação da chuvada de projeto;
- Cálculo do caudal de ponta de cheia.

Neste estudo recorreu-se ao ArcGIS para a criação das cartas de ocupação do solo e posterior análise da ocupação do solo da união das freguesias de Marrazes e Barosa num período de 16 anos, compreendido entre 1990 e 2006, para tal, foi consultada a CLC90 e CLC06 recolhidas na plataforma digital da Direção – Geral do Território, bem como CAOP2011. Foi também analisado o uso e ocupação do solo no ano de 2007, consultando a COS07. O HEC-HMS foi utilizado para a definição do modelo hidrológico, a que se refere a bacia hidrográfica da Ribeiria do Amparo.

Este estudo vai seguir a seguinte metodologia (Fluxograma 1):



Fluxograma 1 - Metodologia

Os procedimentos mencionados neste capítulo serão explicados com mais detalhe no capítulo seguinte.

3.2. Descrição da Área de Estudo

3.2.1. Localização Geográfica

Conforme já referido anteriormente, a Ribeira do Amparo é um afluente do Rio Lis, inserido na malha urbana da cidade de Leiria. A zona em estudo pertence à União das Freguesias de Marrazes e Barosa (Figura 35), com uma área de 32,8 km² e 24684 habitantes (Censos de 2011).

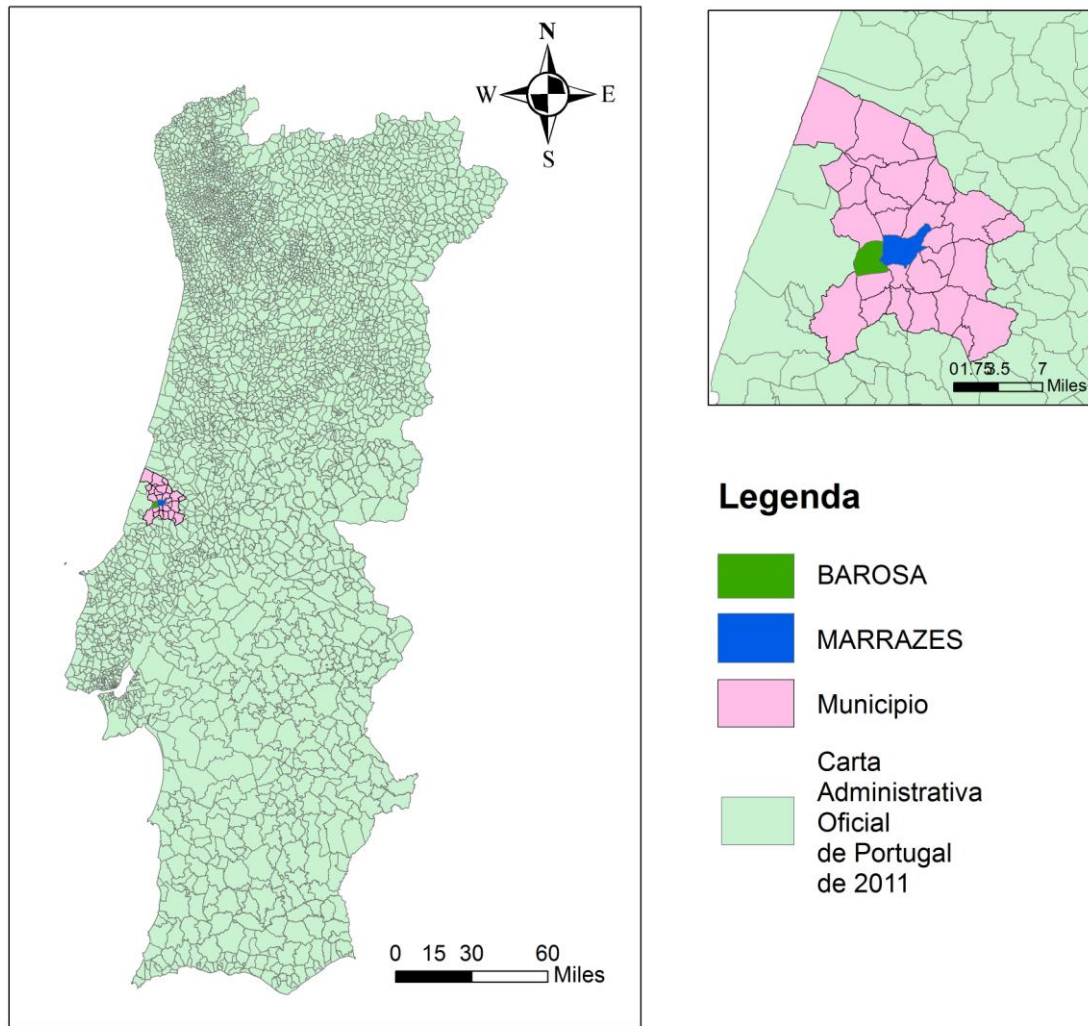


Figura 35 - Localização da área de estudo

O conhecimento do terreno permitiu sustentar algumas decisões ao longo deste estudo pois reflete a realidade do campo. Neste contexto, sendo a Ribeira do Amparo o objeto de estudo, de seguida apresenta-se a descrição do percurso desta ribeira, mencionando o tipo de vegetação que se encontra nas suas margens e leito.

A figura 36 ilustra sobre fotografia aérea (Google Earth) os pontos de referência para a elaboração do estudo da Ribeira do Amparo. O ponto de referência na Quinta da Matinha localiza-se no cruzamento da Estrada Nossa Senhora do Amparo e a Rua da Matinha. O ponto de referência na Nova Leiria situa-se a sul da Avenida 22 de Maio. A figura 37 mostra no Google Earth o percurso da Ribeira do Amparo em estudo.



Figura 36 – Localização dos pontos de referência para o estudo

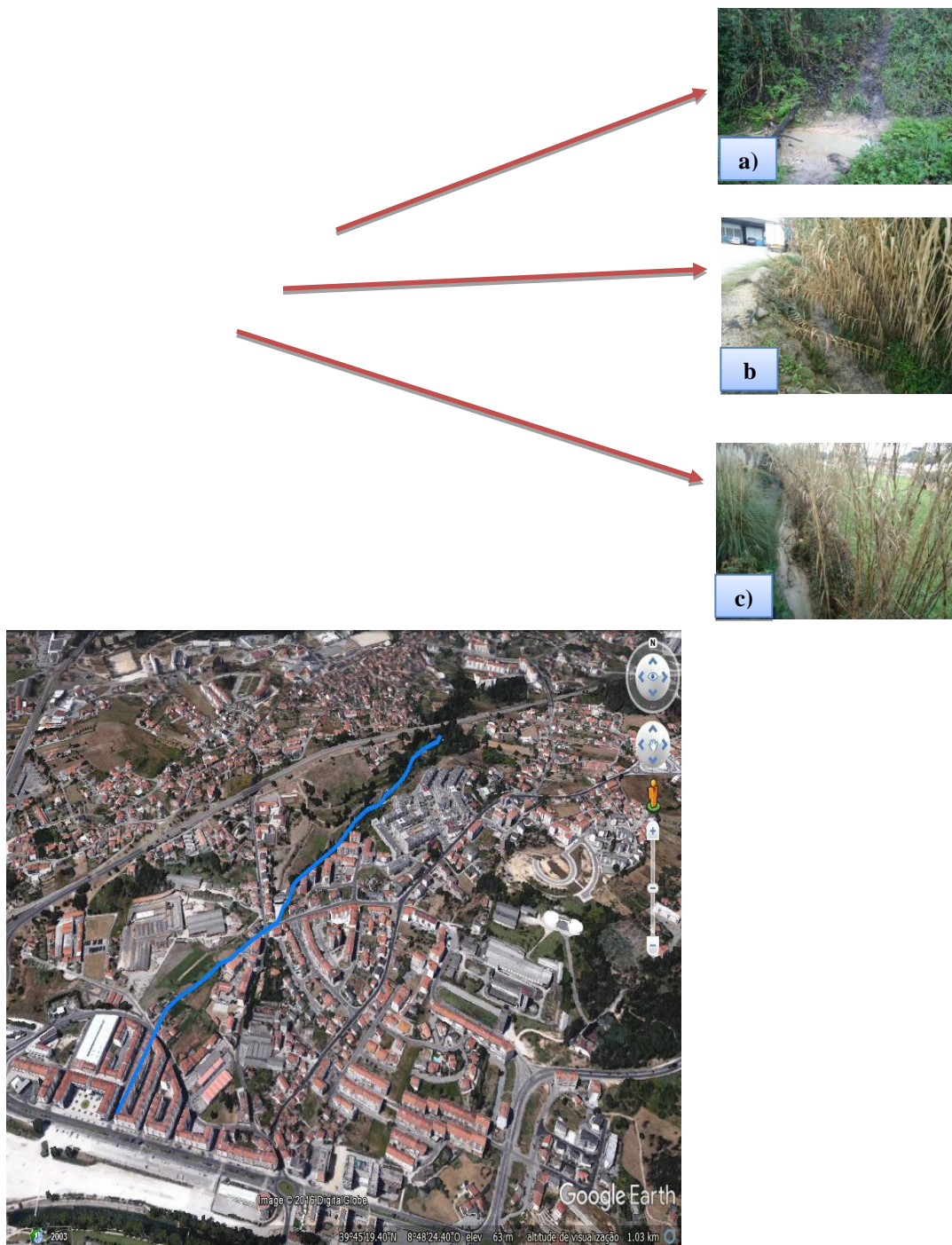


Figura 37 – Percurso da Ribeira Amparo, desde Estrada Nacional N°1 até à Nova Leiria; (a) Ribeira do Amparo a oeste da Rua de Dublin; (b) Ribeira do Amparo a norte da Rua da Matinha; (c) Ribeira do Amparo a oeste da Travessa Manuel Gomes dos Santos.

A caracterização da zona de estudo realizou-se com base nos dados recolhidos junto da Câmara Municipal de Leiria:

- Cartografia (planimetria, altimetria e hidrografia) à escala 1/10000 de 2007 em *Datum 73 Hayford Gauss IPCC* da freguesia dos Marrazes, em formato digital.

Foram também recolhidos dados em plataformas digitais, como a Direção Geral do Território onde se fez o download em shapefile (shp) para se poder abrir no Arcgis:

- Carta de Uso e Ocupação do Solo de 2007 (COS 07) à escala 1/10000 no sistema de coordenadas *ETRS_1989_Portugal_TM06*;
- Carta de Ocupação do Solo Corine Land Cover de 2006 (CLC 06) à escala 1/100000 no sistema de coordenadas *ETRS_1989_Portugal_TM06*;
- Carta de Ocupação do Solo Corine Land Cover de 1990 (CLC 90) à escala 1/100000 no sistema de coordenadas *ETRS_1989_Portugal_TM06*;
- Carta Administrativa Oficial de Portugal de 2011 (CAOP11) à escala 1/100000 no sistema de coordenadas *ETRS_1989_Portugal_TM06*;

Para uma melhor visualização foi introduzido no ArcGis uma imagem de satélite de Portugal.

Os dados de suporte foram selecionados e tratados de forma a se poder utilizar essa informação na delimitação de sub-bacias hidrográficas e criação de modelos digitais do terreno (DTM). O tratamento da informação consistiu na decomposição da mesma em informação altimétrica (curvas de nível e pontos cotados) e informação hidrológica (linhas de água). A cartografia fornecida pela Câmara Municipal de Leiria foi separada em layers (edifícios, curvas de nível, linhas de águas, pontos cotados).

A delimitação de sub – bacias hidrográficas é um dos primeiros procedimentos executados em análises hidrológicas. A delimitação de sub-bacias hidrográficas utilizando o ArcGis permite criar bacias hidrográficas através de MDT.

Inicialmente procedeu-se à análise dos dados, após a qual iniciou-se a elaboração do modelo conceptual, abriu-se um novo projeto Arcmap 10.2 e adicionou-se os ficheiros necessários para a realização deste estudo, pontos cotados, curvas de nível, cartografia.

Seguidamente procedeu-se à criação do modelo digital do terreno em formato raster recorrendo a ferramentas do software ArcGIS com uma resolução espacial de 10 m (Figura 38).

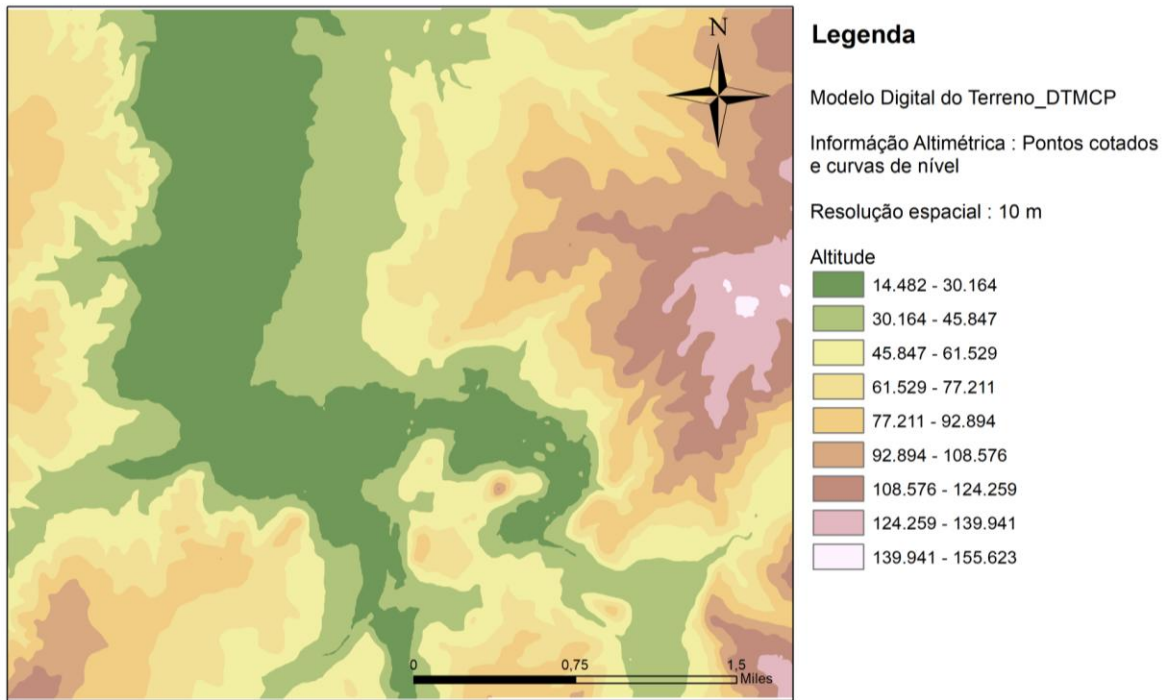


Figura 38 – Modelo Digital do Terreno da área de estudo.

Com base no MDT criados foram determinadas as direções de escoamento e criada a carta de acumulação de escoamento recorrendo ao modulo de Hidrologia disponível também no ArcGIS (Figura 39).

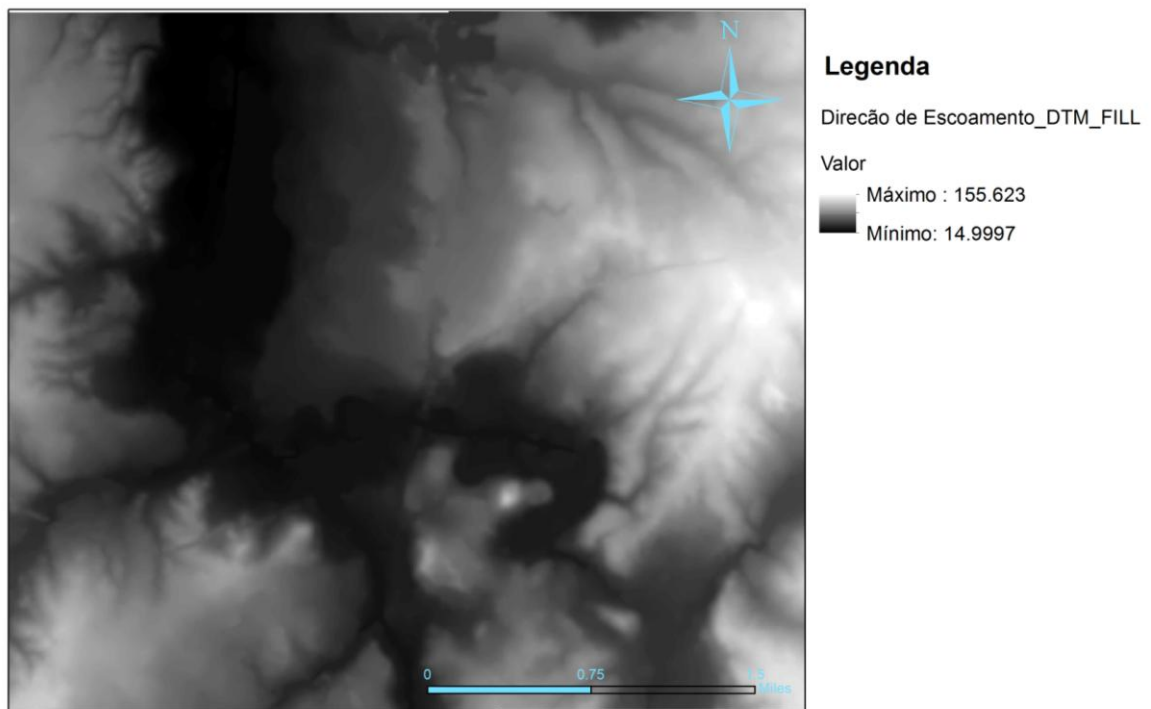
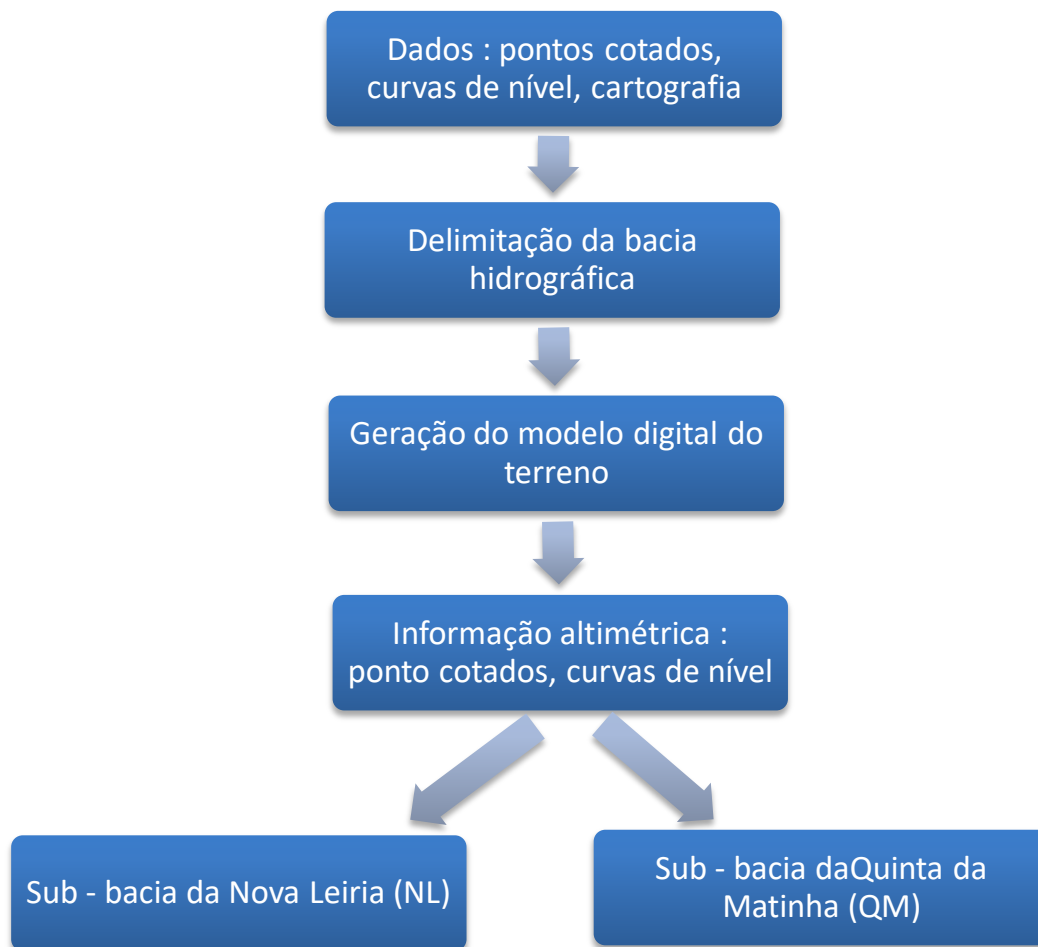


Figura 39 - Direção de escoamento da área de estudo.

Posteriormente, foi efetuado a delimitação das sub – bacias conforme explicitado no fluxograma 2, que ilustra a metodologia usada para a delimitação das sub-bacias hidrográficas.

Os pontos de referência de cada sub – bacia foram criados tendo em conta a cartografia, linhas de água e conhecimento do campo da área de estudo.



Fluxograma 2 - Metodologia usada para delimitação das sub-bacias hidrográficas.

Para a melhor caracterização das sub-bacias foi determinado a altura média das sub-bacias também recorrendo a ferramentas SIG.

É de referir que os pontos de referência de cada sub-bacia foram criados tendo em conta a cartografia, linhas de água e conhecimento do campo da área de estudo (Figura 40).

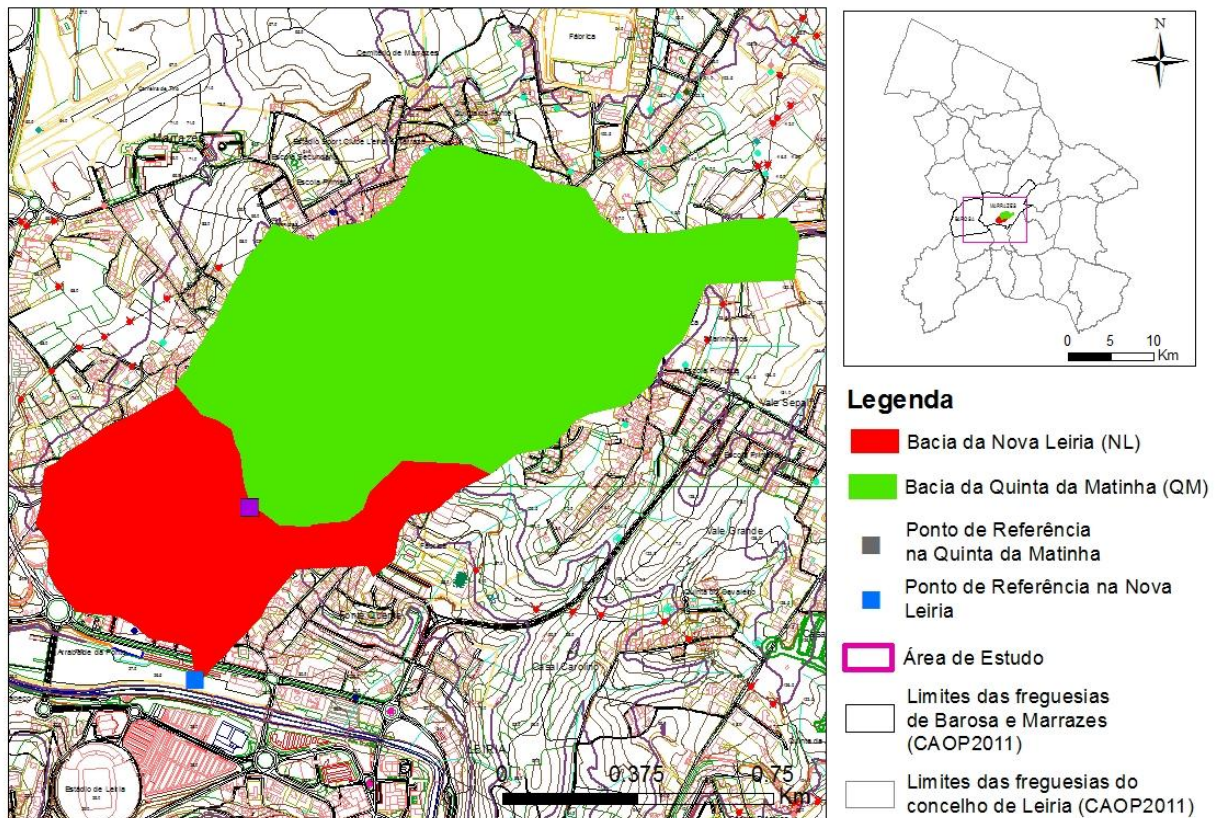


Figura 40 - Caracterização das sub-bacias em estudo.

Quanto mais pequena a resolução espacial, maior o número de células, mais detalhado é o raster e mais moroso é o processamento da informação. Neste estudo optou-se por uma resolução espacial de 10 metros. O MDT foi gerado respeitando o referencial cartográfico nacional *Hayford Gauss – Datum73* por ser o mesmo da cartografia fornecida pela Câmara Municipal de Leiria.

A consideração de informação altimétrica distinta também determina diferenças nos MDT. Quanto mais informação altimétrica detalhada for considerada, mais precisa e regular se torna a representação da superfície terrestre.

Neste estudo, foi possível verificar por análise do modelo digital do terreno que as altitudes mínima e máxima são de 14,482 m e 155,623 m, respectivamente. Ainda, com base e direção de escoamento (Figura 39), as sub-bacias correspondem a áreas de aproximadamente 0,98 km² para a sub-bacia da “Quinta da Matinha” (sub-bacia mais a montante) e 0,4 km² para a sub-bacia da Nova Leiria (sub-bacia mais a jusante).

3.2.2. Caracterização do sistema de drenagem

A rede hidrográfica em estudo pertence à bacia hidrográfica do rio Lis, conforme já foi referido, e é do tipo exorreica. Quanto à constância do escoamento, a Ribeira do Amparo é do tipo perene. A avaliação do número de ordem dos cursos de água fez-se por inspeção visual da rede hidrográfica, em sobreposição com o modelo digital do terreno. Os critérios foram:

- Os cursos de água de 1ª ordem não possuem afluentes;
- Os cursos de água de 2ª ordem resultarem da junção de dois cursos de água de 1ª ordem e cursos de água de ordem n criam cursos de água de ordem $n+1$.

Assim, com base nestas reflexões e na inspeção visual conclui-se que a ordem dos cursos de água na bacia da Ribeira do Amparo é de 4.

Relativamente ao sistema de drenagem, a bacia em estudo apresenta uma rede de drenagem dendróide pois é semelhante a uma árvore (Figura 41).

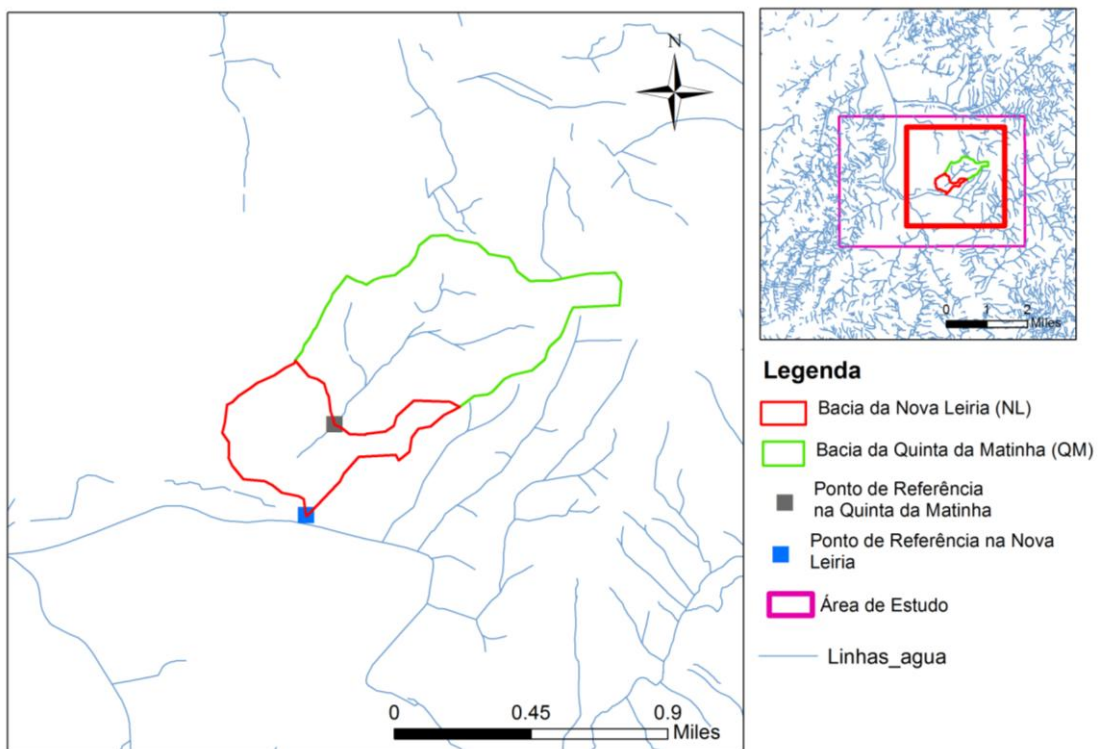


Figura 41 - Caracterização do sistema de drenagem.

3.2.2.1. Área de drenagem

A área de drenagem da bacia em estudo foi delimitada através do programa computacional ArcGis. Com base no polígono da bacia delimitada, sobre o modelo digital do terreno, foi possível calcular a área da bacia em km², correspondendo às sub-bacias áreas de aproximadamente 0,98 km² (sub-bacia da “Quinta da Matinha”, a montante) e 0,4 km² (sub-bacia da Nova Leiria, a jusante).

3.2.3. Caracterização geométrica

A área de drenagem é um factor que influencia o escoamento superficial direto numa bacia ou sub-bacia hidrográfica. Como exemplo, refira-se o caso de estudo de duas bacias idênticas e localizadas na mesma região climática, quanto maior a área de drenagem, maior é o escoamento superficial direto. Do mesmo ponto de vista, se duas bacias hidrográficas tiverem a mesma área de drenagem, as diferenças no seu comportamento hidrológico manifestam-se devido à sua (diferente) forma:

- ✓ Bacias circulares: os afluentes convergem em secções muito próximas e elevam significativamente o escoamento nesses pontos de confluência (Ramos, 2005);
- ✓ Bacias estreitas e alongadas: os afluentes atingem o curso de água principal em pontos distintos e ao longo de toda a sua extensão (Ramos, 2005).

É por este motivo que as bacias circulares apresentam maior risco de desenvolvimento de cheias em caso de precipitações intensas, quando comparadas com bacias estreitas (Ramos, 2005).

Para analisar a forma geométrica da bacia hidrográfica em estudo usaram-se dois métodos/indicadores quantitativos: coeficiente de compacidade e o fator de forma.

3.2.3.1. Coeficiente de compacidade

O coeficiente de compacidade relaciona o perímetro da bacia com o perímetro de uma circunferência de igual área. É importante salientar que a “unidade” corresponde ao valor mínimo que o coeficiente de compacidade pode ter e significa que a bacia hidrográfica ou sub-bacia é circular, concluindo, quanto mais alongada for a bacia maior será o respectivo coeficiente de compacidade. Como o valor obtido foi de 3,02, e uma vez que excede a “unidade”, conclui-se que a sub-bacia em estudo é alongada.

Importa ainda referir que apenas com a análise neste coeficiente não se consegue prever a tendência para a ocorrência de cheias, pois outros fatores têm influência no desenvolvimento do caudal de ponta da cheia, tais como: a orografia, a geologia, o sistema de drenagem e o tipo de uso e ocupação do solo.

3.2.3.2. Fator de forma

Para se determinar o fator de forma calculou-se o valor do comprimento do curso de água principal para cada uma das sub-bacias em estudo. O comprimento do curso de água principal para as sub-bacias da “Quinta da Matinha” e da “Nova Leiria”, são respectivamente, 0,71 km e 0,24 km.

O valor obtido para o fator de forma é 0,4, o quer dizer que a bacia hidrográfica em estudo se encontra moderadamente sujeita a cheias. Porém é importante salientar que, conforme acontece com o coeficiente de compacidade, este valor por si só não é suficiente para prever a ocorrência de cheias.

3.2.4. Caraterização orográfica

A caracterização orográfica encontra-se descrita nos pontos seguintes, onde se retratam a altura média, o coeficiente de massividade, o coeficiente orográfico e a inclinação média do leito.

- Altura média:

Para a altura média, obteve-se um valor de 80,5 metros.

- Coeficiente de massividade:

O coeficiente de massividade (C_m) relaciona a altura média da bacia (h_m) com a área da bacia hidrográfica (A_b) e é determinado segundo a expressão (1) (Sousa *et al.* 2007).

$$C_m = \frac{h_m}{A_b} \quad (1)$$

O valor do coeficiente de massividade é de 1,74. O cálculo deste coeficiente por si só não é suficiente para concluir acerca do relevo, visto que bacias ou sub-bacias hidrográficas diferentes podem ter os mesmos valores quando a altura média e a área da bacia variam na mesma proporção. Assim, calculou-se o coeficiente orográfico.

- Coeficiente orográfico:

O coeficiente orográfico (C_o) corresponde ao produto da altura média da bacia (h_m), pelo coeficiente de massividade (C_m) e é determinado de acordo com a expressão (2) (Lencastre e Franco, 1992). Se este coeficiente apresentar um valor igual ou inferior a 6 indica que o relevo é pouco acentuado. Valores superiores a 6 caracterizam relevos acentuados. O valor do coeficiente orográfico é de 140,04, logo conclui-se que a bacia em estudo possui um relevo acentuado.

$$C_o = C_m \times h_m \quad (2)$$

- Inclinação média do leito:

A inclinação média do leito (I_m) consiste na relação entre o desnível existente entre a cabeceira do rio e a secção em estudo (Δ_H) e a extensão do mesmo (L), determinada de acordo com a seguinte expressão (4) (Sousa *et al.*, 2007).

$$I_m = \frac{\Delta_H}{L} \quad (4)$$

Para determinar a inclinação média do leito dividiu-se o resultado da diferença de cotas entre a cabeceira do curso de água principal da sub-bacia em estudo e a secção de referência da mesma pelo comprimento total do curso de água principal. A inclinação média do leito é de aproximadamente 4,7 %.

3.2.5. Caraterização geológica

No que respeita à caraterização geológica é importante destacar a relação entre a constituição geológica de uma bacia hidrográfica e a forma como a água se desloca nesse espaço. Partindo deste princípio, as caraterísticas geológicas e o tipo de substrato geológico (como solos argilosos e sedimentares, maciços rochosos fraturados, entre outros) podem influenciar bastante a velocidade de escoamento superficial e subterrâneo e por sua vez o valor do caudal de ponta de cheia assim como os fenómenos erosivos associados (Lencastre *et. al.*, 1992).

A caraterização geológica foi feita com base na intersecção da bacia hidrográfica com uma carta litológica (ATLAS, 2011) e concluiu-se que na bacia em estudo predominam algumas formações sedimentares relativas a períodos do PLIO-PLISTOCÉNICO (areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas), PLISTOCÉNICO (areias e cascalheiras), JURÁSSICO (conglomerados, arenitos, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas) e PALEOGÉNICO (arenitos, conglomerados, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas) distribuídas pela área de estudo conforme a Figura 42.

Antes da interceção foi realizado uma projeção das coordenadas da carta litológica (ATLAS, 2011) para as coordenadas pretendidas (*Datum 73 Hayford Gauss IPCC*).

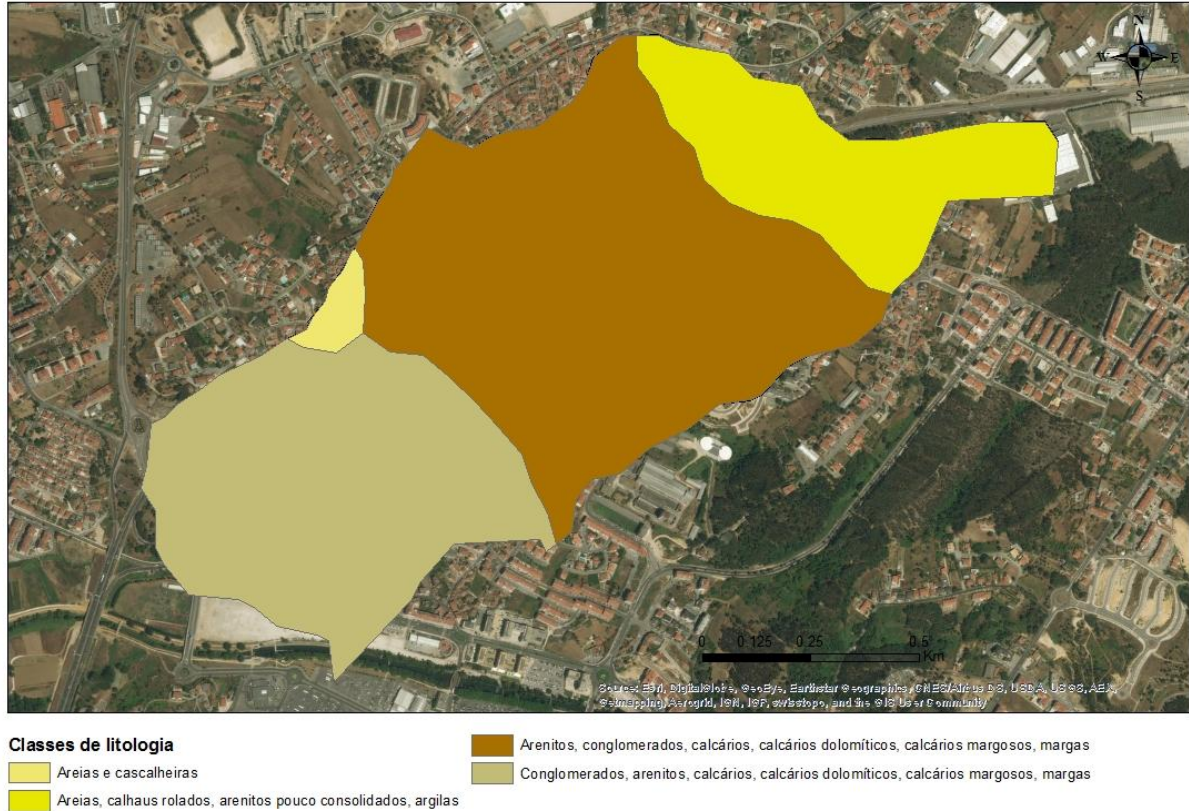


Figura 42 - Caracterização geológica da bacia

De acordo com Ramos (2005), as areias soltas têm permeabilidade elevada enquanto os calcários margosos e margas já têm permeabilidade reduzida ou inexistente. Quanto aos arenitos, a sua permeabilidade é variável e depende do grau de consolidação do material. A permeabilidade reduzida de um solo faz que a infiltração seja menor pelo que faz aumentar o escoamento superficial direto, podendo causar inundações.

3.2.6. Ocupação do solo

Numa primeira fase, procedeu-se à análise dos dados existentes para a área de estudo, relativos às cartas de ocupação do solo disponíveis, e embora existissem cartas de Corine Land Cover para os anos de 1990 e 2006, estas pela escala de representação em que são produzidas (área mínima de 5 hectares) não faria sentido a análise destas para a área de estudo. A carta de ocupação do solo de 1990 (COS90) também estava disponível para análise, no entanto a nomenclatura (classes de classificação da ocupação do solo) desta é diferente da carta de ocupação do solo disponível para o ano de 2007 (COS07), pelo que a sua comparação não se conseguiu estabelecer de forma direta, e não se analisou a dinâmica de evolução.

A análise da carta de ocupação do solo para o ano 2007 (COS07-DGT) procedeu-se no Arcmap 10.2 com a adição das shapefiles da COS07 e dos limites delimitados das sub-bacias QM e NL presentes na área em estudo. A carta de ocupação do solo de 2007 disponibilizada de forma gratuita pela DGT é a correspondente ao Nível 2 da nomenclatura de classificação¹, pelo que foi esta que foi analisada.

A análise da ocupação do solo, segundo o COS07 (Tabela 7) revela que a área de estudo encontra-se na sua maioria em área artificial (contribuindo esta porção de área como área impermeável), quer a referência seja à sub-bacia da Quinta da Matinha quer seja à sub-bacia da Nova Leiria. A área artificial inclui as áreas de tecido urbano e as áreas de indústria, comércio e transporte, que perfazem aproximadamente 70% da área da sub-bacia, para ambos os casos (QM e NL). Na sub-bacia da QM existe uma pequena fração de áreas agrícolas heterogéneas (aproximadamente 8%) contribuindo, juntamente com as áreas de florestas e Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea, para áreas permeáveis (aproximadamente 30%). Na sub-bacia de NL apenas aproximadamente 20% podem ser consideradas áreas permeáveis, com ocupadas por florestas e florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea (Figura 43).

¹A informação cartográfica da COS2007 encontra-se em formato vectorial e possui uma unidade mínima cartográfica de 1 ha. A nomenclatura é constituída por um sistema hierárquico de classes de ocupação/uso do solo, com cinco níveis, e possui 193 classes ao nível mais detalhado, sendo que este ficheiro possui apenas o nível 2 da nomenclatura.
Fonte: <http://snig.dgterritorio.pt/portal/>

Tabela 7 - Áreas de uso e ocupação do solo segundo a COS_07 na área de estudo (sub-bacias de QM e NL).

| Carta de Uso e Ocupação do Solo de 2007 (COS 07) | | | | | | |
|--|--------|--|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| | COS N2 | COSN2 (LEGENDA) | QM (km ²) | QM (%) | NL (km ²) | NL (%) |
| Nível 1 Área Artificial | 1.1 | Tecido urbano | 62,3 | 63,5 | 19,9 | 47,2 |
| | 1.2 | Indústria, comércio e transportes | 7,6 | 7,7 | 13,6 | 32,3 |
| Nível 1 Área Agrícola | 2.4 | Áreas agrícolas heterogêneas | 8,1 | 8,3 | ---- | --- |
| Nível 1 Área Florestal | 3.1 | Florestas | 8,2 | 8,4 | 3,6 | 8,5 |
| | 3.2 | Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea | 11,9 | 12,1 | 5,1 | 12,1 |
| | | Área (km²) | 0,98 | | 0,42 | |

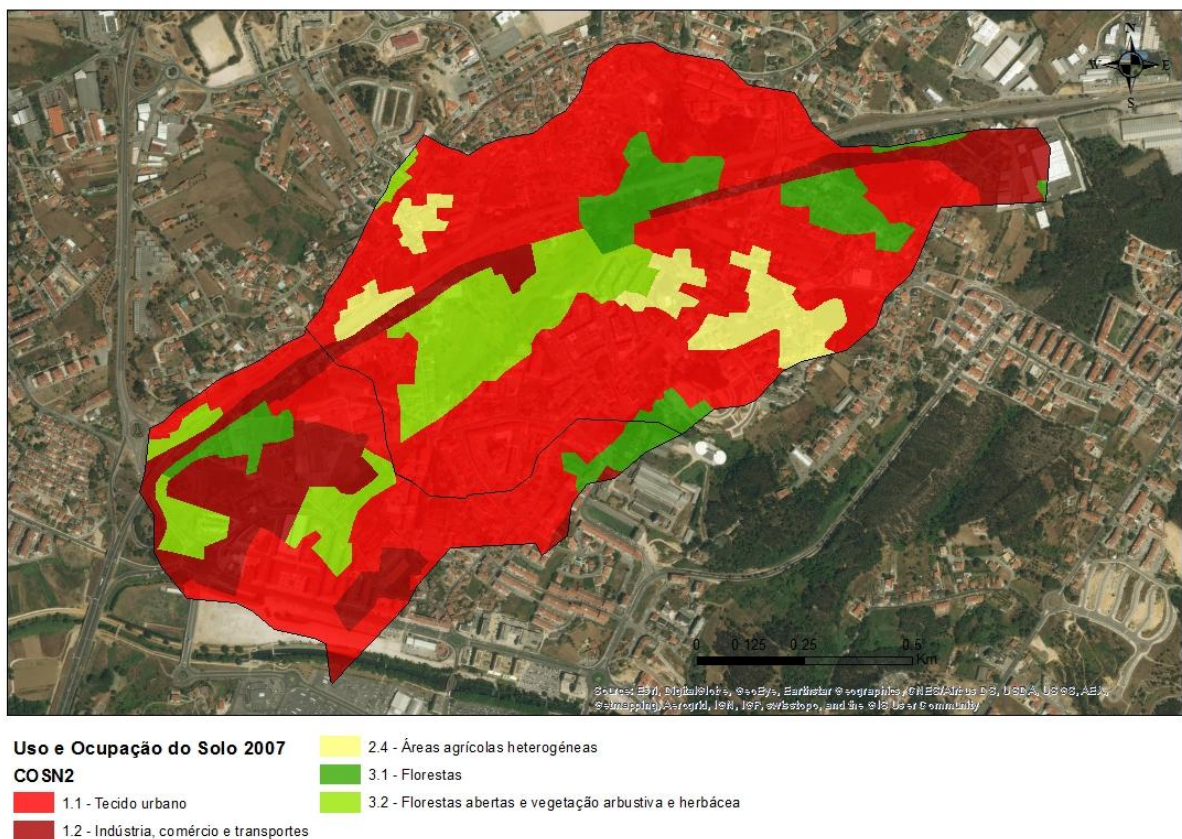


Figura 43 - Carta de uso e ocupação do solo de 2007 (nível 2; fonte DGT) da área de estudo.

3.3. Modelação hidrológica

3.3.1. Modelo de simulação hidrológica

O *software* HEC-HMS combina três componentes (HEC, 2000b):

- Modelo de bacia;
- Modelo de precipitação;
- Especificações de controlo.

Estas três componentes são combinadas numa simulação individual para o cálculo do valor do escoamento nas secções terminais das subunidades hidrológicas e ao longo dos segmentos de linha de água e suas junções. Variadas simulações podem ser conseguidas para diferentes variantes de um mesmo modelo hidrológico (HEC, 2000b).

3.3.1.1. Modelo de bacia

A modelação hidrológica foi gerada no *software* HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), versão 4.1, no seguimento da utilização do *software* ArcGis. Selecionou-se este *software* por ser bastante versátil na seleção dos modelos e dados a integrar, por ter uma interface gráfica bastante evoluída e por ser de domínio público. O *software* HEC-HMS executa a transformação de ficheiros digitais necessários como estrutura base ao modelo hidrológico, assim como a extração de alguns parâmetros adicionais que a compõe. Esta opção permite uma boa ligação entre o SIG e o programa informático de modelação hidráulica. Os seus resultados, podem ser utilizados de forma independente ou em conjunto com outros *softwares* para cálculo de disponibilidade de água, drenagem urbana, previsão de escoamentos, previsão de impactos de urbanizações, redução de danos provocados por cheias, entre outras aplicações (HEC, 2000b).

Este programa contém quatro componentes elementares (HEC, 2000b):

- Um módulo analítico para cálculo de escoamento sobre a superfície e escoamento em canal, que inclui variados algoritmos para solução das diferentes componentes dos modelos de bacia hidrográfica;
- Um sistema de armazenamento e gestão de informação, em particular de vastos conteúdos de variáveis temporais;
- Uma componente de tratamento e apresentação de resultados dos modelos hidrológicos, possibilitando, até, calibrações iterativas adaptáveis;
- Um sistema de representação e interação gráfico bastante evoluído (GUI – Graphical User Interface), que ilustra as variadas componentes do sistema hidrológico de uma forma bastante interativa e aceitando, já, informação georreferenciada (possuindo localização geográfica própria, implicitamente).

Como limitações deste software podem-se referir (HEC, 2000b):

- A estabilidade dos parâmetros que integram os diferentes modelos que caracterizam a bacia hidrográfica ao longo de uma simulação, tornando assim necessária a geração de modelos, por exemplo, sazonais;
- A incapacidade de processar redes de drenagem não dendríticas, ou seja, as redes devem apresentar-se como fractais (ramificação em árvore).

O software HEC-HMS exige do utilizador a inserção de vários elementos e características do terreno, em particular as respeitantes à bacia hidrográfica e rede de drenagem da região em estudo. Este conjunto de características é incorporado num modelo de bacia (HEC, 2000b).

O reconhecimento de subunidades hidrológicas e dos respetivos segmentos de linha de água, bem como a conectividade da rede de drenagem ou a extração de parâmetros integrantes de modelos, são inputs necessários a esse mesmo modelo de bacia (HEC, 2000b).

Assim, a caracterização geométrica da bacia hidrográfica, no que diz respeito ao delinear da sua estrutura base, encontra-se concluída com o adicionar dos elementos mencionados (HEC, 2000b).

O modelo da bacia deve conter informação para a simulação (HEC, 2000b):

- Do escoamento direto;
- Das perdas de precipitação;
- Do escoamento base;
- Do escoamento em canal.

O modelo também permite a introdução de valores medidos ou registados de caudais ou hidrogramas, em associação com as suas respetivas localizações de determinação.

Para se obter os elementos necessários para a simulação hidrológica no software HEC-HMS, foi necessário extrair a informação geométrica das bacias hidrográficas em estudo no ArcGis, conforme demonstra a tabela 8.

Os resultados podem ser observados e analisados diretamente em hidrogramas, resultantes de tabelas do escoamento em função do tempo. É de salientar que estes valores podem ser alvo de calibração. Ao longo dos vários passos do programa vai sendo possível observar os resultados cumulativos da informação carregada nos modelos através da interface gráfica do utilizador. Assim, este pode corrigir a tempo qualquer um dos inputs introduzidos ou das interpretações geradas (HEC, 2000b).

Tabela 8 - Elementos retirados no ArcGis para a caracterização da zona de estudo

| | Sub-bacia “Quinta da Matinha” | Sub-bacia “Nova Leiria” |
|--|--|--|
| Área da bacia | 0,98 km ² | 0,42 km ² |
| Percentagem da área impermeável da bacia (edificado CAD) | 18,27% | 20,62% |
| Percentagem da área permeável da bacia (edificado CAD) | 81,73% | 79,38% |
| Tipo de ocupação do solo na bacia (CLC06) | <p>1.1.2. Tecido urbano descontínuo = 71,13% (percentagem de área impermeável = 71,13%)</p> <p>2.4.3. Agricultura com espaços naturais e seminaturais = 27,08%</p> <p>3.1.3. Florestas mistas = 1,79% (percentagem de área permeável = 28,87%)</p> | <p>1.1.2. Tecido urbano descontínuo = 94,84% (percentagem de área impermeável = 94,84%)</p> <p>2.1.2. Culturas temporárias de regadio = 3,37%</p> <p>3.1.3. Florestas mistas = 1,79% (percentagem de área permeável = 5,16%)</p> |
| Tipo de ocupação do solo na bacia (COS07) | <p>1.1. Tecido urbano = 63,48%</p> <p>1.2. Indústria, comércio e transportes = 7,73% (percentagem de área impermeável = 71,21%)</p> <p>2.4. Áreas agrícolas heterogéneas = 8,28%</p> <p>3.1. Floresta = 8,40%</p> <p>3.2. Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea = 12,12% (percentagem de área permeável = 28,79%)</p> | <p>1.1. Tecido urbano = 47,19%</p> <p>1.2. Indústria, comércio e transportes = 32,28% (percentagem de área impermeável = 79,47%)</p> <p>3.1. Floresta = 8,46%</p> <p>3.2. Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea = 12,08% (percentagem de área permeável = 20,53%)</p> |

| | | |
|--|---------|---------|
| Comprimentos das linhas de água | 0,71 km | 0,24 km |
|--|---------|---------|

3.3.1.2. Modelo de Precipitação

O programa informático HEC-HMS modela, genericamente, a transformação de precipitação em escoamento superficial. Os modelos incluídos são exclusivamente determinísticos e embora permita a modelação hidrológica pela recente introdução de um modelo de perdas contínuo (SMA – Soil Moisture Accounting), trata-se de um software tradicionalmente vocacionado para a modelação de eventos (Portela, 2005).

Os valores de precipitação, e eventualmente a sua distribuição sobre a região, devem ser especificados no modelo de precipitação. Esta informação pode ser histórica ou hipotética. O software HEC-HMS é capaz de interpretar valores de precipitação numa variedade de formatos, incluindo rasters de precipitação, usados para a deteção desta por radar e satélite, valores espaciais médios, como os gerados em análises ponderadas, e informação recolhida em campo associada à sua localização geográfica (Portela, 2005).

3.3.1.3. Especificações de controlo

As especificações de controlo facultam ao modelador o estabelecimento de variáveis temporais, como seja o intervalo de cálculo desejado (Portela, 2005):

- Estabelecimento das precipitações do projeto;
- Atribuição de hietogramas (padrões temporais) às precipitações do projeto;
- Cálculo das perdas de precipitação (perdas iniciais e contínuas).

Os modelos de perda de precipitação mais implementados no HEC-HMS são (Portela, 2005):

- Perda inicial e perda contínua com intensidade constante;
- Perda calculada com base no modelo do Soil Conservation Service (SCS) que faz intervir o escoamento, CN (Curve Number);
- Modelo de Green-Ampt para a infiltração.

No cálculo dos dados das precipitações máximas, torna-se essencial o conhecimento da relação entre o conhecimento das características fundamentais da precipitação: intensidade, duração e frequência.

O período de retorno está relacionado com os parâmetros **a** e **b** que por sua vez dependem da localização das sub-bacias Nova Leiria (NL) e Quinta da Matinha (QM). Neste sentido, como as sub-bacias em estudo pertencem à região de Leiria, de acordo com o zoneamento pluviométrico, estas estão inseridas na zona A conforme ilustra a figura 44.

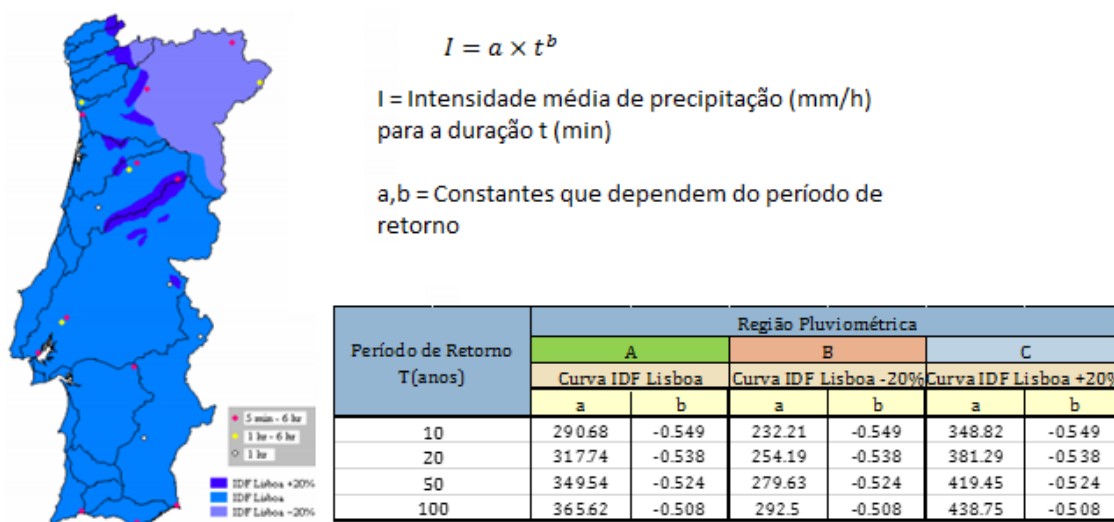


Figura 44 - Regiões Pluviométricas.

Fonte: Anexo IX DR 23-95

O uso das curvas IDF não é aplicável em grandes bacias hidrográficas ou quando o dimensionamento pretende ser mais rigoroso.

As curvas IDF apenas se aplicam à curva exponencial e quando o t não excede os 120 minutos, o que acontece neste caso, conforme se verifica na tabela 9

Tabela 9 - Valores de intensidade de precipitação.

| Instante (min) | Intensidade de Precipitação - Zona A | | | |
|-------------------|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| | Período de Retorno (anos) | | | |
| | 10 | 20 | 50 | 100 |
| 5 | 120,1381 | 133,6676 | 150,3961 | 161,4185 |
| 10 | 82,1136 | 92,0602 | 104,5916 | 113,5089 |
| 15 | 65,7266 | 74,0176 | 84,5717 | 92,3795 |
| 20 | 56,1241 | 63,4042 | 72,7373 | 79,8191 |
| 25 | 49,6531 | 56,2316 | 64,7107 | 71,2650 |
| 30 | 44,9237 | 50,9777 | 58,8146 | 64,9609 |
| 35 | 41,2783 | 46,9206 | 54,2507 | 60,0680 |
| 40 | 38,3605 | 43,6680 | 50,5845 | 56,1285 |
| 45 | 35,9585 | 40,9868 | 47,5569 | 52,8686 |
| 50 | 33,9376 | 38,7281 | 45,0025 | 50,1133 |
| 55 | 32,2074 | 36,7923 | 42,8102 | 47,7448 |
| 60 | 30,7051 | 35,1097 | 40,9021 | 45,6803 |
| 65 | 29,3850 | 33,6298 | 39,2220 | 43,8601 |
| 70 | 28,2135 | 32,3154 | 37,7281 | 42,2396 |
| 75 | 27,1648 | 31,1379 | 36,3886 | 40,7848 |
| 80 | 26,2192 | 30,0753 | 35,1785 | 39,4694 |
| 85 | 25,3609 | 29,1102 | 34,0786 | 38,2724 |
| 90 | 24,5774 | 28,2286 | 33,0730 | 37,1770 |
| 95 | 23,8586 | 27,4193 | 32,1492 | 36,1698 |
| 100 | 23,1961 | 26,6730 | 31,2966 | 35,2395 |
| 105 | 22,5830 | 25,9820 | 30,5066 | 34,3768 |
| 110 | 22,0136 | 25,3398 | 29,7719 | 33,5740 |
| 115 | 21,4829 | 24,7410 | 29,0865 | 32,8243 |
| 120 | 20,9867 | 24,1809 | 28,4450 | 32,1222 |

Os valores de intensidade de precipitação são calculados de acordo com a seguinte equação (7):

$$I = a (T) \times t^{b(T)} \quad (7)$$

Onde:

I – Intensidade média de precipitação (mm/h) para a duração t (min);

a,b – Constantes que dependem do período de retorno (10, 20, 50 e 100 anos)

Através dos valores de intensidade para cada período de retorno e duração da tabela 9 obteve-se a seguinte curva exponencial da Intensidade – Duração – Frequência (Gráfico 9).

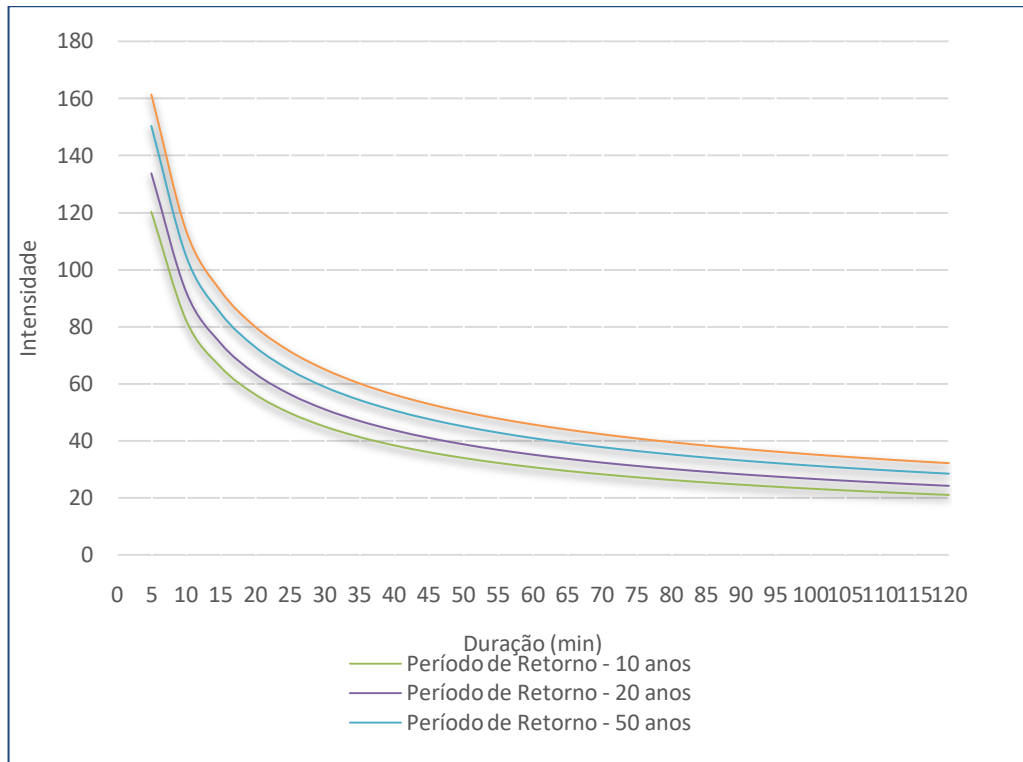


Gráfico 4 - Curva exponencial da Intensidade – Duração – Frequência

Período de retorno ou Tempo de recorrência T

O período de retorno de uma precipitação é T (11) quando o valor dessa precipitação é igualado ou excedido, em média, uma vez em cada intervalo T :

$$t = \frac{1}{f}$$

(11)

f – frequência da chuvada

É necessário o seguinte para a previsão de inundações a curto prazo: recolha de dados, sistemas transmissores e uma metodologia estimativa. Os sistemas são utilizados para transmitir dados de precipitação, nível e caudal, à medida que a ocorrência ocorre. As

estimativas são realizadas utilizando modelos matemáticos representando o comportamento das várias fases do ciclo da água.

Neste caso, é preciso estimar a precipitação que irá cair nas sub- bacias hidrográficas para cada período de retorno (10,20,50 e 100 anos), para a elaboração dos hietogramas.

Após a realização dos cálculos obteve-se as seguintes tabelas e hietogramas para os diferentes períodos de retorno.

⇒ Para período de retorno de 10 anos:

Tabela 10 - Valores obtidos para a construção do hietograma para um período de retorno de 10 anos.

| Tempo (min) | Intensidade da chuva (mm/h) | Altura da Chuva Acumulada (mm) | Incremento da Altura (mm) | Intervalo de Tempo | Precipitação (mm) |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|
| 5 | 120,1381 | 10,0115 | 10,0115 | 0 5 | 0,8173 |
| 10 | 82,1136 | 13,6856 | 3,6741 | 5 10 | 0,8601 |
| 15 | 65,7266 | 16,4316 | 2,7460 | 10 15 | 0,9100 |
| 20 | 56,1241 | 18,7080 | 2,2764 | 15 20 | 0,9690 |
| 25 | 49,6531 | 20,6888 | 1,9807 | 20 25 | 1,0403 |
| 30 | 44,9237 | 22,4619 | 1,7731 | 25 30 | 1,1287 |
| 35 | 41,2783 | 24,0790 | 1,6172 | 30 35 | 1,2422 |
| 40 | 38,3605 | 25,5737 | 1,4947 | 35 40 | 1,3952 |
| 45 | 35,9585 | 26,9689 | 1,3952 | 40 45 | 1,6172 |
| 50 | 33,9376 | 28,2813 | 1,3124 | 45 50 | 1,9807 |
| 55 | 32,2074 | 29,5235 | 1,2422 | 50 55 | 2,7460 |
| 60 | 30,7051 | 30,7051 | 1,1816 | 55 60 | 10,0115 |
| 65 | 29,3850 | 31,8338 | 1,1287 | 60 65 | 3,6741 |
| 70 | 28,2135 | 32,9157 | 1,0819 | 65 70 | 2,2764 |
| 75 | 27,1648 | 33,9560 | 1,0403 | 70 75 | 1,7731 |
| 80 | 26,2192 | 34,9589 | 1,0029 | 75 80 | 1,4947 |
| 85 | 25,3609 | 35,9279 | 0,9690 | 80 85 | 1,3124 |
| 90 | 24,5774 | 36,8661 | 0,9382 | 85 90 | 1,1816 |
| 95 | 23,8586 | 37,7761 | 0,9100 | 90 95 | 1,0819 |
| 100 | 23,1961 | 38,6602 | 0,8841 | 95 100 | 1,0029 |
| 105 | 22,5830 | 39,5203 | 0,8601 | 100 105 | 0,9382 |
| 110 | 22,0136 | 40,3582 | 0,8379 | 105 110 | 0,8841 |
| 115 | 21,4829 | 41,1755 | 0,8173 | 110 115 | 0,8379 |
| 120 | 20,9867 | 41,9734 | 0,7980 | 115 120 | 0,7980 |

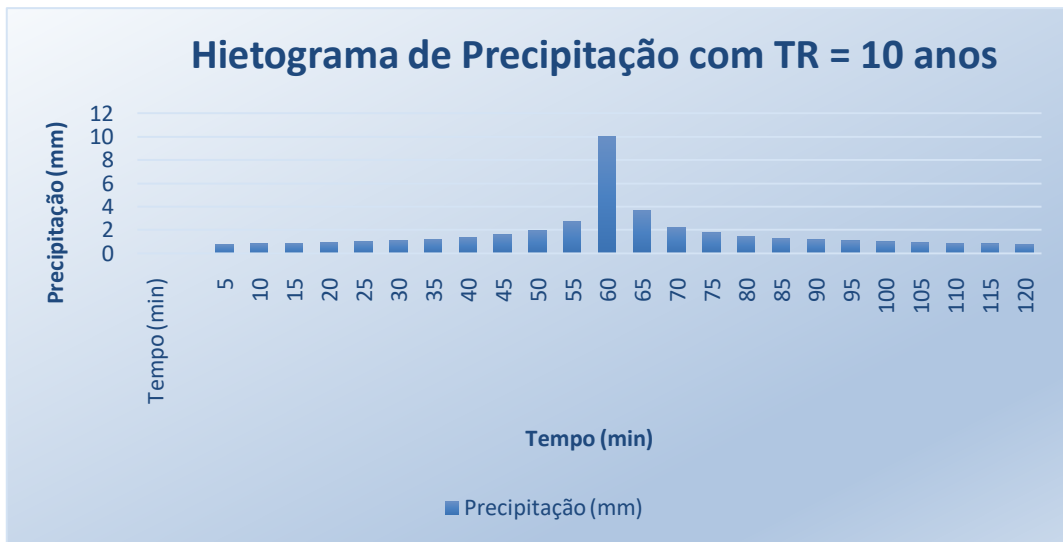


Gráfico 5 - Hietograma de Precipitação para período de retorno de 10 anos

⇒ Para período de retorno de 20 anos:

Tabela 11 - Valores obtidos para a construção do hietograma para um período de retorno de 20 anos

| Tempo (min) | Intensidade da chuva (mm/h) | Altura da Chuva Acumulada (mm) | Incremento da Altura (mm) | Intervalo de Tempo | Precipitação (mm) |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|
| 5 | 133,6676 | 11,1390 | 11,1390 | 0 5 | 0,9639 |
| 10 | 92,0602 | 15,3434 | 4,2044 | 5 10 | 1,0134 |
| 15 | 74,0176 | 18,5044 | 3,1610 | 10 15 | 1,0710 |
| 20 | 63,4042 | 21,1347 | 2,6303 | 15 20 | 1,1390 |
| 25 | 56,2316 | 23,4298 | 2,2951 | 20 25 | 1,2211 |
| 30 | 50,9777 | 25,4889 | 2,0591 | 25 30 | 1,3227 |
| 35 | 46,9206 | 27,3703 | 1,8815 | 30 35 | 1,4529 |
| 40 | 43,6680 | 29,1120 | 1,7417 | 35 40 | 1,6280 |
| 45 | 40,9868 | 30,7401 | 1,6280 | 40 45 | 1,8815 |
| 50 | 38,7281 | 32,2734 | 1,5333 | 45 50 | 2,2951 |
| 55 | 36,7923 | 33,7263 | 1,4529 | 50 55 | 3,1610 |
| 60 | 35,1097 | 35,1097 | 1,3834 | 55 60 | 11,1390 |
| 65 | 33,6298 | 36,4323 | 1,3227 | 60 65 | 4,2044 |
| 70 | 32,3154 | 37,7013 | 1,2690 | 65 70 | 2,6303 |
| 75 | 31,1379 | 38,9223 | 1,2211 | 70 75 | 2,0591 |
| 80 | 30,0753 | 40,1004 | 1,1780 | 75 80 | 1,7417 |
| 85 | 29,1102 | 41,2394 | 1,1390 | 80 85 | 1,5333 |
| 90 | 28,2286 | 42,3429 | 1,1035 | 85 90 | 1,3834 |
| 95 | 27,4193 | 43,4139 | 1,0710 | 90 95 | 1,2690 |
| 100 | 26,6730 | 44,4550 | 1,0411 | 95 100 | 1,1780 |
| 105 | 25,9820 | 45,4684 | 1,0134 | 100 105 | 1,1035 |
| 110 | 25,3398 | 46,4562 | 0,9878 | 105 110 | 1,0411 |
| 115 | 24,7410 | 47,4202 | 0,9639 | 110 115 | 0,9878 |
| 120 | 24,1809 | 48,3618 | 0,9416 | 115 120 | 0,9416 |



Gráfico 6 - Hietograma de Precipitação para período de retorno de 20 anos.

⇒ Para período de retorno de 50 anos:

Tabela 12 - Valores obtidos para a construção do hietograma para um período de retorno de 50 anos.

| Tempo (min) | Intensidade da chuva (mm/h) | Altura da Chuva Acumulada (mm) | Incremento da Altura (mm) | Intervalo de Tempo | Precipitação (mm) |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|
| 5 | 133,6676 | 11,1390 | 11,1390 | 0 5 | 0,9639 |
| 10 | 92,0602 | 15,3434 | 4,2044 | 5 10 | 1,0134 |
| 15 | 74,0176 | 18,5044 | 3,1610 | 10 15 | 1,0710 |
| 20 | 63,4042 | 21,1347 | 2,6303 | 15 20 | 1,1390 |
| 25 | 56,2316 | 23,4298 | 2,2951 | 20 25 | 1,2211 |
| 30 | 50,9777 | 25,4889 | 2,0591 | 25 30 | 1,3227 |
| 35 | 46,9206 | 27,3703 | 1,8815 | 30 35 | 1,4529 |
| 40 | 43,6680 | 29,1120 | 1,7417 | 35 40 | 1,6280 |
| 45 | 40,9868 | 30,7401 | 1,6280 | 40 45 | 1,8815 |
| 50 | 38,7281 | 32,2734 | 1,5333 | 45 50 | 2,2951 |
| 55 | 36,7923 | 33,7263 | 1,4529 | 50 55 | 3,1610 |
| 60 | 35,1097 | 35,1097 | 1,3834 | 55 60 | 11,1390 |
| 65 | 33,6298 | 36,4323 | 1,3227 | 60 65 | 4,2044 |
| 70 | 32,3154 | 37,7013 | 1,2690 | 65 70 | 2,6303 |
| 75 | 31,1379 | 38,9223 | 1,2211 | 70 75 | 2,0591 |
| 80 | 30,0753 | 40,1004 | 1,1780 | 75 80 | 1,7417 |
| 85 | 29,1102 | 41,2394 | 1,1390 | 80 85 | 1,5333 |
| 90 | 28,2286 | 42,3429 | 1,1035 | 85 90 | 1,3834 |
| 95 | 27,4193 | 43,4139 | 1,0710 | 90 95 | 1,2690 |
| 100 | 26,6730 | 44,4550 | 1,0411 | 95 100 | 1,1780 |
| 105 | 25,9820 | 45,4684 | 1,0134 | 100 105 | 1,1035 |
| 110 | 25,3398 | 46,4562 | 0,9878 | 105 110 | 1,0411 |
| 115 | 24,7410 | 47,4202 | 0,9639 | 110 115 | 0,9878 |
| 120 | 24,1809 | 48,3618 | 0,9416 | 115 120 | 0,9416 |

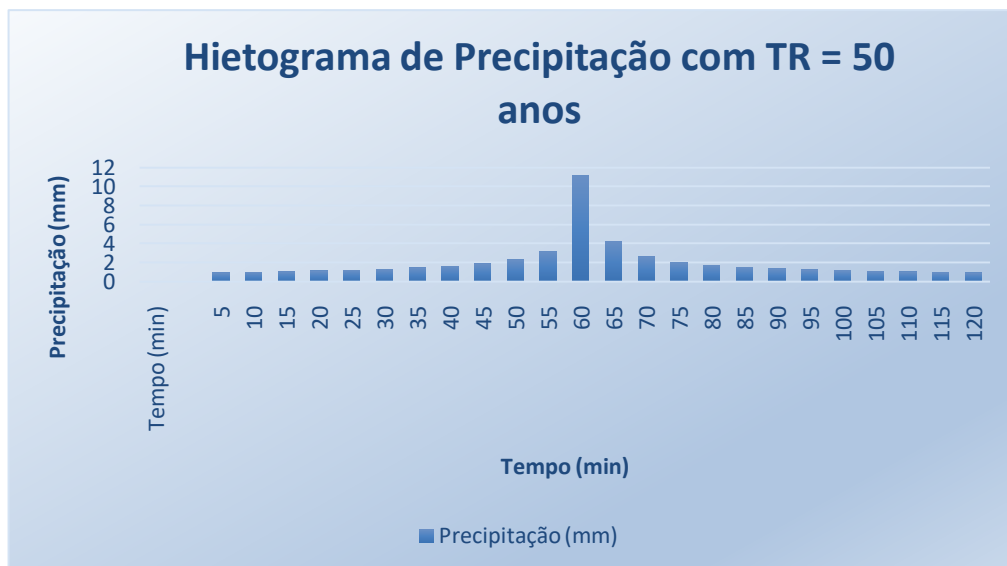


Gráfico 7 - Hietograma de Precipitação para período de retorno de 50 anos.

⇒ Para período de retorno de 100 anos:

Tabela 13 - Valores obtidos para a construção do hietograma para um período de retorno de 100 anos.

| Tempo (min) | Intensidade da chuva (mm/h) | Altura da Chuva Acumulada (mm) | Incremento da Altura (mm) | Intervalo de Tempo | Precipitação (mm) |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|
| 5 | 161,4185 | 13,4515 | 13,4515 | 0 5 | 1,3610 |
| 10 | 113,5089 | 18,9182 | 5,4666 | 5 10 | 1,4269 |
| 15 | 92,3795 | 23,0949 | 4,1767 | 10 15 | 1,5033 |
| 20 | 79,8191 | 26,6064 | 3,5115 | 15 20 | 1,5933 |
| 25 | 71,2650 | 29,6938 | 3,0874 | 20 25 | 1,7015 |
| 30 | 64,9609 | 32,4805 | 2,7867 | 25 30 | 1,8348 |
| 35 | 60,0680 | 35,0397 | 2,5592 | 30 35 | 2,0049 |
| 40 | 56,1285 | 37,4190 | 2,3793 | 35 40 | 2,2325 |
| 45 | 52,8686 | 39,6515 | 2,2325 | 40 45 | 2,5592 |
| 50 | 50,1133 | 41,7611 | 2,1096 | 45 50 | 3,0874 |
| 55 | 47,7448 | 43,7660 | 2,0049 | 50 55 | 4,1767 |
| 60 | 45,6803 | 45,6803 | 1,9143 | 55 60 | 13,4515 |
| 65 | 43,8601 | 47,5151 | 1,8348 | 60 65 | 5,4666 |
| 70 | 42,2396 | 49,2796 | 1,7644 | 65 70 | 3,5115 |
| 75 | 40,7848 | 50,9811 | 1,7015 | 70 75 | 2,7867 |
| 80 | 39,4694 | 52,6258 | 1,6448 | 75 80 | 2,3793 |
| 85 | 38,2724 | 54,2192 | 1,5933 | 80 85 | 2,1096 |
| 90 | 37,1770 | 55,7656 | 1,5464 | 85 90 | 1,9143 |
| 95 | 36,1698 | 57,2689 | 1,5033 | 90 95 | 1,7644 |
| 100 | 35,2395 | 58,7325 | 1,4636 | 95 100 | 1,6448 |
| 105 | 34,3768 | 60,1594 | 1,4269 | 100 105 | 1,5464 |
| 110 | 33,5740 | 61,5522 | 1,3928 | 105 110 | 1,4636 |
| 115 | 32,8243 | 62,9132 | 1,3610 | 110 115 | 1,3928 |
| 120 | 32,1222 | 64,2445 | 1,3313 | 115 120 | 1,3313 |

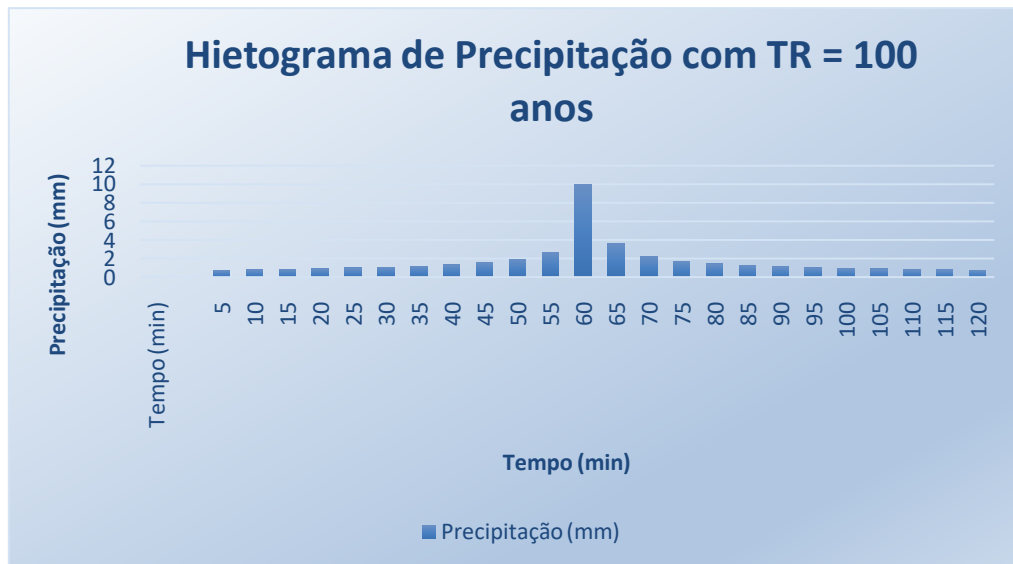


Gráfico 8 - Hietograma de Precipitação para período de retorno de 100 anos.

Procedeu-se à criação de hietogramas para os diferentes cenários tendo em conta, uma duração de chuvada de duas horas e um intervalo de tempo de cinco minutos. Como pode se verificar nos gráficos (6,7,8 e 9) para os vários cenários a precipitação atinge um pico aos 60 minutos e varia num intervalo de tempo consoante aumenta o tempo de retorno. Nas tabelas (10,11,12 e 13) pode se verificar a variação dos valores de precipitação ao longo do tempo. No período de retorno de 10 anos a precipitação atinge aos 120 minutos atinge um valor mínimo de 0,798 mm e aos 60 minutos atinge um valor máximo 10,0115 mm. No tempo de retorno de 20 anos a precipitação atinge aos 120 minutos atinge um valor mínimo de 0,9416 mm e aos 60 minutos atinge um valor máximo 11,1390 mm. No tempo de retorno de 50 anos a precipitação atinge aos 120 minutos atinge um valor mínimo de 0,9416 mm e aos 60 minutos atinge um valor máximo 11,1390 mm. No tempo de retorno de 100 anos a precipitação atinge aos 120 minutos atinge um valor mínimo de 1,3313 mm e aos 60 minutos atinge um valor máximo 13,4515 mm. Os valores de precipitação variam ao longo do tempo á medida que o tempo de retorno vai aumentando.

Seguidamente, com dados relativos à precipitação sobre as sub-bacias hidrográficas, é possível estimar o caudal através de um modelo matemático (HEC – HMS) simulando a conversão de precipitação em caudal.

3.3.2. Análise dos resultados do modelo de simulação hidrológica

Após a realização da modelação hidrológica no software HEC-HMS obtiveram-se os seguintes valores de caudal de ponta de cheia para os tempos de retorno de 10, 20, 50 e 100 anos conforme ilustra a tabela 14, 15, 16 e 17.

Tabela 14 - Resultados dos caudais de ponta de cheia para o período de retorno de 10 anos

| Caudais de Ponta de Cheia - Período de Retorno de 10 Anos | | | | |
|---|--------------------|---------------------|----------------------------|------------------------|
| Elementos Hidrológicos | Área de Drenagem | Fluxo | Tempo de Pico | Volume |
| | (km ²) | (m ³ /s) | | (1000 m ³) |
| Sub- bacia QM | 0,98 | 3,5 | 21 de abril de 2016, 02:35 | 15,91 |
| Troço QM | 0,98 | 2,8 | 21 de abril de 2016, 03:05 | 15,89 |
| Sub - bacia NL | 0,42 | 3,8 | 21 de abril de 2016, 02:30 | 37,50 |
| Junção - 1 | 1,40 | 5,6 | 21 de abril de 2016, 02:45 | 22,37 |

Tabela 15 -Resultados dos caudais de ponta de cheia para o período de retorno de 20 anos

| Caudais de Ponta de Cheia - Período de Retorno de 20 Anos | | | | |
|---|--------------------|---------------------|----------------------------|------------------------|
| Elementos Hidrológicos | Área de Drenagem | Fluxo | Tempo de Pico | Volume |
| | (km ²) | (m ³ /s) | | (1000 m ³) |
| Sub- bacia QM | 0,98 | 4,4 | 21 de abril de 2016, 02:35 | 20,14 |
| Troço QM | 0,98 | 3,6 | 21 de abril de 2016, 03:05 | 20,12 |
| Sub - bacia NL | 0,42 | 4,4 | 21 de abril de 2016, 02:30 | 43,83 |
| Junção - 1 | 1,40 | 6,7 | 21 de abril de 2016, 02:45 | 27,24 |

Tabela 16 - Resultados dos caudais de ponta de cheia para o período de retorno de 50 anos

| Caudais de Ponta de Cheia - Período de Retorno de 50 Anos | | | | |
|---|--------------------|---------------------|----------------------------|------------------------|
| Elementos Hidrológicos | Área de Drenagem | Fluxo | Tempo de Pico | Volume |
| | (km ²) | (m ³ /s) | | (1000 m ³) |
| Sub- bacia QM | 0,98 | 5,8 | 21 de abril de 2016, 02:35 | 26,20 |
| Troço QM | 0,98 | 4,7 | 21 de abril de 2016, 03:05 | 26,18 |
| Sub - bacia NL | 0,42 | 5,1 | 21 de abril de 2016, 02:30 | 52,30 |
| Junção - 1 | 1,40 | 8,3 | 21 de abril de 2016, 02:45 | 34,02 |

Tabela 17 - Resultados dos caudais de ponta de cheia para o período de retorno de 100 anos

| Caudais de Ponta de Cheia - Período de Retorno de 100 Anos | | | | |
|--|--------------------|---------------------|----------------------------|------------------------|
| Elementos Hidrológicos | Área de Drenagem | Fluxo | Tempo de Pico | Volume |
| | (km ²) | (m ³ /s) | | (1000 m ³) |
| Sub- bacia QM | 0,98 | 7,0 | 21 de abril de 2016, 02:35 | 31,74 |
| Troço QM | 0,98 | 5,6 | 21 de abril de 2016, 03:05 | 31,70 |
| Sub - bacia NL | 0,42 | 5,7 | 21 de abril de 2016, 02:30 | 59,62 |
| Junção - 1 | 1,40 | 9,7 | 21 de abril de 2016, 02:45 | 40,08 |

Na modelação hidrológica os valores de caudal de ponta de cheia e o volume de caudal nos elementos hidrológicos (Sub-bacia QM, Troço QM, Sub-bacia NL, Junção-1) aumentam com o aumento dos tempos de retorno (10, 20, 50 e 100 anos). Como o percurso do curso da ribeira em análise é de montante (Sub-bacia QM) para jusante (Junção-1) os valores do caudal aumentam à medida do seu escoamento.

O aumento do caudal de ponta de cheia devido ao aumento da área impermeabilizada resultante de uma maior ocupação urbana da bacia pode ser muito acentuado, quanto maior é o período de retorno. O que contribui também para o aumento do caudal de ponta de cheia é a redução das perdas de precipitação. Verifica-se também, que os aumentos do do caudal de ponta de cheia, principalmente para um maior período de retorno analisado, deriva da diminuição do tempo de concentração, em virtude da maior área impermeável.

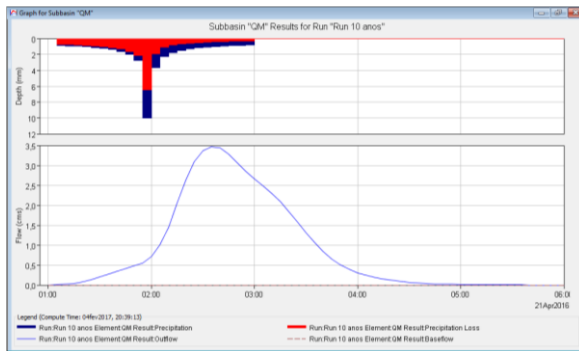
Para o período de retorno de 10 anos pode-se observar na sub-bacia da Quinta da Matinha o valor do fluxo e do volume atinge o seu pico às 2h35 de 3,5 m³/s e 15,91 m/m, respetivamente devido à intensidade da chuvada que atinge o valor máximo nessa hora e a área de drenagem ser mais pequena. No troço da Quinta da Matinha verifica-se que o valor máximo do fluxo é de 2,8 m³/s e o valor máximo de volume é de 15,89 m/m às 3h05. Na sub-bacia da Nova Leiria constata-se que existe um pico no fluxo e no volume de 3,8 m³/s e 37,50 m/m, respetivamente às 2h30 . Na junção observa-se que às 2h45 o fluxo e o volume atinge o seu máximo com um valor de 5,6 m³/s e 22,37 m/m, respetivamente.

Quanto ao período de retorno de 20 anos pode-se verifica-se na sub-bacia da Quinta da Matinha o valor do fluxo e do volume atinge o seu pico às 2h35 de 4,4 m³/s e 20,14 m/m, respetivamente devido à intensidade da chuvada que atinge o valor máximo nessa hora e a área de drenagem ser mais pequena. No troço da Quinta da Matinha observa-se que o valor máximo do fluxo é de 3,6 m³/s e o valor máximo de volume é de 20,12 m/m às 3h05. Na sub-bacia da Nova Leiria constata-se que existe um pico no fluxo e no volume de 4,4 m³/s e 43,83 m/m, respetivamente às 2h30. Na junção observa-se que às 2h45 o fluxo e o volume atinge o seu máximo com um valor de 6,7 m³/s e 27,24 m/m.

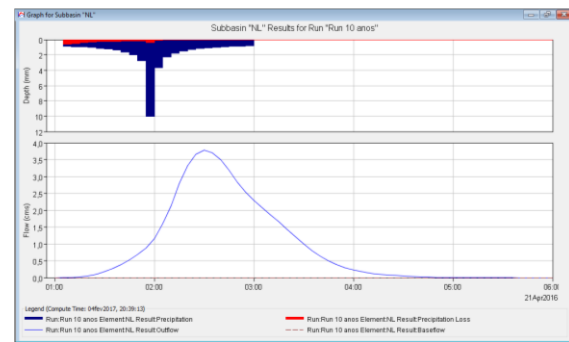
Relativamente ao período de retorno de 50 anos pode-se verifica-se na sub-bacia da Quinta da Matinha o valor do fluxo e do volume atinge o seu pico às 2h35 de 5,8 m³/s e 26,20 m/m, respetivamente devido à intensidade da chuvada que atinge o valor máximo nessa hora e a área de drenagem ser mais pequena. No troço da Quinta da Matinha observa-se que o valor máximo do fluxo é de 4,7 m³/s e o valor máximo de volume é de 26,18 m/m às 3h05. Na sub-bacia da Nova Leiria constata-se que existe um pico no fluxo e no volume de 5,1 m³/s e 52,30 m/m, respetivamente às 2h30. Na junção observa-se que às 2h45 o fluxo e o volume atinge o seu máximo com um valor de 8,3 m³/s e 34,02 m/m.

Por fim, no período de retorno de 100 anos pode-se verifica-se na sub-bacia da Quinta da Matinha o valor do fluxo e do volume atinge o seu pico às 2h35 de 7,0 m³/s e 31,74 m/m, respetivamente devido à intensidade da chuvada que atinge o valor máximo nessa hora e a área de drenagem ser mais pequena. No troço da Quinta da Matinha observa-se que o valor máximo do fluxo é de 5,6 m³/s e o valor máximo de volume é de 31,70 m/m às 3h05. Na sub-bacia da Nova Leiria constata-se que existe um pico no fluxo e no volume de 5,7 m³/s e 59,62 m/m, respetivamente às 2h30. Na junção observa-se que às 2h45 o fluxo e o volume atinge o seu máximo com um valor de 9,7 m³/s e 40,08 m/m.

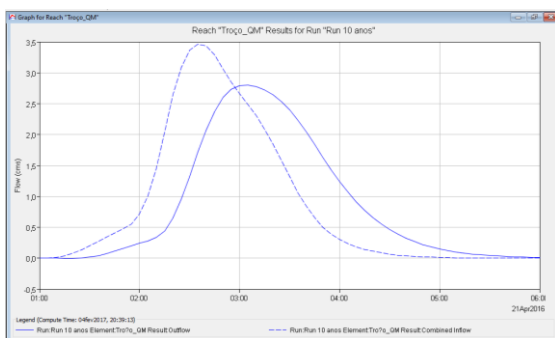
A partir da modelação hidrológica obtiveram-se os seguintes hidrogramas de cheia, correspondentes aos vários períodos de retorno.



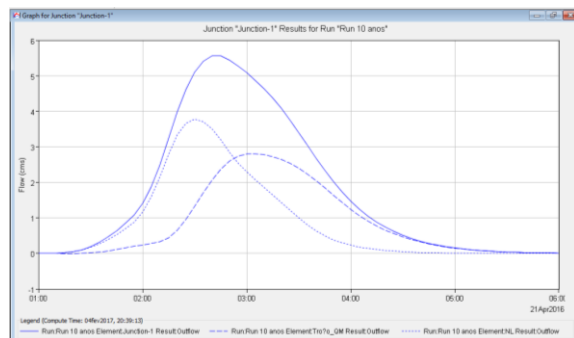
a) Sub-bacia da Quinta da Matinha



b) Sub-bacia da Nova Leiria

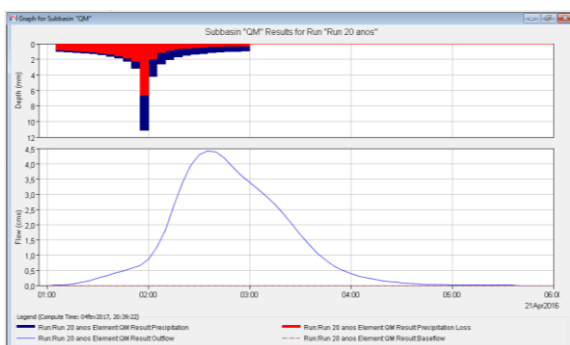


c) Troço da Quinta da Matinha

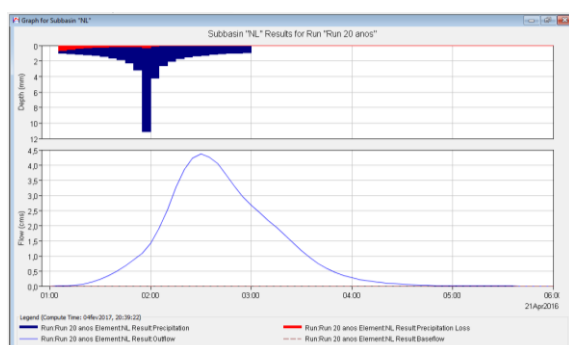


d) Junção -1

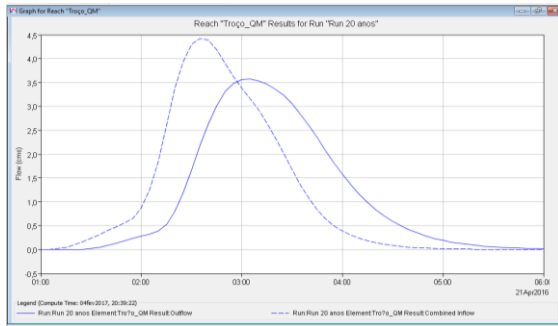
Figura 45 - Gráficos obtidos devido aos dados hidrológicos para um período de retorno de 10 anos



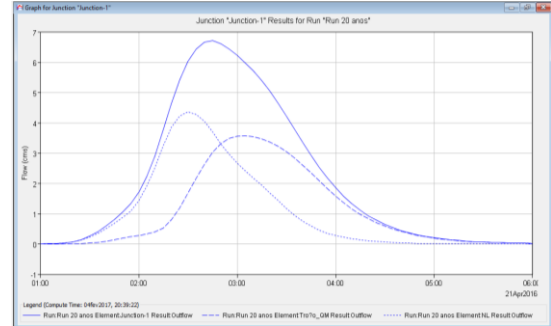
a) Sub – bacia da Quinta da Matinha



b) Sub – bacia da Nova Leiria

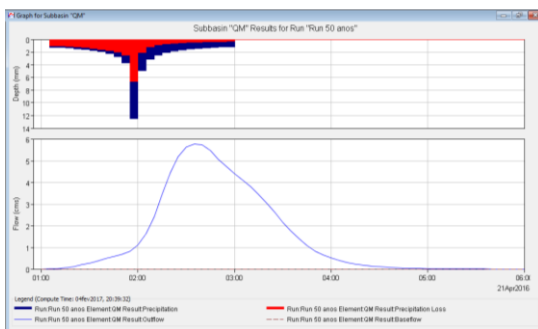


c) Troço da Quinta da Matinha

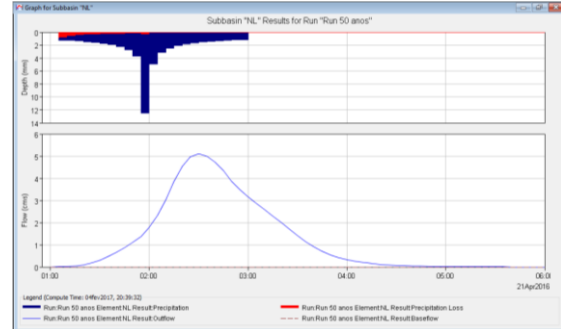


d) Junção - 1

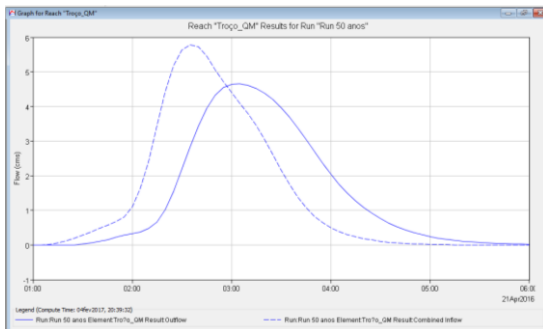
Figura 46 - Gráficos obtidos devido aos dados hidrológicos para um período de retorno de 20 anos



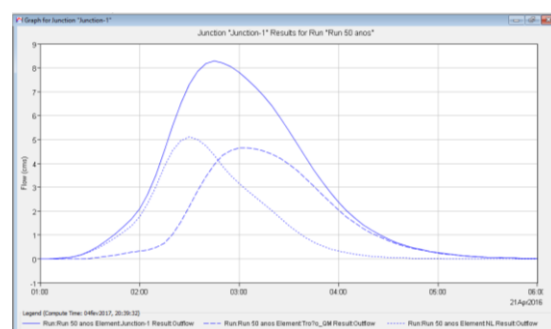
a) Sub – bacia da Quinta da Matinha



b) Sub – bacia da Nova Leiria

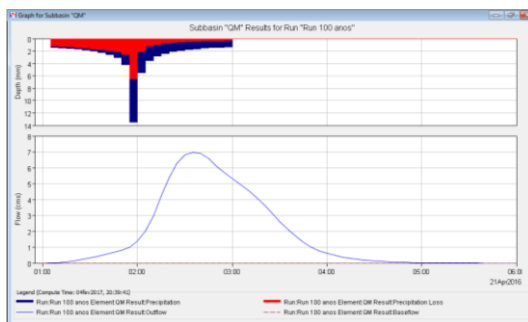


c) Troço da Quinta da Matinha

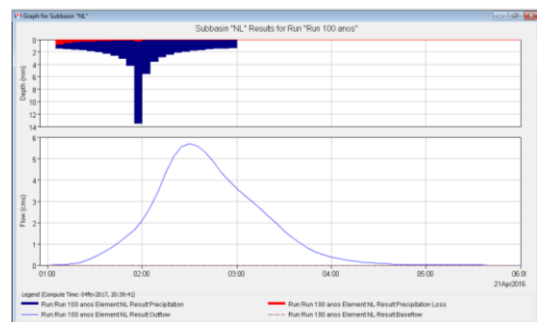


d) Junção - 1

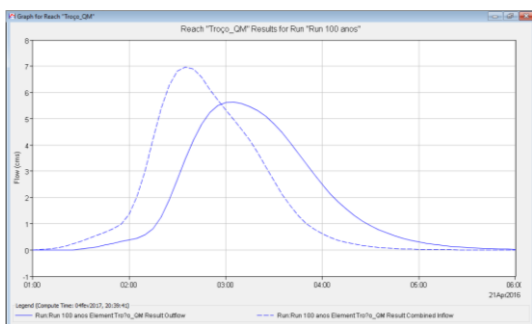
Figura 47 - Gráficos obtidos devido aos dados hidrológicos para um período de retorno de 50 anos



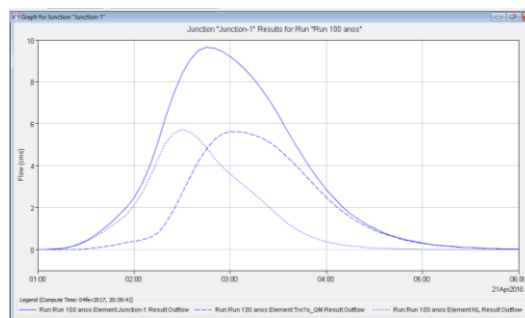
a) Sub – bacia da Quinta da Matinha



b) Sub – bacia da Nova Leiria



c) Troço da Quinta da Matinha



d) Junção - 1

Figura 48 - Gráficos obtidos devido aos dados hidrológicos para um período de retorno de 100 anos

As figuras 45 (a e b), 46 (a e b), 47 (a e b) e 48 (a e b) que mostram a profundidade da precipitação em função do tempo (horas) demonstram que há um pico da precipitação às 2 horas na sub-bacia da Quinta da Matinha e na sub-bacia da Nova Leiria em todos os períodos de retorno. Na sub-bacia da Quinta da Matinha existe uma maior perda da precipitação que se infiltra enquanto que na sub-bacia da Nova Leiria, acontece o contrário, existe uma menor perda da precipitação e conseqüentemente um aumento no valor do excesso da precipitação em todos os períodos de retorno. Nos gráficos que mostram o fluxo em função do tempo (horas) existe um pico no fluxo de saída entre as 2 horas e as 3 horas, começando logo a diminuir até atingir o valor nulo às 6 horas nas duas sub-bacias em todos os períodos de retorno.

Em todos os períodos de retorno pode-se verificar que a figura 45 (c), 46 (c), 47 (c) e 48 (c) que ilustra, o fluxo em função do tempo no troço da Quinta da Matinha há um pico no valor de fluxo de saída às 3 horas, decrescendo logo até atingir o valor nulo às 6 horas. Nos mesmos gráficos, pode-se observar que existe um pico no valor de fluxo de entrada entre as 2 horas e as 3 horas, decrescendo até às 6 horas e atingindo o valor nulo.

Por fim, as figuras 45 (d), 46 (d), 47 (d) e 48 (d) para todos os períodos de retorno que demonstram o fluxo em função do tempo na junção-1 pode-se verificar que há um pico no fluxo de saída no troço da Quinta da Matinha às 3 horas, na sub-bacia da Nova Leiria e na junção-1 entre as 2 horas e as 3 horas. Pode-se constatar que o valor de fluxo de saída atinge o seu máximo entre as 2 horas e as 3 horas porque é o elemento hidrológico que recebe todo o caudal vindo do troço da Quinta da Matinha e da sub-bacia da Nova Leiria.

Os resultados alcançados permitem afirmar que existe uma correlação forte e positiva entre o aumento das áreas impermeáveis e a diminuição do tempo de concentração do escoamento e respetivo transporte, e por inerência, o acréscimo das intensidades de precipitação. Esta relação de causa-efeito tem como resultado o aumento dos caudais de ponta de cheia.

Relativamente às sub-bacias da Nova Leiria e da Quinta da Matinha e de acordo com a metodologia de análise aplicada, conclui-se, assim, que o aumento do caudal de ponta de cheia devido ao aumento da área impermeabilizada resultante de uma maior ocupação urbana nas sub-bacias pode ser tanto maior, quanto mais elevado é o período de retorno. A diminuição das perdas de precipitação é o factor que mais contribui para o aumento do caudal de ponta de cheia. Contudo, os aumentos dos caudais que, especialmente para o maior período de retorno analisado, ocorrem exclusivamente da diminuição do tempo de concentração, em consequência da elevada incidência da área impermeável, são também consideráveis.

4. Conclusões

Esta dissertação tem como objetivo a modelação hidrológica e hidráulica da Ribeira do Amparo, em Leiria, com recurso a programas de modelação disponibilizados de forma gratuita e tendo como base Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Para a concretização deste estudo foram necessários, fundamentalmente, três tipos de dados de base: informação de natureza cartográfica para introdução na plataforma SIG, registos de precipitação recolhidos de estação de medição e valores de escoamento calculados à partir destes.

É de notar que um modelo hidrológico necessita de uma vasta quantidade de informação para serem representadas as características físicas e hidrológicas de uma bacia hidrográfica, contudo, se este mesmo modelo tiver em consideração fatores como a evaporação, infiltração e características fisiográficas da bacia em estudo, a quantidade de informação necessária aumentará bastante pois cada unidade hidrológica é caracterizada pela sua geometria, topografia, geologia, tipo, uso de solo e clima.

Para se realizar os objetivos propostos foi seguida uma metodologia que deu a conhecer a delimitação de uma bacia ou sub-bacia hidrográfica, neste caso as sub-bacias hidrográficas de Nova Leiria (NL) e Quinta da Matinha (QM), a estimativa do caudal de ponta de cheia e também, a produção das áreas de inundação para a zona em estudo (Ribeira do Amparo).

É então, conclusivo, que a delimitação das sub-bacias em estudo, nomeadamente de NL e QM, causam diferenças em termos qualitativos e em termos quantitativos, isto é, qualitativamente refiro-me à forma das sub-bacias hidrográficas e quantitativamente refere-se aos valores calculados. Por consequência, estas diferenças influem nos valores obtidos para o caudal de ponta de cheia para os diferentes tempos de retorno em consideração, conforme se pode visualizar nas tabelas 17, 18, 19 e 20.

Relativamente ao caudal de ponta de cheia, este é diferente nas duas sub-bacias para os diferentes tempos de retorno devido:

- Às incertezas dos componentes do escoamento superficial (na cartografia das linhas de água há uma zona que é interrompida porque a água é subterrânea);
- Ao número de escoamento segundo o método *Soil Conservation Soil*;

- Percentagem da área impermeável da bacia (foi utilizada a cartografia fornecida pela Câmara de Leiria) que depende do tipo de uso e ocupação do solo.

É também conclusivo que à medida que o tempo de retorno vai aumentando, o valor do caudal de ponta de cheia também vai aumentando.

No presente estudo verifica-se também que a um aumento das áreas impermeáveis corresponde uma diminuição do tempo de concentração do escoamento que se traduz num acréscimo das intensidades de precipitação e conseqüentemente num aumento dos caudais de ponta de cheia, e por isso, o aumento das áreas impermeáveis tem sido, muitas vezes, referida como uma das causas do aumento dos caudais de ponta de cheia e das cotas que definem zonas suscetíveis de inundação, especialmente após a ocorrência de cheias com prejuízos consideráveis.

Pretende-se que a presente dissertação também seja um contributo para o conhecimento do comportamento das bacias hidrográficas objeto de estudo dando, constituindo uma tomada de consciência da situação existente e efeitos ambientais da antropização do território, articulando manifestas preocupações patentes, designadamente, na Lei da Água, legislação sobre o Regime Jurídico dos Instrumentos de Gestão do Território (RJIGT), Lei de Bases Gerais da Política Pública de Solos, de Ordenamento do Território e de Urbanismo ou Decreto-Lei 115/2010, de 22 de Outubro - aprova o quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundações.

5. Propostas para desenvolvimentos futuros

Este trabalho pode contribuir como estudo preliminar, para um estudo mais aprofundado a ser integrado em planos de ordenamento do território para a zona urbana de Leiria, para a zona de estudo em causa – União das Freguesias de Marrazes e Barosa (bacia da Ribeira do Amparo), permitindo que possa apoiar um planeamento mais apropriado ao risco hidrológico (situações de risco).

As preocupações de análise/estudo da área de estudo revelam que é uma zona efetivamente com necessidade de intervenção a nível de controle de possíveis cheias e ocorrência de inundações nas zonas urbanas mais a jusante, e o presente estudo pode contribuir para a identificação de locais críticos onde intervir por forma a uma preservação e mitigação da perigosidade de eventos especialmente danosos, num contexto de alterações climáticas.

Bibliografia

Ackerman, C.; P.E., (2011), “*HEC-GeoRAS – GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS version 4.3.93*”, US - Army Corps of Engineers, USA.

Acreman, M.; Dunbar, M.J., (2004), *Defining environmental river flow requirements- a review*, Hydrology and Earth Systems Sciences.

Akan, A. O., et al., (2003), "*Urban Hidrology Hydraulics and Stormwater Quality - Engineering Application and computer Modeling*", John Wiley & Sons, ISBN: 0-471-43158-3, New Jersey, USA.

Ahmad, S. S., & Simonovic, S. P. (2013). *Spatial and temporal analysis of urban flood risk assessment*. Urban Water Journal.

Arthington, A.H.; Bunn, S.E.; Poff, N.L.; Naiman, R.J., (2006), *The challenge of providing environmental flow rules to sustain river systems*, Ecological Applications.

Bannerman, R., Considine, E. (2003). *Rain Gardens. A how-to manual for homeowners*. University of Wisconsin – Extension.

Barbosa, F., (2006), “*Medidas de Proteção e Controle de Inundações Urbanas na bacia do rio Mamanguape / PB*”, Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba.

Bartolo, E. (2006). *Aproveitamento da Água da Chuva em Edificações*. Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

Brown, R., (2005) *Impediments to integrated urban stormwater management: the need for institutional reform*, Environmental Management.

Burrough, P.A., (1998), *Dynamic modelling and geocomputation*. In: Longley, P.A.; Brooks, S.M.; McDonnell, R.; Macmillan, B.; ed. Geocomputation: a primer. Chichester, John Wiley & Sons.

Campar, A., et al., (1989), “*A Bacia Hidrográfica do Rio Lis - Contributo para o Estudo da Organização do Espaço e dos Problemas de Ambiente*”, CML, CCRC, Coimbra.

Carmo, J., (s.d.), “*Grandes barragens: vulnerabilidades e riscos*”, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.

- Correa, B.; Bahia, D.; Xavier, D., (s.d.), “*Controle de Inundações*”.
- Carvalho, D.F.; Silva, L.D.B., (2006), *Bacia Hidrográfica*, Hidrologia, capítulo 3.
- Cecílio, R.A.; Reis, E.F. (2006), *Apostila didática: manejo de bacias hidrográficas*. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Rural.
- Chow, V. T. (1956). *Hydrologic Studies of floods in the United States: Association Internatoionale d'Hydrologie*.
- Chow, V. T. (1964), *Handbook of applied hydrology*. Montagem por McGraw-Hill. New York.
- Cristofolletti, A., (1974), *Geomorfologia*, Edgard Blucher Ltda (Ed).
- D. Leggett; Brown, Brewer, Stanfield, Holliday, (2001), *Rainwater and Greywater use in buildings*, Londres.
- Dempsey, D. (2006). *The Greening of Stormwater*. Clean Water Fund American Rivers.
- Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro. Diário da República no 206 - 1ª Série. Lisboa. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.
- ESCAP/UNDP, (1991), *Manual and guidelines for comprehensive flood loss prevention and management*, UN-ESCAP, Bangkok, Thailand.
- Faustino, J. (1996), *Planificación y gestión de manejo de cuencas*. Turrialba: CATIE.
- Ferdinand, L. and Maidment, D.R., 1999. *Definition and connection of hydrologic elements using geographic data*. Journal of Hydrologic Engineering, Vol. January.
- Ferreira Soares, A; ALMEIDA, A. CAMPAR DE; CUNHA, LÚCIO; Marques, J Fonseca, (1989), *Proémio ao estudo do Baixo Mondego*, Biblos, Coimbra.
- Fletcher, T.; Deletic, A.; Mitchell, V.; Hatt, B., (2008), *Reuse of urban runoff in Australia: a review of recent advances and remaining challenges*, Journal of Environmental Quality.
- Gao, X., Sorooshian, S., and Goodrich, D.C., (1993), *GIS used for land phase hydrologic modeling*. In M.F. Goodchild, B.O. Parks, and L.T.Steyaert, eds., Environmental Modeling with GIS, New York:Oxford University Press.

Gomes, R., (2014a), “*Hidráulica Urbana*” – Departamento de Engenharia Civil, Politécnico de Leiria.

Gomes, R., (2014b), “*Precipitação, Caudal ponta de cheia*” – Departamento de Engenharia Civil, Politécnico de Leiria.

Gonçalves, P. (2012). A Delimitação de Perímetros de Inundação no Rio Leça - modelação hidráulica para duas áreas do concelho de Matosinhos Dissertação de Mestrado , Universidade do Porto, Faculdade de Letras.

Goonrey, C.M.; Lechte, P.; Perera, B.; Maheepala, S.; Mitchell, V., (2007), *Examining the technical feasibility of using stormwater as an alternative supply source within an existing urban area-A case study*, Australian Journal of Water Resources.

Hay, L.E., Battaglin, W.A., Parker, R.S., and Leavesley, G.H., (1993), *Modeling the effects of climate change on water resources in the Gunnison River Basin, Colorado*. In M.F. Goodchild, B.O. Parks, and L.T. Steyaert, eds, *Environmental Modeling with GIS*, New York: Oxford University Press.

Harris, J., Gupta, S., Woodside, G., and Ziemba, N., (1993), *Integrated use of a GIS and a 3-dimensional, finite-element model; San Gabriel Basin groundwater flow analysis*, In M.F. Goodchild, B.O. Parks, and L.T. Steyaert, eds., *Environmental Modeling with GIS*, New York: Oxford University Press.

HEC, 2000 b. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers, Davis, USA.

Hughes, D.A.; Hannart, P., (2003), *A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa*, Journal of Hydrology.

Hipólito, J. N., 1985. NWSIST: “*Um sistema de simulação contínua de processos hidrológicos*”, Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Inamdar, P.M.; Cook, S; Sharma, A.K; Corby, N; O’Connor, N.J; Perera, B.J.C, (2013), *A GIS based screening tool for locating and ranking of suitable stormwater harvesting sites in urban areas*.

Jenson, S.K. and Domingue, J.O., (1988), *Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.

Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). *Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*. The World Bank.

JSCWSC. (2009). *Evaluating Options for Water Sensitive Urban Design – A National Guide*. Joint Steering Committee for Water Sensitive Cities.

King, J.; Brown, C.; Sabet, H., (2003), *A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers*, River Research and Applications.

King, J.; Louw, D., (1998), *Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the building block methodology*, Aquatic Ecosystem Health and Management.

Lança, R., et al., (2001), *Hidrologia de Superfície*, Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve, Algarve.

Lança, R., (2004), *Desenvolvimento de um Modelo Hidrológico de Superfície à escala da Bacia Hidrográfica*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Algarve, Algarve.

Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M.; Saindon, L.G., (1983), *Precipitation-Runoff Modeling System – User's Manual*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report.

Leavesley, G.H.; Stannard, L.G., (1990), *Application of remotely sensed data in a distributed-parameter watershed model*. Proceedings of Workshop on Applications of Remote Sensing In Hydrology, National Hydrologic Research Centre, Environment Canada.

Lencastre, A., et al., (1992), *Lições de Hidrologia*, Universidade Nova de Lisboa, ISBN: 972-595-079-8, Lisboa.

Lencastre, A., e F. M. Franco. (2003), *Lições de Hidrologia*. 3a Edição. Montagem por Fundação Armando Lencastre. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa.

Lloyd, S.; Wong, T.; Chesterfield, C., (2001), *Opportunities and impediments to water sensitive urban design in Australia*. In: Proceedings of the Second South Pacific Stormwater Conference, Auckland, New Zealand.

Maidment, D.R., (1993), *GIS and hydrologic modeling*. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. *Environmental modeling with GIS*. New York, Oxford University Press.

Maidment, D. R., Djokic, D., 2000. *Hydrologic and hydraulic modelling support with geographic information systems*. ESRI Press, Redlands, California.

Marafuz, I. (2013). *Delimitação de perímetros de inundação através de Métodos Convencionais e de Modelos HidrológicoHidráulicos (Hec-Ras)*. In FLUP (Ed.), *Cadernos Cursos de Doutorado em Geografia*.

Matias, M., (2006). *Bacias de retenção, estudo de métodos de dimensionamento*. Dissertação de Mestrado. FEUP.

Matos, J. L., (2001), *Fundamentos de informação geográfica*. LIDEL – Edições técnicas, Lda. 3a Edição, Lisboa.

Matos, J., S., (2003). *Ambiente e Saneamento. Sistemas de Drenagem Urbana (versão provisória)*. ITS press, Lisboa.

McAlister, T. (2007). *National Guidelines for Evaluating Water Sensitive Urban Developments*. Queensland.

McCarthy, J., et al. (2008). *New Hampshire Stormwater Manual*. Comprehensive Environmental Inc.

Milhous, R.T.; Updike, M.A.; Schneider, D.M., (1989), *Physical Habitat Simulation System Reference Manual – Version II*, Instream Flow Information Paper No.26.U.S.Fishand Wildlife Service.

Molero, E., (2011), “*Manual Básico de HEC-GeoRAS 10 3ª edición*”, Universidad de Granada.

Moll, R., (2005), *Co-operation within Europe on flood management and spatial planning*. In: Szöllösi-Nagy, A. and Zevenbergen, C. [Eds.]. *Urban Flood Management*. A.A. Balkema Publishers.

Moore, I.D.; Turner, A.K.; Wilson, J.P.; Jenson, S.K.; Band, L.E., (1993), *Gis and land surfasse-subsurface porcess modeling*. In M.F. Goodchild, B.O. Parks, and L.t. Steyaert, eds *Environmental Modeling with Gis*, New York: Oxford Univertsity Press.

Morris, D.; Hargreaves, B.; Pazzaglia, F.; Weisman, R.; Williamson, C., (2004), *Assessing the interactive effects of landscape, climate, and UV radiation on river ecosystems: modeling transparency to UVR and the response of biota*, Workshop progress report, (Grant# R829642), Lehigh University Bethlehem, PA, USA.

Mourato, S.; Gomes, R.; Cruz, F., (sem data), “*Hidrologia e Recursos Hídricos*”, Instituto Politécnico de Leiria, Leiria.

Nanía, L., (2007), “*Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0. y HEC-GeoHMS 1.1.*”, Universidad de Granada.

O’Keeffe, J.; Hughes, D.A.; Tharme, R.; (2002), *Linking ecological responses to altered flows, for use in environmental flow assessments: the Flow Stressor-Response method*, Verhandlungen Internationale Vereinigung Limnologie.

Parry, M.L.; Canziani, O.F.; Palutikof, J.P.; van der Linden, P.J.; Hanson, C.E., Eds., Climate change (2007), *Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, IPCC. Summary for policymakers.

Pauleit, S.; Duhme, F., (2000), *Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning*, In: Landscape and urban planning.

Petts, G.E., (2009), *Instream flow science for sustainable river management*, Journal of the American Water Resources Association.

PDML, (2010), “*Revisão do Plano Diretor Municipal de Leiria- Volume I*”.

Portela, M. M., (2000), *Hydrologic aspects related to flash floods. The Portuguese experience*. Euroconference 2000: Flash floods, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Portela, M. M., (2015), *Modelação Hidrológica. (Documento de apoio), Texto de apoio à disciplina de Modelação e Planeamento de Recursos Hídricos do 4º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico, IST, Lisboa.

Portela, M. M. (2008). *Modelação Hidrológica - Texto de apoio à disciplina de Modelação e Planeamento de Recursos Hídricos do 4º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.

Porto, R.; Filho, K.; Silva, R., (1999), “*Bacias Hidrográficas*”, Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária – Hidrologia Aplicada.

Ramos, C. (1994). *Condições geomorfológicas e climáticas das cheias da Ribeira de Tera e do Rio Maior (bacia hidrográfica do Tejo)*. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, Faculdade de Letras.

Ramos, C., (2005), *Programa computacional de Hidrogeografia*, Linha de Investigação em Dinâmica Litoral e Fluvial da Universidade de Lisboa, Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa, ISBN: 972-636-159-1, Lisboa.

Ribeiro, Prof. Doutor Eng. A. Álvares. (1987), *Hidráulica Aplicada - Hidrologia Águas Superficiais*. Porto: Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia Laboratório de Hidráulica.

Richter, B.D.; Baumgartner, J.V.; Wigington, R.; Braun, D.P., (1997), *How much water does a river need?*, Fresh water Biology.

Rocha, J., (s.d.), “*Os riscos das inundações e a sua gestão. Uma visão nacional e uma visão europeia*”.

Rundquist, D.C., Petres, A.J., Di, L., Rodekohl, D.A., Ehrman, R.L., and Murray, G., (1991), *Statewide groundwater-vulnerability assessment in Nebraska using the DRASTIC/GIS model*, Geocarto International.

Santana, D.P. (2003), *Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 30).

Santos et al, (s.d.), “*Os Sistemas de Informação Geográfica na Modelação Hidrológica*”, Escola Superior de Tecnologia e Gestão.

Saraiva, M. G., & Carvalho, L. (2009). *Risco de Inundação : Metodologia para formulação do indicador Riprocity no* 4. Paper presented at the Rios e Cidades: Oportunidades para a Sustentabilidade Urbana, Lisboa.

SCS, (1975), *Urban Hydrology for Small Watersheds*, Washington. U.S. Dept. of Agriculture Technical Release.

Secção de Hidráulica e Recursos Hídricos , (2004), *Hidráulica Geral 1*. Porto: Faculdade de Engenharia da Faculdade do Porto.

Secção de Hidráulica e Recursos Hídricos , (2004), *Hidráulica Ge ral 2*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Shaw, E. M., (1994), *Hydrology in Practice*, Chapman & Hall, 3^a ed., ISBN: 0-412-48290-8 London.

Singh, JP; Singh, D; Litoria, PK, (2009), *Selection of suitable sites for water harvesting structures in Soankhad watershed, Punjab using remote sensing and geographic*

informa-tion system (RS&GIS) approach: a case study, Journal of Indian Society of RemoteSensing.

Silva, D., (2008), “*Integração de Ferramentas de SIG na Modelação Hidrológica de Pequenas Bacias Hidrográficas*”, Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia do Ambiente (área de especialização de Tratamento de Águas e Águas Residuais), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Soares, A., Pereira, B., Santos, C., Ramos, C., Oliveira, P., & Vaz, T. (2005), *Inundações Urbanas: O caso das Ruas de Sta. Marta, S. José e Portas de Sto Antão (Lisboa)*, Paper presented at the X Colóquio Ibérico de Geografia, Évora.

Soares, J. V.; Rennó, C. D., (2000), *Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental*, Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas, Ministério para a Ciência e Tecnologia, Brasil.

Souza, G. M., & Romualdo, S. S. (2009). *Inundações urbanas: A Percepção Sobre a Problemática Socioambiental pela Comunidade do Bairro Jardim Natal Juiz de Fora (MG)*.

Sousa, O.; Sena S., (2007), *Estudos de intervenção para as Linhas de Água do Concelho do Porto - Estudo hidráulico e hidrológico para a ribeira da Ervilheira*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Câmara Municipal do Porto.

Steyaert, L.T.; Goodchid, M.F., (1993), *Integrating Geographic Information Systems and Environmental Simulation Models: A Satus Review*.

Summerfield, M. (1991). *Global Geomorphology: an introduction of the study of landforms*. Essex: Longman Scientific & Technical.

Swartz, K., Belan, G. (2010). *Low Impact Development Manual for the Lower Maumee and Ottawa River Watersheds*. American Rivers.

Taylor, A., Wong, T. (2002). *Non-structural stormwater quality best management practices – An overview of their use, value, cost and evaluation*. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology.

Tennant, D.L., (1976), *Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources*, Fisheries.

Teodoro, V. L. I., et al., (2007), *O Conceito de Bacia Hidrográfica e a Importância da Caracterização Morfométrica para Entendimento da Dinâmica Ambiental Local*, Revista Uniara, N°20.

Tharme, R.E., (2003), *A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers*, River Research and Applications.

Tingsanchali, T., (2011), *Urban flood disaster management*.

Tonello, K. C., (2006), *Análise Hidroambiental da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas*, Universidade Federal de Viçosa, Doutorado em Ciências Florestais, Viçosa.

Tucci, C. E. M., & Bertoni, J. C. (2003). *Inundações Urbanas na América do Sul*.

Tucci, C. E. M., et al., (1998), *Drenagem Urbana e Controle da Erosão*, Simpósio Nacional de Controle da Erosão, São Paulo.

Tucci, C.E.M, (1998), *Modelos Hidrológicos*, Ed. da Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre.

Tucci, E.M.C, (2007), *Urban Flood Management*.

Tucci, C.E.M.; Genz, F., (1994), *Medidas de controle de inundações* in: Estudos Hidrossedimentológicos do Alto Paraguai, IPH/MMA.

Tucci, C.E.M; ORDONEZ, J.S; SIMÕES, M.L., (1981), *Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II Alguns Resultados*, Anais IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH Fortaleza.

UNESCO, (1995), *Fighting floods in cities*; Project training material for disaster reduction; Report, Delft, Holland.

USEPA. (1999). Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices. United States Environmental Protection Agency.

Victorian Stormwater Committee. (1999). *Urban Stormwater: Best Practice Environmental Management Guidelines*. CSIRO Publishing, Victoria.

Villela, S. M. & Mattos, A., (1975), *Hidrologia Aplicada*, Mc Graw Hill, São Paulo.

Wanielista, M. P., (1990), *Hidrology and Water Quality Control*, John Wiley & Sons (Ed), ISBN: 0-471-51743-7, New York.

Watershed Management Services. (s/ data). *A How-To Manual for Homeowners in the Municipality of Anchorage*. Municipality of Anchorage, Anchorage.

Whitehead, P.G.; Robinson, M., (1993), *Experimental basin studies: an international and historic perspective of forest impacts*, Journal de Hydrology.

Zêzere, J. L., Pereira, A. R., & Morgado, P. (2005). *Perigos Naturais e Tecnológicos no território de Portugal Continental*.

Sites consultados:

<http://www.lnec.pt> , consultado em 16 de Abril de 2015.

<http://www.emdat.be> , consultado em 8 de Fevereiro de 2016.

<http://riskam.ul.pt/> , consultado em 8 de Fevereiro de 2016.

<http://bit.ly/distribuicaoaguaplaneta>, consultado em 9 de Fevereiro de 2016.

<http://bit.ly/impactoinundacoes>, consultado em 9 de Fevereiro de 2016.

<http://bit.ly/impactoinundacoesbrasil2010>, consultado em 9 de Fevereiro de 2016.

<http://bit.ly/impactoinundacaobarreiro2016>, consultado em 9 de Fevereiro de 2016.

SMRC. (s/ data). *The Stormwater Manager's Resource Center* (<http://www.stormwatercenter.net/>), consultado em 13 de Fevereiro de 2016.

<http://bit.ly/cortetransversaltrincheira> , consultado em 15 de Fevereiro de 2016.

<http://bit.ly/ArcGIS91>, consultado a 18 de Fevereiro de 2016.

<http://bit.ly/ArcView32> , consultado a 18 de Fevereiro de 2016.

<http://bit.ly/HECGeoHMS> , consultado a 18 de Fevereiro de 2016.

<https://www.youtube.com/watch?v=VFlh-S2StVc>, consultado a 27 de Novembro de 2016.

<https://www.apambiente.pt/index.php?ref=19&subref=174>, consultado dia 28 de Janeiro de 2017.

APS, 2017: <http://www.segurancaonline.com/gca/?id=580>, consultado em 8 de Fevereiro de 2017.

[http:// bit.ly/diquesRioLis](http://bit.ly/diquesRioLis), consultado a 3 de Junho de 2017.

<http://www.snirh.pt/> , consultado a 29 de Agosto de 2017.

<https://www.apambiente.pt/?ref=16&subref=7&sub2ref=9&sub3ref=834> ,consultado a 29 de Agosto de 2017

<http://snig.dgterritorio.pt/portal/> , consultado a 23 de Setembro de 2017.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco