



Universidade de Coimbra  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Matemática

Dissertação de Mestrado em Engenharia Geográfica  
2012/2013

## **Modelação em SIG de um Sistema de Drenagem Superficial Urbano**

*Modelling in GIS of an Urban Superficial Drainage System*

Ana Filipa Fernandes da Silva

Orientador: José Paulo Almeida  
Co-Orientador: Rita Fernandes de Carvalho

Coimbra, 2013

## **Agradecimentos**

---

Expresso aqui os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que me apoiaram na realização desta dissertação e em especial às seguintes pessoas:

Aos meus orientadores, professor José Paulo Almeida e professora Rita Fernandes de Carvalho, pelo modo como me orientaram e pela ajuda e disponibilidade dispensada, pois sem eles a realização deste trabalho não teria sido possível.

Aos professores, Gil Gonçalves e Cidália Fonte, pelo esclarecimento de algumas dúvidas pontuais.

Aos meus pais e à minha irmã, pelo carinho, paciência, incentivo e apoio que me deram ao longo de toda a minha vida.

Aos meus padrinhos, pelo apoio prestado durante a minha estadia em Coimbra.

À Clara, ao Luís e à minha afilhada pelo apoio que sempre me deram.

## Resumo

---

As inundações em zonas urbanas produzem um grande impacto negativo ao nível da sociedade, sendo provocadas por vários fatores nomeadamente a ocupação indevida junto às margens dos rios, ou a impermeabilização induzida pela forte urbanização que se tem verificado ao longo dos anos, associados a fenómenos de precipitação.

Para prever zonas afetadas por precipitações intensas em zonas urbanas, e como o recurso aos **Sistemas de Informação Geográfica (SIG)** se tem revelado uma metodologia promissora para apoiar a modelação hidrológica e hidráulica, desenvolveu-se uma metodologia para construir uma base de dados em ambiente SIG preparando toda a informação necessária para ambas as modelações.

Para a geração do SIG, usou-se o *software* ArcGIS bem como a extensão ArcHydro, para a delimitação das bacias e rede hidrográfica de forma automática, e também a extensão HEC-GeoHMS e HEC-GeoRAS, para preparação dos dados a serem introduzidos nos modelos hidrológicos e hidráulicos. Na aplicação dos modelos hidrológicos, usou-se o *software* HEC-HMS para cálculo do caudal em cada sub-bacia e o hidrograma de cheia; para os modelos hidráulicos, utilizou-se o *software* HEC-RAS para obtenção dos perfis com o nível de inundação e a velocidade de escoamento.

O caso de estudo considerado foi uma zona urbana da cidade de Coimbra – centro oeste de Portugal continental - na margem norte do Rio Mondego. Trata-se de uma zona da cidade onde o estudo realizado é pertinente dado o facto de esta zona apresentar uma gama variada de declives do terreno e de ocupação do solo, desde uma área fortemente edificada a uma zona de floresta (Jardim Botânico). Pretende-se assim garantir uma zona relativamente pequena mas suficientemente diversa e exemplificativa do solo urbano de Coimbra.

Com a aplicação dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS, avaliou-se em que medida a intensificação da ocupação urbana afeta o escoamento e consequentes inundações.

## **Abstract**

---

Flooding in urban areas have a great negative impact on society being caused by various factors, such as improper occupation of riverbanks or waterproofing induced by heavy urbanisation throughout the years associated to rainfalls.

To foresee areas affected by intensive rainfall in urban areas, and as the resource to Geographical Information Systems (GIS) has revealed to being a promising methodology to support the hydrological and hydraulic modelling, a methodology was developed to build a data base in GIS environment preparing all the necessary information for both models.

For the creation of a GIS system, ArcGIS was used as well as its ArcHydro extension for the automatic delineation of hydrographical networks and basins; in addition, HEC-GeoHMS and HEC-GeoRAS extensions were used for the preparation of geodata to be inputted into the hydrological and hydraulic models. With regards to hydrological models, HEC-HMS was used to calculate the flow in each sub-basin and flood hydrographs; as to the hydraulic models, HEC-RAS was used to obtain profiles with the level of flooding and draining speed.

As a case study, an urban area in the city of Coimbra – west centre of Portugal’s mainland – was considered on the north bank of the river Mondego. This is a particularly relevant area due to the fact that it consists of a broad range of land slopes and land covers, from a heavily built-up area to a forest zone (corresponding to the university’s Botanical Gardens). We sought indeed a relatively small area but diverse enough to better illustrate Coimbra’s reality.

The usage of both HEC-HMS and HEC-RAS models enabled us to evaluate to what extent the intensification of urban occupation, and associate land impermeability, affects rain drainage and consequent flooding.

# Índice

---

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract .....	iv
Índice .....	v
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tabelas .....	x
Lista de Abreviaturas.....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Motivação e caso de estudo.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Estrutura da dissertação.....	5
2 ESTADO DA ARTE.....	6
2.1 Hidrografia e Hidrologia.....	6
2.1.1 Hidrologia urbana.....	6
2.2 Sistemas de Informação Geográfica.....	8
2.2.1 Modelos de dados.....	9
2.2.1.1 Modelo vetorial.....	9
2.2.1.2 Modelos matriciais ou raster.....	10
2.2.2 Modelo de dados geográficos aplicado aos recursos hídricos.....	11
2.3 Tipos de dados.....	11
2.3.1 Modelo Digital do Terreno <i>vs.</i> Modelo Digital de Superfície.....	11
2.3.1.1 Dados obtidos por deteção remota: LiDAR.....	12

2.3.1.2	Dados LiDAR como vantagem para modelação hidrológica em meio urbano	13
2.3.2	Ortoimagem.....	14
2.4	Noções gerais de hidrologia na análise de cheias.....	16
2.4.1	Precipitação.....	16
2.4.2	Escoamento superficial.....	17
2.4.3	Estudo de escoamento superficial.....	17
2.5	Modelos hidrológicos .....	19
2.5.1	Modelos hidrológicos em geral.....	19
2.5.2	Modelos de precipitação-escoamento.....	20
2.5.3	Modelos de perdas de precipitação .....	21
2.5.4	Modelos de transformação .....	26
2.5.5	Modelos de propagação .....	27
2.6	Noções gerais de hidráulica na análise de cheias .....	28
2.6.1	Tipos de escoamentos .....	28
2.6.2	Energia dos escoamentos .....	29
2.7	Cálculo de CN utilizando SIG.....	31
2.7.1	Nota prévia .....	31
2.7.2	Classificação de imagens digitais.....	31
2.7.2.1	Algoritmo da máxima verosimilhança .....	33
2.7.3	Avaliação da incerteza no processo de extração de informação temática a partir de imagens multiespectrais .....	34
2.7.4	Cálculo do índice de vegetação.....	37
2.8	<i>Software</i> utilizado .....	39
2.8.1	Considerações.....	39
2.8.2	ArcHydro .....	40
2.8.3	HEC-GeoHMS e HEC-HMS.....	40
2.8.4	HEC-GeoRAS e HEC-RAS.....	41
3	METODOLOGIA UTILIZADA .....	43
3.1	Notas prévias .....	43

3.1.1	Origem dos dados.....	43
3.1.2	Estruturação da informação .....	43
3.1.3	Sistema de coordenadas .....	44
3.1.4	Modelo de dados no ModelBuilder.....	44
3.2	Pré-processamento do terreno .....	45
3.2.1	Delimitação das bacias hidrográficas a partir do MDT vs. MDS .....	45
3.2.2	Construção do modelo de dados ArcHydro.....	46
3.3	Carta representativa do CN para o meio urbano de Coimbra.....	50
3.3.1	Classificação do solo pelo método da classificação supervisionada.....	51
3.3.2	Avaliação da classificação .....	53
3.4	Modelação hidrológica e modelação hidráulica .....	53
3.4.1	Pré-modelação hidrológica em HEC-GeoHMS .....	54
3.4.1	Modelação hidrológica em HEC-HMS .....	56
3.4.2	Pré-modelação hidráulica em HEC-GeoRAS .....	57
3.4.3	Modelação hidráulica em HEC-RAS .....	58
3.4.4	Pós-modelação hidráulica em HEC-GeoRAS.....	59
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	60
4.1	Delimitação das bacias e rede hidrográfica a partir do MDT vs. MDS .....	60
4.2	Carta representativa do CN para o meio urbano de Coimbra.....	63
4.3	Modelação hidrológica.....	66
4.4	Modelação hidráulica .....	68
5	CONCLUSÕES E PROSSEGUIMENTOS DE ESTUDO .....	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	76
	ANEXO A – Esquema geral da metodologia .....	80
	ANEXO B – Regiões pluviométricas para o hietograma de projeto.....	81
	ANEXO C – Perfis transversais e suas características nos pontos de interseção das ruas tributárias com a Avenida Sá da Bandeira.....	82

## Índice de Figuras

---

Figura 1 - Alterações hidrológicas consequentes do crescimento urbano.....	1
Figura 2 - Variabilidade espacial das características fisiográficas e hidrológicas das bacias urbanas .	7
Figura 3 - Delimitação de bacias de drenagem através da linha divisória topográfica: bacia exorreica .....	8
Figura 4 - Influência da forma da bacia de drenagem (alongada e arredondada) na forma dos hidrogramas de uma bacia urbana .....	8
Figura 5 - Representação geométrica dos elementos geográficos.....	10
Figura 6 - Modelo de representação matricial.....	10
Figura 7 - Extrato de uma imagem aérea (RGB 421) e sua classificação que ilustra a classificação da sombra como uma classe “não real” a fim de não constituir ruído .....	15
Figura 8 - Hidrograma unitário com duração D, HUD .....	18
Figura 9 - Curva esquemática das taxas de infiltração relativas dos grupos hidrológicos do solo.	24
Figura 10 - HUS do SCS com o correspondente hidrograma triangular e a tabela de relação entre o t/tp e q/qp .....	26
Figura 11- Alturas de água, h, em função da energia específica, H .....	30
Figura 12 – Índice de vegetação da diferença normalizada .....	38
Figura 13 - Extração da altura da vegetação no MDS .....	46
Figura 14 - Esquema da metodologia referente ao pré-processamento do terreno.....	47
Figura 15 - Vista de perfil de um exemplo de uma depressão antes e após a execução do FILL..	47
Figura 16 - Matriz de direções e sentidos gerados com base nas cotas do MDT/MDS.....	48
Figura 17 - Matriz de acumulação gerada com base nos sentidos de escoamento do MDT/MDS .....	48
Figura 18 - Avenida Sá da Bandeira, com ponto mais a montante (Praça da República) e ponto mais a jusante (Santa Cruz).....	54
Figura 19 - Sub-bacias e rede hidrográfica de Santa Cruz (Coimbra) .....	55
Figura 20 - Gráfico do hietograma de projeto adotado neste caso de estudo .....	56
Figura 21 - Traçado da Avenida Sá da Bandeira e perfis transversais.....	57
Figura 22 - Exemplo de perfil transversal .....	58
Figura 23 - Comparação entre o MDT e o MDS .....	60
Figura 24 - Comparação mais pormenorizada entre o MDT e o MDS .....	61
Figura 25 - Comparação entre o MDS e o MDS sem altura da vegetação.....	62
Figura 26 - Comparação mais pormenorizada entre o MDS e o MDS sem altura da vegetação...	62
Figura 27 - Análise geral dos três estudos efetuados .....	63
Figura 28 - Análise progressiva da metodologia utilizada na classificação .....	64

Figura 29 - Comparação entre a carta representativa do CN para o meio urbano de Coimbra e a Cata de CN do INAG .....	65
Figura 30- Comparação entre o hidrograma de cheia da Praça da República e o de Santa Cruz ..	67
Figura 31 - Resultado final da segunda abordagem .....	67
Figura 32 - Perfil longitudinal da Avenida Sá da Bandeira .....	68
Figura 33 - Perfil transversal 1020 e suas características .....	69
Figura 34 - Perfil transversal 0 e suas características .....	69
Figura 35 - Variação do caudal total na Avenida Sá da Bandeira (modelo hidráulico).....	70
Figura 36- Mapa de inundação.....	71
Figura 37 - Gráfico de velocidades e o respetivo mapa de velocidades.....	72
Figura 38 - Esquema geral da metodologia.....	80
Figura 39 - Regiões pluviométricas para os hietogramas de projeto baseados nas curvas IDF.....	81
Figura 40 - Perfil transversal 664 .....	82
Figura 41 - Perfil transversal 477 .....	82
Figura 42 - Perfil transversal 392.....	83
Figura 43 - Perfil transversal 216.....	83
Figura 44 - Perfil transversal 81 .....	84
Figura 45 - Perfil transversal 11 .....	84

## Índice de Tabelas

---

Tabela 1 - Valores do tempo de concentração para bacias urbanas (em minutos) .....	19
Tabela 2 - Correspondência entre CN e o tipo de cobertura do solo, em meio urbano.....	25
Tabela 3 - Matriz de confusão.....	35
Tabela 4 - Correspondência entre o CN do GHS (B) e o tipo de cobertura para as classes do solo predominantes em Coimbra .....	52
Tabela 5 - Matriz de Confusão.....	65

## Lista de Abreviaturas

---

SIG – **S**istemas de **I**nformação **G**eográfica

GIS - **G**eographical **I**nformation **S**ystems

MDE – **M**odelo **D**igital de **E**levação

MDT – **M**odelo **D**igital do **T**erreno

MDS – **M**odelo **D**igital de **S**uperfície

LiDAR – ***L**ight **D**etection **A**nd **R**anging*

MDS\_n – **M**odelo **D**igital de **S**uperfície **n**ormalizado

SNIG – **S**istema **N**acional de **I**nformação **G**eográfica

MNA – **M**odelo **N**umérico **A**ltimétrico

HU – **H**idrograma **U**nitário

HUS – **H**idrograma **U**nitário **S**intético

$t_c$  – tempo de **c**oncentração

C – **C**oeficiente de escoamento

$t_e$  – tempos de **e** escoamento

SCS – ***S**oil **C**onservation **S**ervice*

CN – ***R**unoff **C**urve **N**umber* (Número de Escoamento)

GHS – **G**ruppo **H**idrológico do **S**olo

$E_p$  – **E**xatidão do **p**rodutor

$E_u$  – **E**xatidão do **u**tilizador

NDVI – **Í**ndice de **V**egetação da **D**iferença **N**ormalizada

ESRI – ***E**nvironmental **S**ystems **R**esearch **I**nstitute*

CRWR – ***C**enter for **R**esearch in **W**ater **R**esources*

HEC-HMS – ***H**ydrologic **E**ngineering **C**enter's **H**ydrologic **M**odeling **S**ystem*

HEC-RAS - ***H**ydrologic **E**ngineering **C**enter's **R**iver **A**nalysis **S**ystem*

HEC - ***H**ydrologic **E**ngineering **C**enter*

HEC-GeoHMS - ***H**ydrologic **E**ngineering **C**enter's **G**eospatial **H**ydrologic **M**odeling **S**ystem*

HEC-GeoRAS - ***H**ydrologic **E**ngineering **C**enter's **G**eospatial **R**iver **A**nalysis **S**ystem*

FG – *File Geodatabase*

CLC – *CORINE Land Cover*

FAO – *Food and Agriculture Organisation*

TIN – *Triangulated Irregular Network*

SUDS – **Sistema de Drenagem Urbana Sustentável**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Hoje em dia, essencialmente nos países desenvolvidos, a grande preocupação das entidades responsáveis pelos recursos hídricos é avaliar e prevenir certos desastres ambientais, económicos e sociais, entre os quais a ocorrência de inundações em meios urbanos. Para *Fonseca et al. (2004)*, apesar das cheias serem um fenómeno natural, com um impacto positivo no aumento da fertilidade dos solos, podem causar perda de vidas humanas, levando à destruição do habitat natural e causando danos permanentes nas infraestruturas.

Segundo *Tucci et al. (1995)*, as inundações urbanas provocam um importante impacto na sociedade. Para o autor, a ocupação das áreas ribeirinhas e a urbanização são as grandes causas para tais ocorrências devido ao mau planeamento de ocupação do solo e consequente impermeabilidade (Figura 1). Para tal, ele propõe um forte planeamento da ocupação do espaço urbano, com infraestruturas adequadas e condições que evitem tais impactos económico-sociais sobre a sociedade.

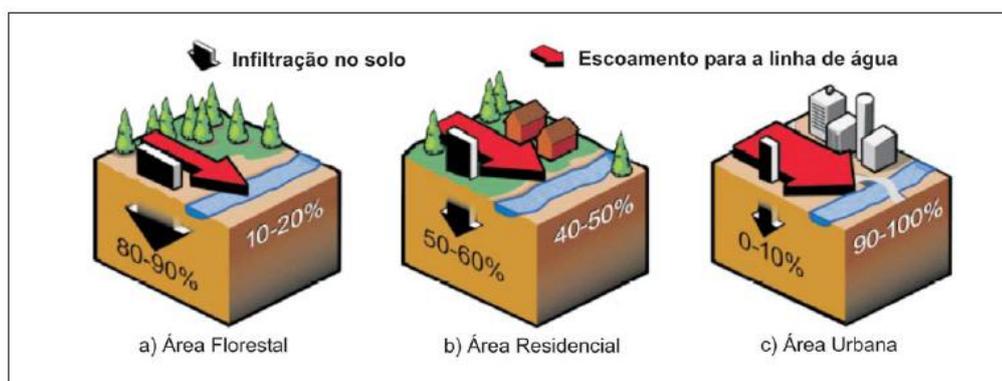


Figura 1 - Alterações hidrológicas consequentes do crescimento urbano

Mata Lima *et al.*, 2007, modificada de Marsh, 1983

As zonas ribeirinhas começaram a ser povoadas há muitos anos atrás, sendo hoje em dia ocupadas por população mais idosa e edifícios antigos. Não houve uma grande preocupação em estabelecer regras para uma correta drenagem das águas. Com a ocupação dessas zonas, por materiais de diferentes características, como edifícios telhados, ruas calçadas e betuminosas, estacionamentos, entre outros, a água que antes se infiltrava vai agora causar um aumento do

escoamento superficial que as linhas de água não conseguem transportar, causando inundações com danos materiais e humanos.

A forte precipitação que se faz sentir em algumas alturas do ano, devido às alterações climáticas, agrava as situações. Durante a precipitação, a água dispersa-se pelo terreno de várias maneiras: 1) grande parte é retida temporariamente no local, e retorna à atmosfera por evaporação e transpiração das plantas; 2) parte penetra no terreno, abastecendo as águas subterrâneas; 3) parte esco superficialmente sobre o terreno, abastecendo os cursos de água.

Nos estudos em que a dimensão espacial inerente aos problemas hidrológicos e de recursos hídricos é de extrema importância, tem-se considerado o recurso aos SIG como uma ferramenta tecnológica promissora para o desenvolvimento de soluções. Os SIG contribuem para um conhecimento completo e detalhado da realidade existente e conseguem manipular em tempo real toda a informação atualizada.

Para *Maidment (2002)*, durante os anos 90, os SIG emergiram como uma importante ferramenta de suporte para modelação hidrológica. Uma das grandes aplicações é providenciar um método consistente para delimitação de bacias hidrográficas e rede de linhas de água, usando **Modelos Digitais de Elevação (MDE)** da superfície terrestre.

As imagens de satélite têm sido muito utilizadas para a recolha de informação, como uso e ocupação do solo, recorrendo a técnicas de deteção remota. Hoje em dia, são muito usados os dados LiDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging), uma técnica de deteção remota a partir de aeronaves, que permite a produção de mapas altamente detalhados e precisos da superfície da Terra.

A *Diretiva do Parlamento Europeu 2007/60/EC* (mencionado em *Gonçalves et al. 2009*), relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações, define que as entidades governamentais responsáveis devem elaborar mapas de risco de inundação, na escala mais adequada, para as áreas com potenciais riscos de inundação. Com base neste pressuposto, esta dissertação irá seguir uma metodologia o mais adequado possível à escala predominante em meios urbanos.

## 1.2 Motivação e caso de estudo

*“Hoje estável e controlado, o rio Mondego foi de facto até há pouco menos de dois séculos um rebelde elemento de perturbação do quotidiano e desenvolvimento urbano de Coimbra. Correndo sobre um leito cujo perfil ainda se não encontrava estabilizado, o Mondego auto-produziu esse incontornável equilíbrio através de consecutivas, torrentosas e, por vezes, trágicas cheias, condicionando durante séculos — em especial durante a Idade Moderna — todo desenvolvimento urbanístico da Baixa da cidade e, por reflexo, o da própria Alta. Em média, a cota do seu leito subiu até então 8 centímetros por década, destruindo e/ou açoreando diversos conjuntos edificadas nas suas margens durante a Idade Média e, claro, a ponte instalada pelo menos desde a fundação da nacionalidade” (Walter, 2005).*

A bacia do Rio Mondego cobre uma área de aproximadamente 6671 Km<sup>2</sup> e constitui uma das zonas da Região Centro, e também do país, com melhores disponibilidades de recursos hídricos. Porém, já causou graves problemas devido às cheias pois estas são relativamente rápidas, com tempos entre o início de cheia e o pico do caudal da ordem das poucas horas, podendo ser particularmente perigosas devido ao aumento brusco do nível de escoamento. Coimbra, pela sua posição geográfica, sempre viveu e sofreu com o seu rio em função das características torrenciais do regime deste, com um caudal médio anual da ordem dos 80 m<sup>3</sup>/s, mas que em época de seca baixava para valores inferiores a 1 m<sup>3</sup>/s e em ponta de cheia podia alcançar 3700 m<sup>3</sup>/s (Hidroprojecto, in Lourenço 2004).

No estudo desenvolvido por Paiva (2006), é mencionado que até à década de 80 do séc. XX as inundações na Baixa de Coimbra se deviam principalmente à subida e extravasamento das águas do Rio Mondego. Também menciona que estes episódios estavam relacionados com ocorrência de chuvas muito intensas, na ordem de dezenas de 1/m<sup>2</sup> em menos de uma hora, chegando muitas vezes a concentrar-se mais de 80% de precipitação ocorrida nesse dia. Estes episódios, podendo acontecer em qualquer altura do ano, são mais críticos segundo a autora, com as primeiras chuvadas do outono, a seguir a um longo período seco e de deficiente limpeza de sarjetas, e por isso responsáveis por um grande número de inundações na cidade de Coimbra.

Atualmente, vários investigadores afirmam que o espectro de grandes inundações em Coimbra parece estar afastado devido à construção da barragem da Aguieira e das Fronhas (situadas a montante de Coimbra), regularização fluvial realizada no Baixo Mondego, bem como a construção de infraestruturas para rega e da Ponte do Açude. Contudo, as pequenas inundações continuam a deixar os habitantes e as autarquias preocupados. Embora estas não tenham grandes consequências, causam grandes incómodos aos residentes e aos automobilistas, sendo cada vez mais frequentes em áreas onde a drenagem natural foi alterada pela implantação de urbanizações.

*Lourenço (2004)* indica que hoje em dia o risco de alagamento pontual de certas áreas da cidade é essencialmente na Praça 8 de Maio, R. Ferreira Borges/Escadas de Quebra-Costas, R. do Brasil/R. dos Combatentes da Grande Guerra, Solum / Av. Elísio de Moura/Casa Branca e Bairro de Santa Apolónia.

Todo o território deveria apresentar um sistema de drenagem bem distribuído, em boas condições e adequado à zona que pretende servir, ou seja respeitando regras de hidrologia e urbanismo pois este tem a principal finalidade de assegurar o transporte das águas provenientes da precipitação atmosférica. Para *Sá-Marques et al. (2004)*, o sistema de drenagem de Coimbra é complexo sendo constituído por vários, diferentes e independentes sistemas de drenagem e respetivas estações de tratamento de águas residuais, que descarregam em diferentes locais. Daí, estas características também terem marcado a vivência do centro urbano da cidade de Coimbra, e de populações situadas a jusante, no que diz respeito à ocorrência de cheias.

Avaliando os fatores acima mencionados, considera-se que as causas naturais, o aumento da urbanização, as características físicas ou a antiga implantação de drenagem na Baixa coimbrã, são as principais causas para as inundações na cidade de Coimbra. Assim, tornou-se pertinente elaborar um estudo, com a utilização de um modelo hidrológico e um modelo hidráulico, para avaliar o funcionamento da drenagem na zona urbana. Estes permitirão localizar os pontos críticos e avaliar a dimensão do impacto das cheias nas principais zonas sensíveis, onde há uma elevada população ou valores de património. Para a correta utilização dos modelos, terá de se ter em consideração valores referentes às causas mencionadas, valores esses que serão caracterizados a uma escala adequada para um meio urbano.

### **1.3 Objetivos**

Esta dissertação tem como propósito final a implementação de um sistema SIG para a caracterização e análise dos recursos hídricos superficiais de algumas sub-bacias pertencentes à bacia do Rio Mondego. Sendo assim, este trabalho tem três objetivos principais:

1) O desenvolvimento de uma base de dados em SIG com informação geográfica relevante para o estudo de inundações em zonas urbanas, como por exemplo bacias de drenagem, dados de superfície, declive do terreno, ocupação do solo, dados hidrológicos e climáticos, o que requer:

- ✓ Delineação das bacias e rede hidrográfica;
- ✓ Classificação do solo pelo método de classificação supervisionado;
- ✓ Criação da carta representativa do número de escoamento (CN);

- ✓ Caracterização da bacia com parâmetros hidrológicos;
  - ✓ Caracterização da bacia com parâmetros hidráulicos;
  - ✓ Organização da informação.
- 2) Elaboração de uma metodologia baseada na sistematização do procedimento;
  - 3) A aplicação da base de dados como pré-processamento de aplicações informáticas *open source* como o HEC-HMS e HEC-RAS.

Esta aplicação terá as seguintes mais-valias como possíveis utilizações futuras:

- Avaliar os prejuízos económicos e de património, relevantes devido a inundações urbanas;
- Avaliar a eficiência de dispositivos, nomeadamente mobiliário urbano, revestimentos e outros, como possíveis alternativas de atenuação e controlo das inundações (controlo de descargas, avarias do sistema).

## **1.4 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos: Introdução, Estado da Arte, Metodologia Utilizada, Apresentação e Discussão dos Resultados, Conclusões e Prosseguimento de Estudo. E ainda, Referências Bibliográficas e Anexos. O presente capítulo apresenta as considerações gerais, os objetivos e uma descrição da estrutura do documento. No capítulo segundo é apresentada uma descrição de todos os conceitos utilizados ao longo desta dissertação, desde hidrografia e hidrologia, sistemas de informação geográfica, tipos de dados, noções gerais de hidrologia na análise de cheias, modelos hidrológicos, noções gerais de hidráulica na análise de cheias, cálculo de CN utilizando SIG e *software* utilizado. No Capítulo 3 é feita uma descrição da metodologia usada no pré-processamento do terreno, na carta representativa do CN para o meio urbano de Coimbra, bem como na modelação hidrológica e hidráulica. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos e breves comentários. Finalmente, no capítulo quinto apresentam-se as principais conclusões e prosseguimentos futuros deste estudo.

## **2 ESTADO DA ARTE**

### **2.1 Hidrografia e Hidrologia**

A hidrografia define-se como sendo a descrição, estudo e representação de corpos de água, tais como rios, lagos ou oceanos. Todos os mapas topográficos contêm informação hidrográfica, as “linhas azuis” contidas no mapa que representam os percursos de um rio, os limites de um lago, ou as linhas de costa. Os mapas topográficos contêm também informação hipsográfica, que corresponde às curvas de nível mostrando a elevação e a forma da superfície terrestre. O escoamento de água através da superfície terrestre é uma das causas que altera a sua forma, o que faz com que a hidrografia e hipsografia estejam intimamente relacionadas. O tipo de uso de solo, quer seja urbano, agrícola ou rural, também afeta o fluxo de água na superfície. A informação contida num mapa é importante para determinar ligações entre a superfície terrestre e os recursos hídricos, sua distribuição e a circulação.

A hidrologia define-se como uma ciência que trata das propriedades, distribuição e circulação de água na superfície terrestre, no solo e rochas subjacentes e na atmosfera. Os dados hidrológicos podem ser obtidos através de estações de monitorização no terreno, tais como estações de medição de altura de água, estações pluviométricas e estações climáticas, que registam ao longo do tempo as variações no fluxo de água e parâmetros relacionadas (*Maidment, 2002*).

#### **2.1.1 Hidrologia urbana**

Para *Lima et al. (2010)*, a hidrologia urbana é o ramo da hidrologia que estuda as zonas urbanas, onde as áreas muitas vezes impermeáveis e o relevo artificial do terreno têm uma grande predominância. Quando uma bacia hidrográfica se considera urbanizada ela está ocupada por uma área impermeável considerável, por estradas, calçadas, estacionamento e em grande parte por edifícios. O que acontece em muitas zonas urbanas é a substituição de percursos naturais de linhas de água, por calhas pavimentadas, galerias pluviais, ou outros elementos de drenagem artificiais.

À medida que o espaço vai sendo urbanizado, o volume de escoamento nas bacias hidrográficas aumenta pois infiltra-se menos. Vários estudos têm sido desenvolvidos para avaliar os prováveis efeitos do desenvolvimento urbano, concedendo e implementando medidas que minimizem os efeitos adversos. Estes estudos incidem numa análise do escoamento superficial, incluindo a determinação do caudal de ponta, do volume escoado e da forma do hidrograma para um dado período de retorno.

*Lima et al. (2010)* considera as bacias urbanas como entidades complexas, com uma elevada variabilidade espacial das suas características fisiográficas (Figura 2). No estudo de uma bacia urbana deve considerar-se os seguintes aspetos:

- 1) Tipo do uso do solo previsto para a bacia, particularmente no que se refere à impermeabilidade, bem como outras intervenções humanas que afetam a redução do tempo de concentração da bacia ou levar à ocupação de áreas inadequadas;
- 2) Possíveis efeitos causados aquando da execução de obras, a montante e a jusante do troço em que se vai processar a intervenção.

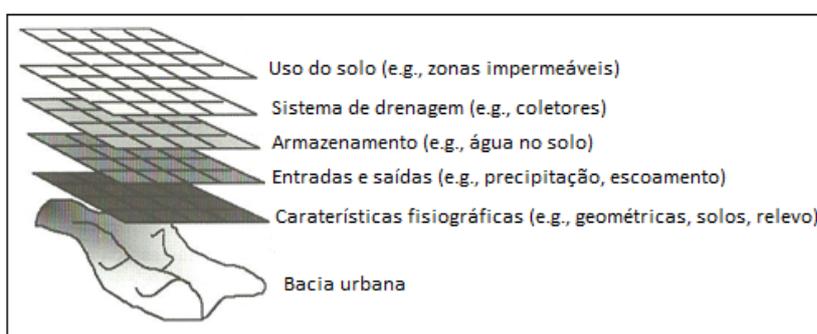


Figura 2 - Variabilidade espacial das características fisiográficas e hidrológicas das bacias urbanas  
Adaptada de Lima *et al.*, 2010

Caracterizando as bacias urbanas segundo *Lima et al. (2010)*, elas são maioritariamente exorreicas (Figura 3), isto porque a drenagem é feita diretamente para o mar ou rio. Em relação à infiltração da água, normalmente esta move-se na zona não saturada do solo em direção ao lençol freático, ou parte dessa água pode criar caminhos preferenciais que geram escoamentos superficiais a jusante sendo que, em bacias urbanas, normalmente este escoamento subsuperficial considera-se integrado no escoamento superficial. As pequenas bacias urbanas são sensíveis às chuvas de grande intensidade e às diferenças de uso do solo, contudo, a forma planimétrica de uma bacia urbana é um fator importante na medida em que determina o tipo de resposta da bacia à precipitação e condiciona o respetivo tempo de concentração, indicando uma maior ou menor tendência para a ocorrência de cheias. Caso uma bacia seja alongada, a água demorará mais tempo

a chegar ao ponto mais a jusante, caracterizando-se por um hidrograma de cheias mais achatado. Caso seja mais arredondada e compacta, terá um caudal de ponta mais acentuado, tendo maior probabilidade de ser coberta por um núcleo de grande intensidade de precipitação, durante uma chuvada (Figura 4). Também a disposição da rede de drenagem, o relevo, geologia, solos e a vegetação constituem fatores relevantes no comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica urbana.

Com estas características das áreas urbanizadas, a infiltração das águas pluviais é muito reduzida. De facto, dado o elevado grau de impermeabilidade da superfície dos solos, o escoamento tende a ser muito mais rápido, com tempos de viagem curtos portanto, aumentando assim os picos de descarga.

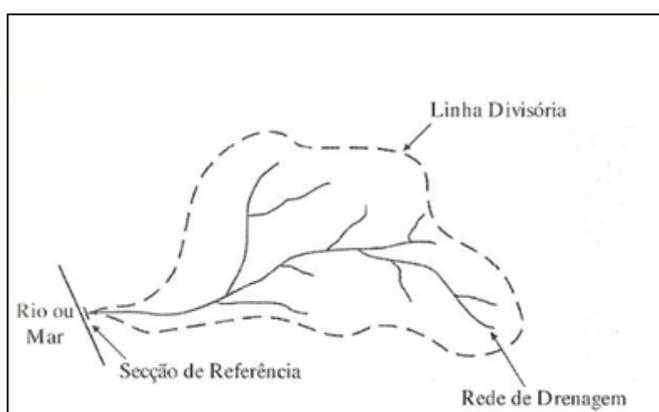


Figura 3 - Delimitação de bacias de drenagem através da linha divisória topográfica: bacia exorreica  
Lima *et al.*, 2010

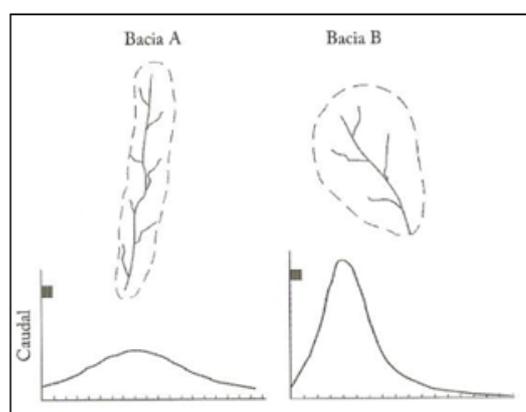


Figura 4 - Influência da forma da bacia de drenagem (alongada e arredondada) na forma dos hidrogramas de uma bacia urbana  
Lima *et al.*, 2010

## 2.2 Sistemas de Informação Geográfica

Não existe uma definição única para os SIG, devido à grande variedade de aplicações e à possibilidade de inserção e manipulação de dados provenientes de origens diversas. No *Dicionário de Ciências Cartográficas*, SIG está definido como: “ (1) Em sentido geral, um sistema de informação dedicado à modelação de fenómenos geográficos, isto é, uma concretização de um modelo geográfico conceptual. Neste sentido, consideram-se como SIG, tanto os modelos analógicos (as cartas em papel, por exemplo) como os modelos digitais (baseados em computadores). (2) Em sentido estrito, um conjunto coerente de *hardware*, *software*, dados e pessoas, destinados a adquirir, armazenar, atualizar, manipular, analisar e apresentar informação georreferenciada.”

Os *softwares* SIG apresentam algumas capacidades que os tornam uma importante ferramenta para várias utilizações: permitem a representação de entidades espaciais em diferentes modelos de dados (vetor e *raster*), possuem a capacidade de sobreposição geográfica de temas, apresentam funções de transformação de dados espaciais (mudança de projeção, edição e manipulação de entidades espaciais), contêm métodos para calcular relações espaciais (topologia) e têm capacidade para análise e modelação espacial.

### **2.2.1 Modelos de dados**

A implementação de um SIG deve ter em atenção, entre outros fatores, a natureza da informação que lhe vai servir de base. Assim, é atualmente possível implementar SIG baseados nos modelos de dados que melhor se adaptam a essa informação. Os principais modelos de dados, possíveis de serem utilizados num SIG, são o modelo vetorial, o *raster*, o difuso e o temporal.

Como os modelos de dados mais comuns são o modelo vetorial e o modelo *raster*, estes serão descritos posteriormente com mais pormenor.

#### **2.2.1.1 Modelo vetorial**

Este modelo é baseado em objetos geométricos. O modelo vetorial é extremamente útil para descrever características discretas, mas menos utilizado para descrever características contínuas. Neste modelo, o foco das representações centra-se na exatidão da localização dos elementos no espaço. Para modelar digitalmente as entidades do mundo real, utilizam-se essencialmente três primitivas geométricas: ponto, linha e polígono (Figura 5). Cada localização é armazenada em coordenadas planimétricas (x, y): pontos são armazenados como um único par de coordenadas; linhas são armazenadas como uma série ordenada de pares de coordenadas (x, y); polígonos são armazenados como uma série de pares de coordenadas de (x, y), que definem um ou mais segmentos de linha, que se fecham para formar um polígono.

Estes sistemas permitem a utilização de objetos compostos, agregando os elementos anteriores, de natureza igual ou diferente. Assim, um SIG vetorial trata de objetos com fronteiras bem definidas, sendo pois adequado ao tratamento de fenómenos de natureza discreta: edifícios, pontes, limites de freguesias, etc (Matos, 2001).

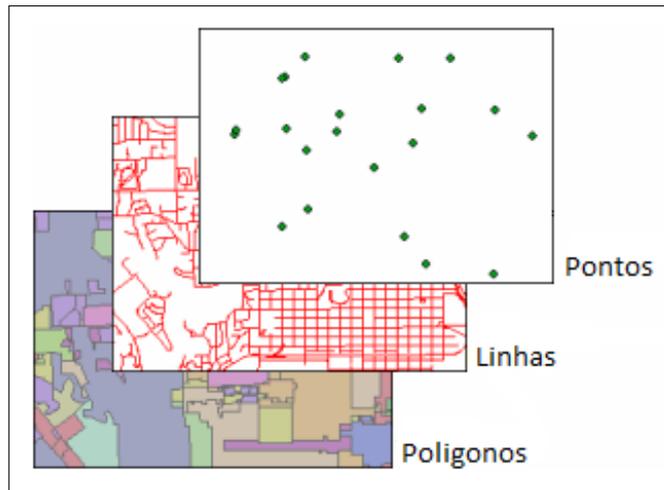


Figura 5 - Representação geométrica dos elementos geográficos  
<http://www.geography.hunter.cuny.edu>

### 2.2.1.2 Modelos matriciais ou raster

Uma representação matricial é constituída por uma matriz de células/*pixels* de forma regular, cuja posição de cada *pixel* é identificável pela linha e coluna. A cada *pixel* está associado um único valor. Cada valor provém de medições específicas para cada célula, como é o caso de imagens de satélite, obtidos por interpolação ou por conversão (Figura 6). O modelo *raster* é adequado para a representação de grandezas com distribuição espacial contínua: temperatura, pressão atmosférica, altitude, etc (Matos, 2001).

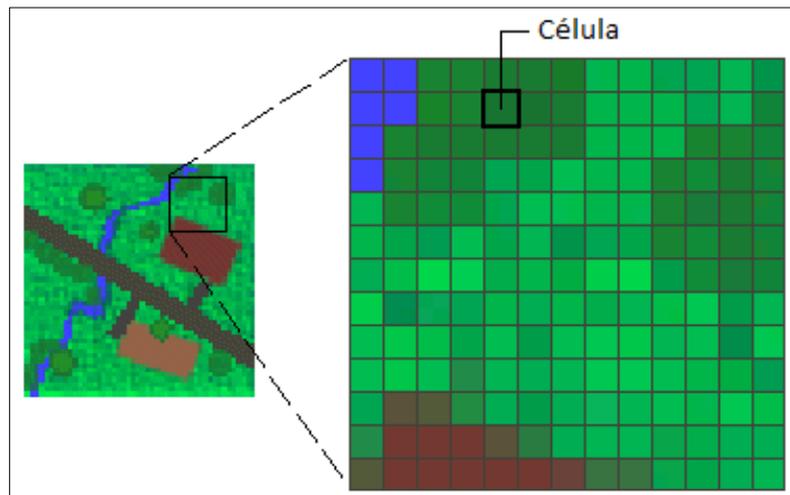


Figura 6 - Modelo de representação matricial  
<http://webhelp.esri.com>

## **2.2.2 Modelo de dados geográficos aplicado aos recursos hídricos**

Há duas formas de abordagem para construção de um modelo de dados geográficos: inventarial e comportamental.

Na abordagem inventarial, os temas são descritos pela sua localização, propriedades e comportamentos individuais, sendo que em recursos hídricos se destacam duas fontes de dados de inventário: 1) mapas hidrográficos, e; 2) inventários de dados em tabelas. Na abordagem comportamental, é definido um sistema de comportamento através de entidades que o possam executar, criando uma visão esquemática da superfície que realça as entidades mais importantes para um modelo particular de recursos hídricos ou para análise (*Maidment, 2002*).

A componente desta dissertação referente à caracterização da bacia hidrográfica foi realizada pela abordagem inventarial do modelo de dados, enquanto a componente da simulação de processos foi realizada pela abordagem comportamental.

## **2.3 Tipos de dados**

Dos tipos de dados que se consideraram relevantes para esta dissertação, as tecnologias que lhe estão associadas e as principais características técnicas, são sumariamente revistas nesta secção.

### **2.3.1 Modelo Digital do Terreno vs. Modelo Digital de Superfície**

O relevo é definido por dois elementos fundamentais, que são eles pontos cotados e curvas de nível. Dos pontos cotados, que podem ser distribuídos de forma aleatória ou regular, conhecem-se ou as coordenadas cartográficas ou geográficas, e a sua altitude. As curvas de nível representam a interseção do terreno com uma superfície de nível de uma dada altitude. Com o evoluir da tecnologia, tornou-se frequente a passagem desta informação de um formato gráfico para formato numérico (digital) por meio de regras de interpolação, dando origem ao **M**odelo **D**igital do **T**erreno (MDT). *Matos (2001)* define MDT por 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. O MDT representa assim, a superfície real do terreno, através de uma superfície composta por células dispostas regularmente, e o valor da respetiva altitude associado a cada célula.

Num meio urbano a localização e altitude dos objetos acima do terreno têm uma grande relevância ao nível da modelação. Nestes casos, aplica-se normalmente um modelo que

represente a superfície do terreno acrescida de qualquer objeto existentes sobre ela, ao qual se chama **Modelo Digital de Superfície** (MDS). Assim, caso haja árvores e construções, a superfície representada refere-se ao topo das mesmas. Em meio urbano, o MDS tem aplicações variadas, nomeadamente no que diz respeito à modelação hidrológica, pois, usando uma análise detalhada deste, pode gerar-se automaticamente a rede de drenagem superficial com ferramentas apropriadas.

### 2.3.1.1 *Dados obtidos por deteção remota: LiDAR*

O grande objetivo da tecnologia de dados LiDAR é a aquisição de dados altimétricos, com precisão de centímetros, num curto espaço de tempo. Esta técnica tem uma grande vantagem, conseguir evitar problemas de triangulação e ortorretificação, pois a georreferenciação de cada ponto é automática (Jensen 2007, in Gomes 2011).

O funcionamento do LiDAR é feito através de um digitalizador *laser* aerotransportado. É um sistema complexo integrado, constituído por um medidor de alcance *laser*, um sistema computacional para controlar a aquisição de dados *in situ*, um meio de armazenamento, um digitalizador, e um sistema de GPS/INS para determinar a posição e orientação do sistema. Esta técnica de aquisição de dados é considerada deteção remota ativa, pois envia energia eletromagnética e regista a energia refletida pelos objetos da superfície terrestre, sendo que o tipo de objetos presentes na superfície é que determinam a intensidade dos sinais de retorno, e o comprimento de onda do *laser* está entre 1040 e 1060 nm (Li et al., 2004). Um conjunto típico de dados LiDAR é constituído por uma nuvem irregular de pontos onde é associado a cada ponto as respetivas coordenadas (x,y,z), um identificador único (marca temporal), e a intensidade I do sinal recebido (Gonçalves et al., 2007). Em situações mais complexas, alguns digitalizadores LiDAR podem registar mais do que um sinal de retorno para um único pulso transmitido. Vários sinais de retorno múltiplos são gerados, sendo que o primeiro corresponde à cota do topo de um dado objeto, por exemplo, ramo de uma árvore ou topo de um edifício (caso o objeto seja penetrável), e o último corresponde à superfície terrestre (Vosselman et al. 2010).

Atualmente, a aquisição de dados LiDAR constitui uma ferramenta útil, no que diz respeito à geração do MDS. Com a criação automática de modelos de elevação a partir de dados detetados remotamente, pode oferecer-se uma representação de ambas as superfícies, tanto do solo como dos objetos em cima deste, podendo oferecer uma combinação útil de conjunto de dados.

Para a geração do MDT com dados LiDAR, todos os pontos classificados como terreno são necessários, enquanto que para a geração do MDS são necessários todos os pontos do primeiro retorno. Os primeiros MDS construídos derivaram de técnicas de imagem estereográfica (Smith et al. 1996, in Priestnall et al. 2000); contudo, Loddenkemper & Petring, 1996; Lohr, 1998 (in Priestnall et al., 2000) afirmam que recentemente, a tecnologia LiDAR se tornou uma técnica estabelecida para construir os MDS. Baltasvias, 1999 (in Priestnall et al. 2000), comparando a fotogrametria e o LiDAR considera estas tecnologias não apenas competitivas mas complementares. No entanto, a produção de MDS usando dados LiDAR é um processo mais rápido, mais automatizado e juntamente com uma alta densidade de pontos, pode caracterizar de forma mais exata o meio urbano.

Inicialmente, Vosselman et al. (2010), defenderam que ao pretender-se uma elevada qualidade dos MDS os dados do primeiro retorno deveriam ser refinados por poderem conter reflexos de superfícies altas (por exemplo: causado pelas aves ou poeiras), e poderem ainda incluir pontos referentes a objetos temporais que estavam presentes durante a aquisição dos dados (por exemplo: carros ou pessoas). Atualmente, os MDS já são normalmente determinados de forma automática com base em todos os primeiros retornos. Um MDS derivado de dados LiDAR tem várias finalidades, sendo que, a mais utilizada, é quando serve de dado de entrada para a geração do **M**odelo **D**igital de **S**uperfície **n**ormalizado (MDS\_n). Este novo modelo digital tem muita utilização na extração de construções e mapeamento de vegetação, a partir da diferença entre o primeiro e o segundo retorno, ou seja entre o MDT e o MDS.

### **2.3.1.2** *Dados LiDAR como vantagem para modelação hidrológica em meio urbano*

A utilização de dados LiDAR tem-se tornado útil na modelação hidrológica, nomeadamente no estudo de cheias. Usando uma análise detalhada do MDT ou MDS, conforme o meio a estudar, pode gerar-se automaticamente a rede de drenagem da superfície terrestre, através de ferramentas apropriadas. Vários estudos têm sido desenvolvidos neste âmbito, nomeadamente um estudo desenvolvido por Leitão et al. (2008), que pretendeu provar que um MDS de alta resolução espacial é o indicado para modelação de cheias em meio urbano ou seja, mostrou que a qualidade da rede de superfície gerada é altamente dependente da qualidade e resolução dos conjuntos de dados do terreno. Vejamos, Leitão et al. (2008) realizaram um estudo num meio urbano (Lisboa) com quatro MDE oriundos de técnicas diferentes de aquisição, tendo diferentes resoluções e precisões, sendo eles InSAR (dados de elevação SRTM – tamanho da

célula 90x90 m), dados cartográficos baseados em dados de elevação (contorno MDE – tamanho da célula 5x5 m), dados LiDAR originais (tamanho da célula 1x1 m) e LiDAR com edifícios sobrepostos (tamanho da célula 1x1 m).

Analisando os resultados da geração da rede de drenagem nos quatro diferentes MDE, os autores afirmaram que usando dados LiDAR com edifícios sobrepostos e tamanho da célula de 1x1 m, é gerado um grande número de bacias de pequenas dimensões, e conseqüentemente uma densa rede de drenagem. Concluindo assim que os edifícios funcionam como barreiras para o fluxo, aumentando o número de bacias, sendo de facto o que acontece na realidade.

Contudo *Leitão et al. (2008)* não considerou a influência da vegetação, mas que neste caso de estudo vai ser estudada, pois considera-se uma condicionante para a delimitação automática das bacias e rede hidrográfica.

### **2.3.2 Ortoimagem**

No glossário dos termos geográficos do SNIG (**Sistema Nacional de Informação Geográfica**), ortoimagem define-se como o resultado de um processo de retificação diferencial ortogonal de uma imagem aérea perspectiva. Estas imagens são afetadas de um processo de ortorretificação, que consiste na correção das distorções geométricas.

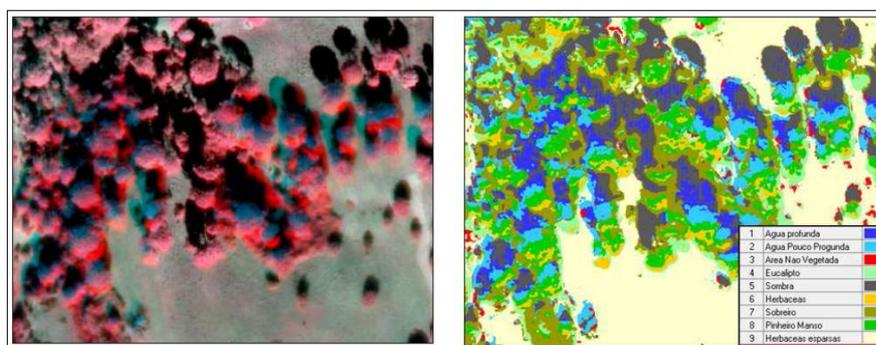
Segundo *Fonseca (2004)*, a qualidade geométrica externa de uma imagem diz respeito à precisão com que é possível sobrepor a imagem a uma outra representação plana da superfície terrestre, seja ela uma carta ou uma imagem. Para minimizar as deformações *a posteriori* da aquisição das imagens, existem três métodos possíveis: a correção geométrica com pontos de controlo, reamostragem da imagem, e ortorretificação. O processo de ortorretificação é necessário quando a precisão da correção com pontos de controlo não cumpre as especificações de precisão exigidas pela aplicação. Este método consiste na eliminação de um deslocamento radial dos elementos de imagem ao longo de cada linha de imagem. Tal deslocamento deve-se ao facto de a imagem ser obtida por um sistema e projeção que utiliza uma geometria projetiva, dependendo da altitude do terreno correspondente e da sua distância, ao longo da linha, à imagem do nadir do satélite, sendo necessário um **Modelo Numérico Altimétrico (MNA)** para a sua retificação.

Para *Konecny (2003)*, uma ortoimagem fornece a geometria correta de um mapa, tendo a vantagem de oferecer capacidades visuais interpretativas; mas no entanto, não permite a exibição de classes de objetos, sem antes se proceder a uma classificação. Também possui problemas

particulares em meios urbanos, pois uma ortorretificação é feita usando normalmente um MDT, onde apenas os pontos de nível do terreno são levados à sua posição correta, contendo assim deslocamentos radiais dos edifícios, árvores ou pontes. Para *Gonçalves et al. (2004)*, uma ortoimagem adquirida com o MDT limita muito a sua utilização em meio urbano, pois não só apresenta deslocamentos, como muitas áreas permanecem ocultas por edifícios altos. Para tal, vários estudos têm sido realizados a fim de obter uma ortoimagem verdadeira, onde vários autores afirmam que o MDS é o meio mais apropriado para tal processo.

Outra desvantagem neste tipo de imagens, é o efeito de sombra pois, segundo *Matsuoka (2003)*, mesmo numa imagem ortorretificada os grandes edifícios apresentam sempre uma certa inclinação, projetando sombras e omitindo assim as feições existentes. Para *Loureiro (2008)*, este efeito torna-se mais perceptível com o aumento da resolução, o que implica que na maioria das situações constitui ruído. As sombras são causadas de uma forma natural pela iluminação oblíqua dos raios de sol, também pelo posicionamento da plataforma do satélite e sua órbita, tornando-se desagradáveis por cobrirem parte relevante da fotografia.

Para *Tenedório et al. (2007)*, a sombra causada pelos grandes edifícios ou árvores é um fator de grande importância pois influencia diretamente a resposta espectral dos tipos de uso e ocupação do solo, isto porque não existe informação nessa região captada pelo sensor. A fim de se obter a respetiva informação espectral pode proceder-se a alguns métodos, pois caso se possuam dados LiDAR, essa mesma informação pode ser derivada através da intensidade do retorno do feixe *laser*, ou por outras fontes como fotografias aéreas e base cartográfica (*Araki et al., 2005*). Assim, não só é necessário uma ortoimagem como informação adicional proveniente de outras fontes. *Loureiro (2008)* realizou um estudo em que na classificação da imagem considera uma classe “não real” (as sombras) como uma classe de ocupação do solo, a fim de diminuir o ruído (*Figura 7*).



**Figura 7 - Extrato de uma imagem aérea (RGB 421) e sua classificação que ilustra a classificação da sombra como uma classe “não real” a fim de não constituir ruído**

*Gonçalves et al., 2008*

## 2.4 Noções gerais de hidrologia na análise de cheias

Nesta secção irão ser descritas todas as noções de hidrologia mais usadas nesta dissertação, como: precipitação, escoamento superficial, estudo do escoamento superficial – hidrograma de cheia e caudal de ponta de cheia.

### 2.4.1 Precipitação

A água proveniente do vapor de água da atmosfera, depositada na superfície terrestre sob a forma de chuva, granizo, orvalho, neblina, neve ou geada é designada por precipitação. A precipitação em forma de chuva é mais facilmente medida e contribui muito significativamente para a vazão dos rios, daí a importância em contabilizá-la.

A quantidade de chuva é exprimida pela altura da água caída e acumulada sobre uma superfície plana e impermeável, sendo normalmente medida por pluviómetros em pontos isolados, previamente escolhidos (pontos de observação), onde as quantidades observadas nestes aparelhos durante uma certa chuvada não são constantes ao longo de tempo. A fim de se determinar a precipitação média numa superfície qualquer, existem três métodos de cálculo: média aritmética, método de *Thiessen* e método das isoietas, que utilizam as observações das estações dentro dessa superfície e nas suas vizinhanças. O método de *Thiessen* é o usado no HEC-HMS e dá bons resultados quando o terreno não é muito acidentado (*Holtz et al. 1976*). Este método consiste na união dos pontos adjacentes, três a três, por segmentos de reta, traçando-se normais aos segmentos pelo seu ponto médio, formando assim polígonos denominados polígonos de *Thiessen*. Assim, cada polígono possuirá um único posto de observação no seu interior, onde qualquer ponto contido no interior do polígono está mais próximo desse posto do que qualquer outro ponto. Um dado polígono define a área de influência do posto. Sendo  $P_i$  a precipitação no posto  $i$ , e  $A_i$  a sua área de influência, a precipitação ponderada  $P$  sobre a área total  $A$  será (Equação 1):

$$P = \frac{\sum P_i A_i}{A} \quad \text{Equação 1}$$

O coeficiente de *Thiessen* corresponde à propagação de  $A_i/A$  do posto  $i$  dentro de uma dada bacia.

Hoje em dia, existe um determinado número de estações de observação, e frequentemente o estudo dos registos de precipitação é feito em termos de determinadas curvas,

curvas IDF onde estão associados três parâmetros: 1) intensidade - correspondente ao quociente entre a altura da precipitação caída,  $\Delta h$ , e o seu tempo de duração; 2) duração – tempo considerado para a chuva da ordem dos 5 minutos a alguns dias (em zonas urbanas), e; 3) frequência – traduzida em geral por  $N$  vezes por ano. As curvas IDF caracterizam-se por expressões exponenciais, do tipo  $I = at^b$ , onde  $I$  é a intensidade máxima média da precipitação,  $t$  a duração e  $a$  e  $b$  são parâmetros dependentes da frequência ou período de retorno e da região. Portugal Continental e Ilhas possuem curvas IDF para vários períodos de retorno (intervalo médio de anos dentro do qual ocorre ou é superada uma dada cheia de magnitude  $Q$ ) (Lencastre et al., 1992).

#### **2.4.2 Escoamento superficial**

A precipitação que não é interceptada pela vegetação ou edifícios irá atingir a superfície terrestre, podendo ser evaporada, infiltrar-se, ou ficar retida nalguma depressão presente no solo, sendo que muitas vezes tal precipitação é maior que a capacidade destes processos e dá origem a escoamento superficial. Este volume de água excedente que escoar à superfície do terreno até à linha de água mais próxima chama-se precipitação útil (escoamento direto). O escoamento superficial começa algum tempo após o início da precipitação, pois este intervalo de tempo corresponde à interceção pela vegetação e obstáculos, à saturação do solo e à acumulação nas depressões do terreno, geralmente chamadas perdas iniciais (Lencastre et al., 1992).

#### **2.4.3 Estudo de escoamento superficial**

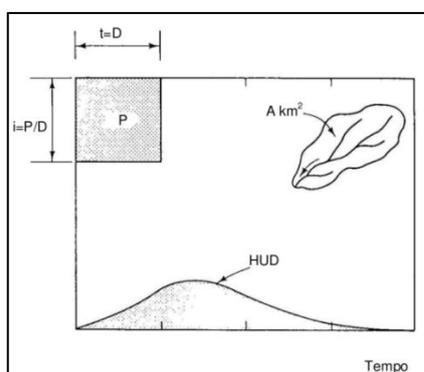
Quando a precipitação sobre uma bacia é intensa, o caudal gerado na rede hidrográfica, ultrapassa a capacidade normal de transporte e diz-se caudal de cheia.

- **Hidrograma de cheia**

O método mais usado para representar um hidrograma de cheias é o método do Hidrograma Unitário (HU) apresentado por Sherman em 1932, que consiste num hidrograma de escoamento direto, provocado num dado curso de água em resposta de uma precipitação unitária numa dada bacia hidrográfica.

Esquemáticamente pode representar-se um hidrograma unitário como é ilustrado na Figura 8, onde está representada igualmente a bacia e a precipitação efetiva ou útil considerada unitária, tendo uma intensidade constante no tempo, aproximadamente uniforme sobre a bacia, e

com duração **D** (HUD), geralmente unitária. A precipitação efetiva unitária com duração **D** é designada por **P**, sendo igualada a 1 mm, 1 cm ou 1 polegada.



**Figura 8 - Hidrograma unitário com duração **D**, HUD**  
Portela, 2006, adaptada de Ponce, 1989

Os hidrogramas unitários são obtidos diretamente com dados referentes ao registo de caudais na bacia em questão. Na ausência destes dados, foram desenvolvidos outros métodos que estimam de forma indireta tais hidrogramas, a partir dos parâmetros físicos da bacia. Aos hidrogramas determinados com estes modelos chamam-se **Hidrogramas Unitários Sintéticos** (HUS). Assim, foram propostos vários métodos de cálculo a fim de se poder relacionar os parâmetros de uma dada bacia com as propriedades geométricas de um hidrograma, tais como o caudal de ponta e a duração total do escoamento direto e a forma, e de acordo com *Carvalho et al. (2006)*, os modelos mais usados são: 1) hidrograma adimensional e triangular do *Soil Conservation Service* (SCS), ou; 2) método de *Clark* em função do tempo de escoamento.

- **Caudal de ponta de cheia**

O caudal de ponta de cheia pode ser calculado com base em determinados fatores, sendo eles: 1) a precipitação média anual ou máxima para uma certa duração, e; 2) os parâmetros da bacia hidrográfica, área, inclinação, altura média, traduzidos pelo tempo de concentração ( $t_c$ ) e pelo Coeficiente de escoamento ( $C$ ). Tempo de concentração de uma bacia como o tempo necessário para que toda a sua área contribua para o escoamento superficial na secção de saída, também pode ser definido como o tempo necessário para que uma gota de água caída, no ponto hidráulicamente mais afastado da bacia, chegue à secção de saída. O tempo de concentração é único para cada bacia hidrográfica e depende essencialmente da área, forma, inclinação, rede de drenagem, características geológicas, tipo e ocupação do solo. Para determinar o tempo de concentração com rigor, deve fazer-se o somatório dos tempos de escoamento ( $t_e$ ) ao longo dos

vários troços de drenagem de uma dada bacia. O tempo de escoamento é estimado com base no valor da velocidade média, sendo esta determinada em função da cobertura e declive da bacia. Para tal, é necessário saber qual a rugosidade da superfície, a forma e o declive do troço.

Várias fórmulas de cálculo têm sido desenvolvidas, sendo que se destaca o método do SCS para determinar o caudal de ponta, partindo do cálculo das perdas iniciais a partir de um evento de precipitação. Depois de vários estudos em meio urbano, são aconselhados os seguintes valores de tempo de concentração (Tabela 1):

**Tabela 1 - Valores do tempo de concentração para bacias urbanas (em minutos)**  
Carvalho *et al.*, 2006

Áreas urbanas	Muito inclinadas (>8%)	Inclinadas (1.5% a 8%)	Médias e planas (<1.5%)
Áreas impermeáveis superiores a 50%	5	7.5	10
Áreas impermeáveis inferiores a 50%	5	10	15

Relacionando o hidrograma com o coeficiente de escoamento e o tempo de concentração e segundo *Carvalho et al. (2006)*, pode afirmar-se que o valor de C tem grande influência no volume do hidrograma, enquanto que o  $t_c$  tem grande influência na forma e pico do hidrograma.

## 2.5 Modelos hidrológicos

### 2.5.1 Modelos hidrológicos em geral

Segundo *Tucci (1998)*, um modelo hidrológico define-se como uma das ferramentas que a ciência desenvolveu para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. A aplicação de modelos hidrológicos envolve: a escolha do modelo, a seleção e análise dos dados necessários, ajuste e verificação dos parâmetros, definição de cenários de aplicação, prognóstico, e a estimativa das incertezas dos resultados. A escolha de um modelo hidrológico para um determinado problema, depende: 1) objetivos do estudo - pois modelos com um grande número de parâmetros podem tornar-se ineficientes em problemas que não exigem grande detalhe no processo; 2) características das bacias e da rede de drenagem – existe grande variabilidade das características físicas e climáticas das bacias, e cada modelo, bem como as suas técnicas e algoritmos podem necessitar de diferentes parâmetros que devem traduzir as características mais importantes face aos objetivos; 3) disponibilidade dos dados

– a escassez dos dados influencia a incerteza dos prognósticos, e; 4) familiarização com o modelo – requer que o utilizador tenha uma boa sensibilidade sobre os parâmetros e sobre o efeito dos processos na bacia. Face à variabilidade destes elementos, tem aparecido um número diversificado de modelos hidrológicos, desenvolvidos com o objetivo de antecipar e tomar medidas preventivas face ao escoamento superficial gerado nas bacias em consequência da ocorrência de eventos extremos estatisticamente possíveis, procurando saber: 1) o impacto da urbanização; 2) uma inundação em tempo real, e; 3) o escoamento superficial proveniente da zona urbana afluente de um rio. Contudo, apresenta algumas limitações, sendo elas: 1) a quantidade e qualidade dos dados; 2) dificuldade de formular matematicamente alguns processos, e; 3) simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenómenos.

### **2.5.2 Modelos de precipitação-escoamento**

Chama-se modelos de precipitação-escoamento aos modelos que têm o principal objetivo de transformar a precipitação em escoamento. Para *Carvalho et al. (2006)*, esta transformação começa na determinação da precipitação útil, que é parte da precipitação que se transforma em escoamento superficial, ou seja a diferença entre a quantidade de água precipitada e as perdas. Para se determinar a precipitação útil ao longo do tempo, é necessário o conhecimento do hietograma, bem como os processos relacionados com as perdas, em particular a infiltração que varia ao longo do tempo, designando-se este processo por modelos de perdas.

A precipitação total é transformada em precipitação útil ou efetiva, por vários processos: 1) Interceção – refere-se à parcela de precipitação que é intercetada pela vegetação ou qualquer outro objeto, onde é absorvida ou devolvida à atmosfera por um processo de evaporação. Quando uma ocorrência de chuvas é de fraca intensidade, a interceção é significativa, mas para precipitações intensas excecionais, as perdas por interseção são praticamente desprezáveis; 2) Infiltração – refere-se ao processo de passagem da água através da superfície do solo para o seu interior, que contribui para a determinação do volume de cheia e para a forma do hidrograma de cheia; 3) Armazenamento em depressões do solo - refere-se à parte da precipitação que fica retida nas depressões do solo, que representa por um lado um atraso no hidrograma e também perdas de precipitação, já que favorece a evaporação e infiltração; 4) Evapotranspiração – em Portugal, este processo no contexto de perdas de precipitação, é praticamente desprezável (*Portela, 2006*).

### 2.5.3 Modelos de perdas de precipitação

Existem vários modelos para determinar as perdas de precipitação e consequentemente a precipitação efetiva, e geralmente distinguem-se dois tipos de perda: 1) uma perda inicial, que corresponde aos primeiros instantes de uma precipitação, e; 2) uma perda contínua, que por norma decresce ao longo do tempo. Existem vários modelos que consideram as perdas iniciais devido à interceção da vegetação e retenção, e perdas contínuas devidas à infiltração que podem ser estimadas pelas equações de *Horton* ou *Green-Ampt*. No entanto, os métodos mais utilizados como o método do SCS e o método racional, definem as perdas de um modo indireto, através de coeficientes ou parâmetros estimados com base no declive, no tipo de solo e na respetiva ocupação. O método do SCS é o método que será utilizado nesta dissertação, a fim de se determinarem as perdas iniciais.

De uma forma geral, o método do SCS tem sido muito utilizado para simular hidrogramas de cheias aquando da execução de projetos de obras hidráulicas. Foi originalmente preparado para simular de forma concentrada uma bacia, mas também pode ser usado em conjunto com outros modelos de escoamento. Este modelo possui os seguintes algoritmos: 1) precipitação de projeto; 2) determinação da precipitação útil ou escoamento superficial, e; 3) propagação do escoamento da bacia. De seguida, será descrito de forma sucinta o modelo do SCS como método do cálculo das perdas iniciais, bem como o método do cálculo do número de escoamento (CN).

#### • SCS - Método do cálculo das perdas iniciais (Ia)

O método de cálculo das perdas iniciais através do SCS, considera essencialmente as perdas por infiltração. Segundo *Ponce, 1989* (in *Portela, 2006*), o método do SCS, aquando de um acontecimento pluvioso, admite que “ a razão entre a altura da precipitação retida na bacia hidrográfica após o início do escoamento superficial e a capacidade máxima de retenção de água na bacia, é igual à razão entre a precipitação efetiva e o escoamento superficial potencial”, sendo expressado pela seguinte fórmula (Equação 2):

$$\frac{Fa}{S} = \frac{Pe}{P-Ia} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$P$  = Precipitação (mm),

$Pe$  = Precipitação efetiva (mm),

$Fa$  = Altura de precipitação retida na bacia hidrográfica após o início do escoamento superficial representado, ou seja, as perdas contínuas de precipitação (mm),

$S$  = Potencial máximo de retenção, após o começo do escoamento superficial (mm),

$Ia$  = Perdas iniciais, antes do escoamento começar (mm),

$P-Ia$  = Escoamento superficial potencial (mm)

Aplicando o princípio da continuidade, em que a precipitação é igual ao somatório da precipitação efetiva, com as perdas iniciais e a altura da precipitação retida na bacia após o início do escoamento superficial, vem que (Equação 3):

$$P = Pe + Ia + Fa \quad \text{Equação 3}$$

Assim, resolvendo a equação anterior em ordem a  $Fa$ , e substituindo na Equação 2 o resultado alcançado, obtém-se a equação do SCS para o escoamento superficial, expresso na seguinte equação (Equação 4):

$$Q = Pe = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia)+S} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$Q$  = Escoamento direto que iguala à precipitação efetiva (mm)

$Ia$ , significa todas as perdas iniciais antes do escoamento começar, incluindo a água retida nas depressões da superfície, água intercetada pela vegetação, evaporação e infiltração. Este parâmetro pode ser altamente variável, mas geralmente está relacionado com os parâmetros do solo e da respetiva cobertura. Com base em estudos experimentais em pequenas bacias hidrográficas onde predomina a agricultura, o SCS propôs que  $Ia$  fosse aproximadamente 20% da capacidade máxima de retenção de água na bacia hidrográfica, seguindo uma aproximação, segundo uma equação empírica (Equação 5):

$$Ia = 0.2S \quad \text{Equação 5}$$

Numa bacia quase impermeável as perdas iniciais são mínimas, e numa bacia de elevada permeabilidade os valores de  $Ia$  são elevados. Sendo  $Ia$  um parâmetro independente, se se remover esta aproximação, isso permitirá o uso da combinação de  $S$  e  $P$  para produzir uma quantidade de escoamento único. Assim, substituindo a Equação 5 na Equação 4, tem-se a Equação 6:

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad \text{Equação 6}$$

É de salientar que a anterior equação só se aplica quando  $P$  excede  $0.2S$ . Caso contrário ( $P < 0.2S$ ), o escoamento direto será nulo ( $Q = P_e = 0$ ).

$S$  está relacionado com o solo e com as condições de cobertura da bacia, através do CN. Os valores de CN estão compreendidos entre 0 e 100, e  $S$  está relacionado com CN, considerando em polegadas ou em milímetros, respetivamente a Equação 7 e a Equação 8:

$$S = \frac{1000}{\text{CN}} - 10 \quad \text{Equação 7}$$

$$S = \frac{25400}{\text{CN}} - 254 \quad \text{Equação 8}$$

Analisando estas equações, verifica-se que para um valor de CN igual a zero, se obtém um valor  $S$  infinito, e para um valor de CN igual a 100 se irá obter um valor de  $S$  nulo. Assim se justifica, que o valor de CN possa variar apenas, entre os valores 0 e 100, sendo que uma bacia com um CN de 100 é totalmente impermeável, isto é, dispõe de uma capacidade nula de absorção da precipitação (Correia, 1983 in Abreu, 1983).

#### • **SCS - Método do cálculo do número de escoamento (CN)**

O método do cálculo de CN baseia-se fundamentalmente, na metodologia SCS do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América. As técnicas desenvolvidas pelo SCS não foram verificadas experimentalmente em Portugal, daí Correia 1983 (in Abreu, 1983) referir o facto de se ter algum cuidado na sua utilização, nomeadamente no que se refere ao regime de precipitação. Contudo, há razões para admitir que estas técnicas têm um razoável grau de generalização. Segundo o SCS, os principais fatores que contribuem para este cálculo, são o tipo de solo, ocupação do solo, grupo hidrológico dos solos (GHS) e condições de escoamento antecedentes (humidade antecedente). Também há que ter em conta se as áreas impermeáveis têm saída direta para o sistema de drenagem, ou se o fluxo se espalha por áreas permeáveis, antes de entrar no sistema de drenagem.

Segundo esta metodologia, os valores de CN foram determinados para zonas urbanas, cultivos agrícolas, outras agriculturas e uso de pastagens áridas e semiáridas. Mas, como o âmbito desta dissertação incide fundamentalmente no meio urbano, será de seguida apresentada a metodologia segundo o SCS apenas para meio urbano.

A maioria das zonas urbanas são parcialmente cobertas por superfícies impermeáveis. Assim, os valores de infiltração do solo podem variar muito, sendo afetados pela permeabilidade da superfície. Os solos são geralmente classificados em quatro grupos hidrológicos (A, B, C e D), de acordo com a taxa mínima de infiltração que é obtida considerando o solo a descoberto após

humedecimento prolongado. Estes GHS foram determinados segundo a variedade de solos existentes nos Estados Unidos da América, mas já vários estudos realizados em Portugal usaram este tipo de classificação, daí também ser usado nesta dissertação.

Os quatro grupos hidrológicos do solo definidos pelo SCS são de seguida descritos, e representados graficamente na Figura 9:

**Grupo A:** solos com um potencial de escoamento baixo tendo uma alta taxa de infiltração mesmo quando completamente humedecidos. Incluem essencialmente areias profundas com drenagem boa ou excessiva.

**Grupo B:** solos com taxa de infiltração moderada, quando completamente humedecidos. Incluem essencialmente solos de profundidade mediana, com textura moderadamente fina e grosseira, tendo uma taxa de transmissão de água moderada.

**Grupo C:** solos com um potencial de escoamento elevado, tendo uma taxa de infiltração baixa quando completamente humedecidos. Incluem essencialmente solos de profundidade baixa contendo camadas de argilas. Estes solos têm uma baixa taxa de transmissão de água.

**Grupo D:** solos com potencial elevado de escoamento, tendo uma taxa de infiltração muito baixa mesmo quando completamente humedecidos. Incluem essencialmente solos de profundidade muito baixa contendo lençóis de água junto à superfície e camadas de argila. Os solos têm uma baixa taxa de transmissão de água.

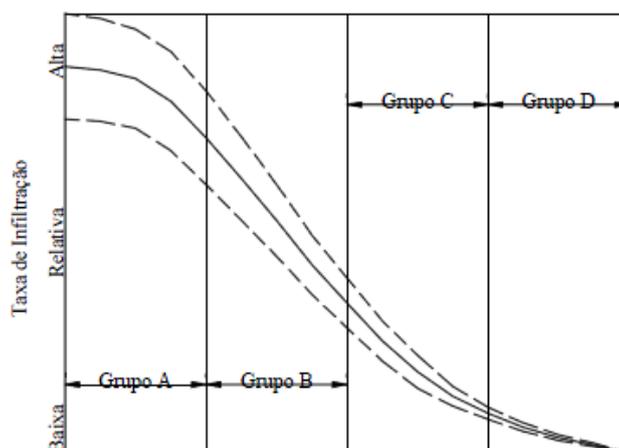


Figura 9 - Curva esquemática das taxas de infiltração relativas dos grupos hidrológicos do solo  
Sartori, 2004

A Tabela 2 apresenta a relação do CN com o tipo de cobertura, proposta pelo SCS para zonas urbanas.

Tabela 2 - Correspondência entre CN e o tipo de cobertura do solo, em meio urbano  
TR-55, 1986

Descrição da Cobertura		Número de Escoamento para o Grupo Hidrológico dos Solos			
Tipo de Cobertura e Condição Hidrológica	Percentagem média de área impermeável	A	B	C	D
<i>Áreas urbanas totalmente desenvolvidas (vegetação estabelecida)</i>					
Espaços abertos (parques, jardins, campos de golfe):					
Más condições (cobertura de grama < 50%)		68	79	86	89
Médias condições (cobertura de grama 50% a 75%)		49	69	79	84
Boas condições (cobertura de grama > 75%)		39	61	74	80
Áreas impermeáveis:					
Estacionamentos pavimentados, telhados, calçadas etc.		98	98	98	98
Ruas e estradas:					
Pavimentadas; calçadas e galerias pluviais		98	98	98	98
Pavimentadas; valas abertas		83	89	92	93
Com cascalho		76	85	89	91
De terra		72	82	87	89
Áreas urbanas desertas:					
Paisagismo natural deserto (apenas áreas permeáveis)		63	77	85	88
Paisagismo artificial deserto (barreira impermeável de erva, arbusto do deserto com areia ou cobertura de cascalho)		96	96	96	96
Distritos bastante urbanizados:					
Comercial e de negócio	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Bairros residenciais por tamanho medio do lote:					
1/8 hectares ou menos (casa de cidade)	65	77	85	90	92
1/4 hectares	38	61	75	83	87
1/3 hectares	30	57	72	81	86
1/2 hectares	25	54	70	80	85
1 hectare	20	51	68	79	84
2 hectares	12	46	65	77	82
<i>Desenvolvimento de áreas urbanas</i>					
Áreas recém classificadas (apenas áreas permeáveis, sem vegetação)					
		77	86	91	94

Observando a tabela anterior e tratando-se de um estudo urbano, verifica-se que praticamente todos os valores de CN são superiores a 50, o que corresponde à sua respectiva impermeabilidade. É importante referir que estes valores não correspondem à percentagem de áreas impermeáveis.

Correia, 1983 (in Abreu, 1983), menciona que numa zona urbana há um aumento de CN e consequente diminuição da capacidade máxima de retenção, S, bem como uma diminuição das perdas iniciais,  $I_a$ , sendo que estas alterações se traduzem num maior valor de precipitação útil, Q, para iguais valores de precipitação total, P.

## 2.5.4 Modelos de transformação

Nesta dissertação, o método de cálculo do hidrograma unitário sintético usado, irá ser o do SCS, pois sua utilização na análise de cheias em Portugal Continental é significativamente generalizada (Portela, 2006).

### • SCS - Método do cálculo do Hidrograma Unitário Sintético (HUS)

O HUS do SCS pode ser representado por um hidrograma curvilíneo adimensional, onde os sucessivos caudais de cheia ( $qp$ ) e os respetivos instantes de ocorrência ( $tp$ ) são apresentados sob a forma de fração, ou de um modo simplificado por um hidrograma unitário triangular, onde é característico um menor tempo de base ( $tb$ ). Como se pode analisar na Figura 10, o hidrograma unitário triangular é semelhante ao hidrograma unitário curvilíneo embora o tempo de base corresponda a  $8/3 tp$  em vez de  $5 tp$ . O ramo ascendente, este apresenta 37.5% do volume de cheia e a duração do ramo descendente corresponde a  $5/3$  de  $tp$  (Portela, 2006).

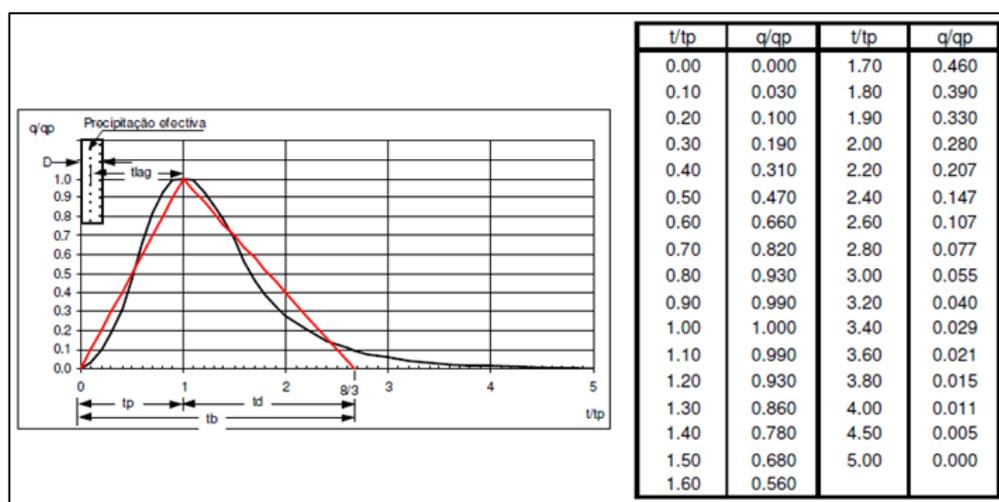


Figura 10 - HUS do SCS com o correspondente hidrograma triangular e a tabela de relação entre o  $t/tp$  e  $q/qp$  Portela, 2006

O caudal de ponta de cheia do hidrograma unitário ( $qp - m^3/s$ ) é definido pela seguinte equação (Equação 9):

$$qp = \frac{0.2083A}{tp} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$A$  = área da bacia hidrográfica ( $Km^2$ ),

$tp$  = tempo para a ponta (h) do hidrograma unitário

O tempo para a ponta ( $tp$ ), é dado pela relação expressa na Equação 10:

$$tp = \frac{D}{2} + tlag \quad \text{Equação 10}$$

Onde para o tempo de atraso ( $tlag$ ) (intervalo de tempo que decorre entre o centro de gravidade do hietograma da precipitação efetiva e a correspondência do caudal de ponta de cheia do hidrograma), o SCS sugere a adoção de 60% do tempo de concentração da bacia hidrográfica, ou seja  $tlag = 0.6tc$ .

Neste caso do HUS do SCS, a fórmula para o cálculo de  $tc$  é a seguinte (Equação 11):

$$tc = \frac{100}{0.3048^{0.8}} \times \frac{L^{0.8} \times \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{1900 \times Sm^{0.5}} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$L$  = comprimento do curso de água principal (m)

$Sm$  = declive médio da bacia hidrográfica (%)

$CN$  = número de escoamento na bacia hidrográfica

E para determinar o valor de  $D$  (duração da precipitação efetiva unitária associada à definição do HUS), *Viessman et al. 1996* (in *Portela, 2006*), aconselham a adoção de  $0.2tp$ , não devendo  $D$  ultrapassar os  $0.25tp$ . Assim, relacionando a Equação 10 com o  $tlag$  relativamente a  $D$ , vem que (Equação 12):

$$\begin{cases} D \approx 0.20tp \\ D < 0.25tp \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} D \approx 0.122tlag \\ D < 0.286tlag \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} D \approx 0.133tc \\ D < 0.171tc \end{cases} \quad \text{Equação 12}$$

## 2.5.5 Modelos de propagação

Segundo *Portela (2006)*, os modelos de propagação de cheia ao longo de cada segmento da rede de drenagem podem ser classificados em, modelos agregados ou distribuídos. Como exemplo de modelos agregados, tem-se o modelo de *Muskingum Cunge* e onda cinemática e como

distribuído tem-se o modelo *Lag*. No modelo *Lag* consideram-se separadamente os efeitos de atraso e de armazenamento. A separação destes dois efeitos não é um processo considerado válido, mas fornece uma representação razoável do efeito combinado. Este modelo é bastante utilizado nomeadamente em estudos de drenagem urbana, por ser também mais adequado para pequenos segmentos da rede num tempo previsível, não variando com a profundidade, daí ser o utilizado nesta dissertação.

- **Modelo Lag**

O modelo de *Lag* apresenta uma simples translação da onda de cheia, sem qualquer amortecimento ou difusão, onde o único parâmetro necessário é o “lag time”, ou seja o tempo de atraso. A Equação 13 representa a forma de cálculo do tempo de atraso da bacia (horas) com base no CN, tendo sido desenvolvida para bacias inferiores a 800 ha. Este método pode ser aplicado apenas a algumas sub-bacias, ou, se não for especificado qual o critério, automaticamente calculará para todas as sub-bacias.

$$Lag = \frac{L^{0.8} \times (S+1)^{0.7}}{1900 \times Y^{0.5}} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

$L$  = comprimento da bacia hidráulica (pés),

$S = \frac{1000}{CN} - 10$  (valores de CN entre 50 e 95 são os apropriados para esta equação),

$Y$  = declive da bacia (%)

## 2.6 Noções gerais de hidráulica na análise de cheias

A hidráulica é o ramo das ciências físicas que tem por objetivo o estudo dos líquidos em movimento, escoamentos.

### 2.6.1 Tipos de escoamentos

O escoamento pode-se definir em relação ao seu tipo, bem como em relação ao tempo. Existem três tipos de escoamentos: 1) escoamento com superfície livre – quando um líquido escoar em contacto com a atmosfera, como é o caso de um canal (curso de água natural ou artificial); 2) escoamento em pressão – quando um escoamento se processa num tubo fechado,

ocupando toda a secção do tubo, com pressões diferentes da pressão atmosférica, como é o caso de escoamento em condutas, e; 3) escoamento em meio poroso – quando o líquido escoar em meio poroso, como é o caso dos aquíferos. Quanto ao tempo, o escoamento pode apresentar-se segundo um regime permanente (quando as características do escoamento em cada ponto não variam com o tempo, isto é, são independentes do tempo) ou caso contrário segundo um regime variável.

Estudando apenas o escoamento como um regime permanente, este pode ser uniforme ou variado. Chama-se escoamento de regime permanente uniforme, quando se está perante um canal suficientemente longo, e com inclinação, secção, rugosidade e caudal constante, onde as perdas de atrito são compensadas pela inclinação do fundo. O regime deixa de ser uniforme quando existe uma singularidade (estreitamento, alargamento, descontinuidade da soleira, etc) que provoca uma alteração da superfície livre podendo ou não estar associada a uma perda localizada de energia, chamando-se escoamento permanente variado. Os movimentos variados podem dividir-se em dois grupos: 1) movimento gradualmente variado – quando os parâmetros hidráulicos só mudam muito lentamente numa secção para outra, estendendo-se a distâncias consideráveis; 2) movimento rapidamente variado – verifica-se uma evolução rápida, por vezes descontínua das características do escoamento, ocupando em geral uma zona relativamente pequena (*Lencastre, 1983*).

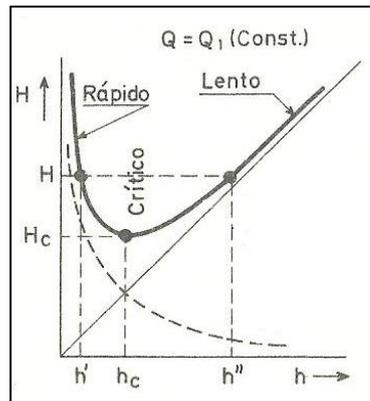
Nesta dissertação, apenas vai ser estudado o escoamento com superfície livre, segundo um regime permanente variado, pois as ruas apresentam alterações de declive ao longo da sua extensão e, conseqüentemente, variações na superfície livre.

## **2.6.2 Energia dos escoamentos**

A energia de um escoamento ou carga hidráulica é geralmente referida por unidade de peso, apresentando as unidades de um comprimento e distingue-se por três parcelas: 1) energia de posição traduzida pela cota geométrica – altura acima de um plano de referência; 2) energia de pressão – pressão expressa em altura do líquido ou altura piezométrica, e; 3) energia cinética – igual ao quadrado da velocidade sobre duas vezes a aceleração da gravidade, altura cinética. A linha de energia ou linha de carga hidráulica obtém-se somando as três alturas e é sempre decrescente ao longo do escoamento.

No regime uniforme, a perda de energia/carga é constante e a linha de energia é retilínea e paralela à superfície livre e ao fundo do canal. No regime variado, uma vez que a superfície livre

deixa de ser paralela ao fundo, a altura da água varia e consequentemente a perda de energia/carga também varia. No caso de um regime gradualmente variado, a linha de energia é curvilínea. No entanto se o declive e a velocidade são baixos, a linha de energia em cada secção aproxima-se do valor da superfície livre. A Figura 11 apresenta no escoamento com superfície livre sobre um qualquer declive, a altura da água *versus* a correspondente energia.



**Figura 11- Alturas de água, h, em função da energia específica, H**  
Adaptada de Lencastre, 1983

Com a figura, verifica-se que para o mesmo caudal: 1) a curva tem um mínimo de energia, a energia crítica ( $H_c$ ), que corresponde a um único valor de altura, a altura crítica ( $h_c$ ), definindo-se assim regime crítico como o mínimo de energia com que determinado caudal esco numa secção, ou ao máximo caudal que com dada energia, escoa na mesma secção; 2) qualquer outra energia ( $H$ ) corresponde a duas alturas diferentes o que quer dizer que o escoamento se pode fazer com duas alturas diferentes: uma menor ( $h'$ ) e velocidade maior correspondente ao regime rápido e outra maior ( $h''$ ) com velocidade menor, correspondente ao regime lento.

O escoamento com superfície livre é função do parâmetro adimensional que traduz a influência da gravidade (Equação 14).

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

$U$  = velocidade média (m/s)

$h$  = altura da água

$g$  = aceleração da gravidade (9.81 m/s<sup>2</sup>)

Para pequenas perturbações da superfície livre, a velocidade de propagação destas, num canal retangular de largura indefinida, é:  $U_c = \sqrt{gh}$ .

Para um número de Froude ( $Fr$ ) superior a 1, as perturbações pequenas não se propagam para montante e o movimento diz-se rápido ou tendencial; se  $Fr < 1$ , as pequenas perturbações propagam-se para montante, e o regime diz-se lento ou fluvial. Para  $U_c = \sqrt{gh}$  e, consequentemente  $Fr = 1$ , tem-se o regime crítico (*Lencastre, 1983*).

## **2.7 Cálculo de CN utilizando SIG**

### **2.7.1 Nota prévia**

Os SIG têm mostrado uma grande utilidade para determinar o parâmetro CN em função da manipulação/cruzamento da carta geológica e da carta de ocupação do solo. O valor de CN determina-se facilmente a partir da informação das características do solo, da ocupação e da área permeável e impermeável que afetam a distribuição do escoamento superficial no tempo. Para isso é necessário: 1) a carta geológica como informação acerca do tipo de solo de que é constituída a área em questão, possibilitando a determinação da respetiva capacidade de infiltração, e; 2) a carta de ocupação do solo que dá informação do tipo de infraestruturas existentes na superfície.

Existem vários métodos para determinar a ocupação do solo, desde reconhecimento de campo, fotografias aéreas e interpretação dos mapas de uso do solo. As técnicas de deteção remota, que extraem informação temática através de imagens de satélite, têm-se revelado um meio eficaz na obtenção de informação atualizada acerca da superfície da terra, assumindo assim um papel fundamental na classificação de imagens. Estas técnicas de classificação estão normalmente incorporadas num SIG, o que facilita em muito a obtenção da respetiva informação.

O cruzamento da informação do tipo de solo com ocupações de solos impermeáveis é um dos critérios mais importantes a estudar pois, muitas vezes, as formações à partida mais permeáveis encontram-se muito impermeabilizadas através de construções de edifícios ou vias. Ao urbanizar, está-se a retirar permeabilidade contribuindo significativamente para o aumento de escorrências, com consequente aumento dos caudais dos pequenos cursos de água (*Faria et al. 2005*).

### **2.7.2 Classificação de imagens digitais**

A classificação de imagens digitais é uma análise qualitativa uma vez que se extrai informação temática da imagem. Consiste na atribuição de uma classe a cada *pixel* da imagem para

o que usa a informação espectral numa ou várias bandas. Este processo forma uma imagem constituída por um mapa de *pixels* classificados, representados por cores ou símbolos gráficos (mosaico de *pixels*), cada um deles pertencendo a uma classe ou tema particular. Obtém-se assim um mapa temático da imagem original. A classificação pode ser efetuada utilizando o método da classificação supervisionada ou não-supervisionada.

O método de classificação supervisionada de uma imagem multiespectral é o mais usado em deteção remota, consistindo na atribuição de *pixels* com resposta espectral idêntica a uma determinada classe, com o auxílio de um operador. Este decide as diferentes classes de ocupação do solo (urbanizado, água, vegetação, etc.) identificando-as e localizando-as na imagem através de áreas de treino. Também é necessário que o operador execute atividades de suporte deste supervisionamento, como reconhecimento *in situ*, análise de fotografias aéreas e/ou mapas de região, e ainda o conhecimento pessoal do operador da zona abrangida pela imagem. Uma escolha correta das áreas de treino é essencial para que o classificador obtenha parâmetros descritivos das várias classes que se pretendem identificar na imagem de forma a poderem ser melhoradas para parâmetros aceitáveis. A classificação supervisionada implica as seguintes etapas:

- Escolha das classes de interesse a classificar na imagem.
- Escolha dos *pixels* representativos para cada classe identificada, bem distribuídos na imagem, que vão servir, uma vez conhecidas as suas características espectrais, para classificar a imagem, designando-se por fase de treino. Com estas áreas de treino, determina-se o conjunto de parâmetros (valor máximo, mínimo, média, variância, etc.) que vão permitir descrever melhor as respostas espectrais de cada classe.
- Cálculo, para cada área de treino, dos diversos parâmetros que permitem analisar melhor as respostas espectrais de cada classe (assinatura de cada classe), como o número de *pixels* pertencentes a cada área de treino, desvio padrão, valor médio e matrizes de correlação e covariância em cada uma das bandas.
- Realização da classificação propriamente dita, isto é da atribuição de valores aos *pixels* de cada classe (*pixels* pertencentes à classe p terão valor numérico igual a p).
- Criação de informação com os resultados da classificação (relatórios com informação numérica ou mapas temáticos que permitem visualizar os resultados), de forma a analisar a qualidade da classificação.

A classificação não-supervisionada permite encontrar grupos de *pixels* com propriedades espectrais semelhantes, com o mínimo de intervenção do operador. Diversos algoritmos, iterativos

e não iterativos, têm sido desenvolvidos para classificar de forma automática dados das mais diversas ocupações do solo. Uma vez agrupados os *pixels* no espaço multiespectral, cabe ao operador analisar as classes encontradas e identificá-las, relacionando-as com as classes pretendidas (Pereira, 2006).

Vários algoritmos de classificação supervisionada podem ser utilizados para atribuir um dado *pixel* à classe correspondente em função de um critério estatístico. Normalmente, a escolha de um classificador ou regra de decisão depende da natureza dos dados de entrada e da saída desejada, mas também pode depender do tipo de classificador disponível no *software* em uso, como é o caso do ArcGIS que utiliza o algoritmo da máxima verossimilhança. Não é do âmbito desta dissertação a discussão do melhor método a utilizar, daí neste caso apenas se utilizar o método da máxima verossimilhança, que é o implementado neste pacote de *software* e que se utilizou.

### 2.7.2.1 Algoritmo da máxima verossimilhança

O algoritmo da máxima verossimilhança é um classificador paramétrico na medida em que associa à assinatura espectral uma distribuição normal. Para Jensen (2005), neste método um dado *pixel* pertencerá a uma dada classe espectral se a probabilidade de pertencer a essa classe for maior que a possibilidade de pertencer a outra. A probabilidade de um *pixel* pertencer a uma dada classe é calculada a partir da função densidade de probabilidade para uma distribuição normal, sendo esta completamente descrita pelo vetor médio da classe ( $\mathbf{m}_c$ ) e pela matriz de covariância ( $\mathbf{V}_c$ ) da classe  $\mathbf{c}$ . Segundo Richard et al., 1999 (in Rocha, 2002), a regra de decisão aplicada ao vetor de medição desconhecido  $\mathbf{x}$  é:

$\mathbf{x}$  pertence à classe  $\mathbf{c}_j$  se e só se:

$$\ln P(\mathbf{x}|\mathbf{c}_j) \geq \ln P(\mathbf{x}|\mathbf{c}_i) \text{ para } i = 1,2,3, \dots, m \text{ e } i \neq j \quad \text{Equação 15}$$

Com

$$P(\mathbf{x}|\mathbf{c}_i) = (2\pi)^{-\frac{2n}{2}} \cdot |\mathbf{V}_i|^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)^T \cdot \mathbf{V}_i^{-1} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)\right) \quad \text{Equação 16}$$

Ou

$$\ln P(\mathbf{x}|\mathbf{c}_i) = \left(-\frac{1}{2} \ln[\det(\mathbf{V}_i)]\right) - \left[\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)^T \cdot \mathbf{V}_i^{-1} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)\right] + cte \quad \text{Equação 17}$$

Onde  $\mathbf{m}$  é o número de classes e  $\mathbf{n}$  o número de bandas, correspondendo ao determinante da matriz  $\det(\mathbf{V}_c)$  de covariância  $\mathbf{V}_c$ .

Aplicando a Equação 17, um dado *pixel* irá ser atribuído à classe com probabilidade mais alta, mas caso existam *pixels* cujos valores se encontram no limiar entre duas classes, onde a probabilidade para ambas é baixa, considera-se *pixels* não classificados.

Segundo *Crisógono (2011)*, este método apresenta vantagens, nomeadamente o facto de ser o mais usado em processos de imagens de satélite, apresentar bons resultados e utilizar métodos probabilísticos. Contudo, não deixa de ter desvantagens. As principais desvantagens são: 1) método pouco eficiente computacionalmente, devido ao elevado número de cálculos necessários para classificar cada *pixel*; 2) classificação à partida prejudicada caso não existam *pixels* suficientes nas áreas de treino que permitam valores significativos de médias, variâncias e covariâncias caso exista um grau elevado de correlação entre bandas, ou caso as classes não respeitem uma distribuição normal.

### **2.7.3 Avaliação da incerteza no processo de extração de informação temática a partir de imagens multiespectrais**

Existem muitas fontes de incerteza em todo o processo de obtenção do limite das áreas de inundação, que influenciam os mapas produzidos. Elas podem provir da obtenção dos dados, do tipo de interpolador que gerou o MDT ou MDS, da classificação de imagens, entre outros. Como o MDT e MDS foram gerados *a priori*, não se possui a informação original para se proceder a essa avaliação. Assim, neste caso, apenas se irá falar na extração de informação temática na classificação de imagens, visto ser o único processo a que se tem acesso completo.

Na fase final da extração de informação temática para a carta de uso do solo, deve avaliar-se a qualidade do mapa final, a fim de se poder classificar como fiável ou não. Muitos processos têm sido desenvolvidos, mas o mais comum é a comparação dos dados classificados com os dados verdadeiros referentes ao solo, construindo a chamada matriz de confusão. Também o cálculo da exatidão global, exatidão do produtor, exatidão do utilizador, e análise do fator K é comum ser determinada.

Para se avaliar com clareza e confiança a exatidão da classificação, é necessário comparar sistematicamente duas fontes de informação: 1) *pixels* constituintes do mapa de classificação; 2) informação presente no mapa de referência (em princípio, corresponde à verdade terrestre). A relação entre estes dois conjuntos de informação é normalmente resumida na matriz de confusão, onde está representada a exatidão da classificação e caracterização do erro, podendo assim ajudar a refinar a classificação ou estimativas derivadas dela. Na Tabela 3 pode visualizar-se um exemplo típico de uma matriz de confusão:

Tabela 3 - Matriz de confusão

		Informação do mapa de referência				Total linha
		Classe	1	2	3	
Informação do mapa de classificação	1	$X_{1,1}$	$X_{1,2}$	$X_{1,3}$	$X_{1,k}$	$X_{1+}$
	2	$X_{2,1}$	$X_{2,2}$	$X_{2,3}$	$X_{2,k}$	$X_{2+}$
	3	$X_{3,1}$	$X_{3,2}$	$X_{3,3}$	$X_{3,k}$	$X_{3+}$
	k	$X_{k,1}$	$X_{k,2}$	$X_{k,3}$	$X_{k,k}$	$X_{k+}$
	Total coluna	$X_{+1}$	$X_{+2}$	$X_{+3}$	$X_{+k}$	$N$

A matriz de confusão é quadrada com  $n$  classes, onde as colunas representam a informação do terreno, ou seja a informação de referência, e as linhas representam a classificação gerada a partir da análise dos dados detetados remotamente. O ponto de interseção das linhas com as colunas,  $X_{i,i}$ , resume-se ao número de unidades de amostragem atribuído a uma determinada classe, em relação à classe real, sendo  $N$  o número total de amostras avaliadas. A diagonal principal da matriz representa os *pixels* que foram atribuídos à classe correta. Os erros de classificação podem ser classificados de omissão (a não atribuição a uma classe correta), bem como de comissão (a atribuição a uma classe errada).

Ao construir esta matriz, há vários aspetos a ter em conta, tais como:

- 1) Ter a noção dos problemas associados na comparação entre a classificação e o mapa de referência;
- 2) O número total de amostras a serem avaliados para cada classe;
- 3) O plano de amostragem apropriado (utilizando técnicas tradicionais e/ou geoestatísticas);
- 4) A informação de referência do solo nos locais de amostragem, e;
- 5) As estatísticas descritivas e multivariadas (normal e/ou fuzzy) para avaliar a exatidão da informação derivada de classificação.

Muitos analistas deste tipo de imagens, a fim de se avaliar a exatidão da classificação, baseiam-se apenas na informação de base, ou seja na própria imagem (onde foram geradas as áreas de treino) que deu origem à classificação. No momento de decisão, se um determinado *pixel* pertence a uma dada classe ou não, por vezes é necessário averiguar a sua vizinhança, atribuindo-o à classe de maior frequência de ocorrência, minimizando assim os efeitos dos erros de registo geométrico na produção da classificação.

Em relação ao tamanho da amostra, este pode ser definido através do uso de uma distribuição binomial ou multinomial, contudo e após alguns estudos, *Congalton et al., 1999* (in *Jensen, 2005*), sugere que a regra ideal será a atribuição de um mínimo de 50 amostras pontuais para cada classe de cobertura do solo. Se a área é especialmente grande (superior a 1 milhão de hectares) ou a classificação tem um grande número de classes (superior a 10 classes), o número mínimo de amostras deve ser aumentado para 75 ou 100 amostras por classe. O número de amostras também pode ser ajustado, em função da importância relativa de cada classe, ou também pode ser útil reduzir o número de amostras em classes que mostram pouca variabilidade.

Em relação à localização geográfica (x,y) de cada amostra, existem segundo *Congalton et al., 1999* (in *Jensen, 2005*), cinco processos de amostragem: 1) amostragem aleatória; 2) amostragem sistemática; 3) amostragem aleatória estratificada; 4) amostragem estratificada sistemática, não-alinhada; 5) conglomerados. Contudo, muitos analistas de detecção remota preferem amostragens aleatórias estratificadas, ou seja uma amostra aleatória por classes que consiste na geração de pontos amostrais para cada classe, após a criação do mapa de classificação. Este processo é defendido, pela simples vantagem de que todas as classes, independentemente das suas proporções, irão ter pontos amostrais para a avaliação do erro. Contudo, apresenta a desvantagem de se ter que esperar pela conclusão do mapa de classificação. O facto de ser uma amostra aleatória por classes, apresenta um equilíbrio na validade estatística e na aplicação prática.

Depois da localização e dimensão da amostra estar definida, é necessário obter informação de referência do solo nos locais de amostragem. Para tal, procede-se a uma etiquetagem a fim de averiguar se está na classe correta ou a qual deveria pertencer. Após esta etiquetagem, é contabilizado o número de pontos amostrais que estão na classe correta e os que estão classificados de forma incorreta, e procede-se ao respetivo preenchimento da matriz de confusão.

Após a construção da matriz de confusão, é necessário proceder-se à sua avaliação, através de análises estatísticas. A exatidão global de um mapa de classificação define-se pela razão entre o número de pontos amostrais corretamente classificados e o número total de pontos amostrais, como mostra a fórmula (Equação 18):

$$E_{global} = \frac{\sum X_{ii}}{N} \quad \text{Equação 18}$$

Também se procede à avaliação individual das classes, onde o número de pontos corretamente classificados é dividido pelo somatório das linhas ou das colunas correspondentes, conforme o que se queira avaliar, designando-se por exatidão do utilizador ou exatidão do

produtor. A exatidão do produtor (**Ep**) (Equação 19) corresponde à divisão do número de pontos corretamente classificados, pelo somatório da coluna correspondente, apresentando uma medida de erro de omissão. A exatidão do utilizador (**Eu**) (Equação 20) corresponde à divisão do número de pontos corretamente classificados, pelo somatório da linha correspondente, apresentando uma medida de erro de comissão (Story et al., 1986 in Jensen, 2005). Felix et al., 1989 (in Jensen, 2005), defende que se devem usar sempre as três medidas de exatidão: exatidão global, exatidão do produtor e do utilizador, pois tanto se pode ser produtor como utilizador de mapas de classificação.

$$Ep = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \text{ Equação 19} ; \quad Eu = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \text{ Equação 20}$$

Para Rosenfield et al. 1986, Congalton 1991 e Paine et al. 2003 (in Jensen, 2005), também é comum usar-se a análise *Kappa* (*K*), que é uma medida de concordância ou exatidão entre o mapa de classificação e os dados do solo. *K* é calculado pela seguinte equação (Equação 21):

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \times x_{+i})} \text{ Equação 21}$$

Onde, *k* é o número de linhas da matriz,  $x_{ii}$  é o numero de observações na linha *i* na coluna *i*, e  $x_{i+}$  e  $x_{+i}$  são os somatórios das linhas *i* e colunas *i* respetivamente, e *N* é o número total de observações. Segundo Landis et al., 1977 (in Jensen, 2005), valores de *K* > 0.80 representam uma forte concordância ou exatidão entre o mapa de classificação e a classificação real do solo, valores de *K* entre 0.40 e 0.80 representam uma concordância moderada, enquanto valores de *K* < 0.40 representam uma má concordância.

#### 2.7.4 Cálculo do índice de vegetação

O cálculo do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) (Figura 12) foi desenvolvido por Rouse et al. (1974), e é expresso pela Equação 22 resultando do quociente entre a diferença e a soma das bandas do infravermelho próximo e vermelho.

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{\rho_{ivp} + \rho_v} \text{ Equação 22}$$

Em que:

$\rho_{ivp}$  – Reflectância no infravermelho próximo

$\rho_v$  – Reflectância no vermelho

Esta equação é aplicada diretamente em cada *pixel* nas bandas mencionadas anteriormente, obtendo-se um valor que se encontra entre o intervalo -1 e 1. Para *Jensen (2005)*, o aumento de valores positivos indica aumento da vegetação verde, e valores negativos indica superfícies sem vegetação, como água, terra estéril, neve, gelo ou nuvens. *Konecny (2003)* chega a afirmar que a vegetação verde tem um valor de NDVI de cerca de 0.7, enquanto a água, terras estéreis e as nuvens têm um valor de NDVI de cerca de -0.3.

Para *Fonseca (2004)*, o cálculo deste índice tem dois objetivos fundamentais: 1) realçar aspetos que permitem discriminar entre diferentes tipos de vegetação, e; 2) minimizar efeitos indesejáveis nas radiâncias do mesmo tipo de coberto, resultantes de diferenças de iluminação devidas à topografia. Uma das características do ciclo de vida da vegetação é a apresentação de respostas espectrais em diferentes bandas, onde a vegetação vigorosa apresenta altas refletâncias na banda do infravermelho e baixas refletâncias na banda do vermelho, enquanto que a vegetação senescente ou morta apresenta refletâncias equivalentes nestas bandas. Assim, as diferenças radiométricas existentes entre os dois tipos de vegetação acentuam-se na razão entre bandas, dando uma melhor discriminação de ambos os tipos de coberto.



Figura 12 – Índice de vegetação da diferença normalizada  
Adaptada de Gomes, 2011

## 2.8 Software utilizado

### 2.8.1 Considerações

Os SIG constituem uma ferramenta útil para a resolução de vários problemas relacionados com os recursos hídricos. Com o avanço tecnológico ao nível dos pacotes de *software* de SIG, surgiram muitas oportunidades para melhorar a modelação hidrológica e hidráulica dos sistemas das bacias hidrográficas. Há hoje em dia a possibilidade de integração da referida modelação com os SIG como uma alternativa de baixo custo e uma forma de automatizar processos, economizando tempo e esforço e também, uma melhoria na precisão em relação aos métodos tradicionais. A fim de dar uma resposta a todas estas questões, têm sido geradas várias ferramentas a nível computacional.

Um dos *softwares* SIG mais comuns no mercado é o ArcGIS desenvolvido pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) e que pode ser personalizado para aplicações particulares em SIG, nomeadamente no desenvolvimento de extensões para o estudo de cheias. A ESRI em conjunto com o CRWR (*Center for Research in Water Resources*) desenvolveu o *software* ArcHydro, resultando na criação de uma modelo de dados geoespacial e temporal para recursos hídricos que funciona como uma extensão do ArcGIS. Também vários *softwares* têm sido desenvolvidos para dar resposta à modelação hidrológica, nomeadamente o HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*) e à modelação hidráulica, nomeadamente o HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*). Ambos começaram a ser desenvolvidos no *Hydrologic Engineering Center* (HEC) com o intuito de criar metodologias de análise espacial, a fim possuir uma base de dados com parâmetros tanto hidrológicos como hidráulicos.

Com o evoluir das tecnologias e depois de vários estudos efetuados, o CRWR e a ESRI formaram novamente uma parceria com o intuito de desenvolver ferramentas que permitam a integração do HEC-HMS e HEC-RAS com as tecnologias SIG. Daí surgiram dois novos *softwares*, o HEC-GeoHMS (*Hydrologic Engineering Center's Geospatial Hydrologic Modeling System*) e o HEC-GeoRAS (*Hydrologic Engineering Center's Geospatial River Analysis System*). Estes dois *softwares* foram desenvolvidos para pré-modelação dos dados e ambos funcionam como uma extensão do ArcGIS.

## 2.8.2 ArcHydro

Segundo *Maidment (2002)*, o ArcHydro foi desenhado para representar dados hidrográficos e hidrológicos, criando uma base para obter um conhecimento mais aprofundado dos sistemas de água superficiais.

As entidades geoespaciais do ArcHydro descrevem o ambiente hídrico, ou seja o ambiente físico por onde a água flui, existindo um conjunto de ferramentas associadas ao ArcHydro que propagam os atributos de tais entidades na estrutura de dados, interligam as entidades em diferentes camadas e suportam análise hidrológica. Em ArcHydro, todas as entidades são *hydro features* e todas elas possuem os seguintes atributos: 1) *HydroID* – um atributo com um número inteiro que identifica unicamente a entidade na *geodatabase*; 2) *HydroCode* – um atributo de texto que é um identificador público permanente da entidade. Todas as *hydro features* podem ser associadas com qualquer outra *hydro feature*, armazenando o *HydroID* da primeira entidade como um atributo da segunda. Por este processo, áreas de drenagem podem ser associadas aos nós de ligação na rede, para as quais estas áreas drenam, definindo assim o correto caminho do movimento do escoamento superficial, até ao ponto de ligação, na rede de fluxo de água. O conceito de que todas as entidades na base de dados são entidades *hydro features* identificadas de forma única é muito robusto para suportar modelação comportamental, porque tal significa que a base de dados pode ser considerada como um todo integrado, em vez de um conjunto separado de camadas.

O modelo de dados ArcHydro completo divide os dados dos recursos hídricos em cinco componentes: 1) *Drainage* – áreas de drenagem e linhas de água definidas a partir da superfície topográfica; 2) *HydroNetwork* – conecta um conjunto de pontos e linhas, mostrando caminhos do fluxo de água; 3) *Hydrography* – os dados base de mapas topográficos e dados inventariados em tabelas; 4) *Time series* – dados de atributos em tabelas descrevendo propriedades da água que variam com o tempo, para qualquer *hydro feature*, e; 5) *Channel* – uma representação de linhas 3D da forma dos cursos de água. Nesta dissertação apenas se dará ênfase à componente *Drainage* pois possibilita o pré-processamento do terreno, ou seja a delimitação automática das bacias hidrográficas, bem como da respetiva rede hidrográfica.

## 2.8.3 HEC-GeoHMS e HEC-HMS

O HEC-GeoHMS constitui um *software* de pré-modelação de dados hidrológicos, possuindo um conjunto de ferramentas que foram preparadas especialmente para processar

dados geoespaciais, bem como criar dados de entrada para o HEC-HMS, servindo de ponto de partida para a modelação hidrológica. Os dados geoespaciais, que derivam de um pré-processamento do terreno (delimitação das bacias hidrográficas e construção da respetiva rede hidrográfica), podem ser processados neste *software* ou no *software* ArcHydro (caso desta dissertação). No HEC-GeoHMS é criada uma série de tabelas que contêm as características físicas tanto da rede como das bacias hidrográficas. Neste *software*, fazem parte cinco recursos fundamentais para a sua correta funcionalidade: 1) *Data Management*; 2) *Terrain Preprocessing*; 3) *Basin Processing*; 4) *Hydrologic Parameter Estimation*, e; 5) *HMS Model Support*, sendo que neste caso apenas se dá ênfase aos 2 últimos. Assim, no que diz respeito ao *Hydrologic Parameter Estimation*, estimam-se todos os parâmetros referentes ao modelo das perdas iniciais, modelo de transformação, modelo de escoamento base, bem como modelo de propagação. Quanto ao *HMS Model Support* geram-se os três tipos de ficheiros suportados diretamente pelo HEC-HMS, sendo eles: 1) *.basin*; 2) *.met*; 3) *.gage*. Após a obtenção destas três componentes, que devem ser tratados como estimativas iniciais, o utilizador pode calcular uma simulação e calibrar os vários modelos hidrológicos no HEC-HMS, a fim de refinar os parâmetros do modelo.

O HEC-HMS simula o processo de transformação da precipitação que ocorre numa dada bacia hidrográfica em escoamento superficial. Este modelo está dividido em três módulos: 1) modelo da bacia (*basin model*) – representa esquematicamente e graficamente a bacia e a rede hidrográfica, possibilitando o cálculo das perdas iniciais, determinação do escoamento direto e simulação do escoamento nos troços; 2) modelo meteorológico (*metereologic model*) – constituído por modelos meteorológicos que incluem a precipitação e a evapotranspiração; 3) especificações de controlo (*control specification*) – controla o intervalo de tempo no qual a simulação ocorre e, ainda o intervalo utilizado para o processamento.

#### **2.8.4 HEC-GeoRAS e HEC-RAS**

O HEC-GeoRAS é considerado um *software* de pré-modelação de dados hidráulicos. Este *software* não só possui um conjunto de ferramentas com o intuito de criar ficheiros de importação (.sdf) contendo dados geométricos, como também permite a visualização dos resultados exportados do HEC-RAS, pois após a conclusão dos cálculos hidráulicos no HEC-RAS, os níveis da superfícies da água e a velocidade de escoamento podem ser exportados para o HEC-GeoRAS para uma análise espacial final. Os dados geométricos podem derivar de vários conjuntos de dados SIG e as suas propriedades podem derivar de outros dados complementares,

nomeadamente caudais vindos do HEC-HMS. Os dados geométricos que representam a rede de drenagem são representados por: linhas de talvegue, margens dos rios principais e seus tributários, larguras máximas das planícies de cheia, direção de escoamento e sucessivos perfis transversais dos cursos de água. Também podem ser representados (opcionalmente) alinhamentos de diques, áreas de escoamento ineficazes, obstruções bloqueadas, áreas de armazenamento, dados hidráulicos de estruturas internas e laterais de pontes. O HEC-GeoRAS não só permite criar dados geométricos como também permite importar dados criados anteriormente, como *shapefiles* ou *coverages*. No entanto, estes dados ao serem importados terão de conter os campos necessários na respetiva tabela de atributos, nomeadamente o campo HydroID, considerado obrigatório. Este *software* possui três componentes fundamentais, que são elas: 1) *RAS Geometry* – serve para o pré-processamento dos dados geométricos, a fim de criar ficheiros de importação para o HEC-RAS; 2) *RAS Mapping* – serve para o pós-processamento dos resultados exportados do HEC-RAS; 3) *ApUtilities* – apresenta recursos disponíveis para gerenciar os dados criados no HEC-GeoRAS.

O HEC-RAS permite obter níveis de escoamento num determinado troço da rede hidrográfica, bem como definição dos leitos de cheia, possibilitando também a visualização do canal em 3D. É considerado um modelo morfodinâmico 1D composto por três módulos: 1) simulação do escoamento em regime permanente; 2) simulação do escoamento em regime variável; 3) simulação do transporte sólido.

## 3 METODOLOGIA UTILIZADA

Para se realizar uma modelação hidrológica e hidráulica é fundamental possuir todos os dados necessários *a priori*. Para isso, as ferramentas SIG são muito eficazes na medida em que dão a informação referente às características da rede de drenagem e bacias hidrográficas de modo (semi) automático.

A metodologia desta dissertação está dividida fundamentalmente em três fases: 1) pré-processamento do terreno; 2) carta representativa do CN para o meio urbano de Coimbra, e; 3) modelação hidrológica e modelação hidráulica.

Para uma melhor compreensão inicial da metodologia proposta nesta dissertação, apresenta-se no Anexo A um esquema geral.

### 3.1 Notas prévias

#### 3.1.1 Origem dos dados

Os dados referentes ao MDT, MDS e MDS\_n<sup>1</sup> com tamanho do *pixel* de 1 m foram fornecidos pela empresa IT-GEO (Tecnologias e Informação Georreferenciada). Estes dados provêm de um varrimento aéreo *laser*, feito na maioria das cidades portuguesas a 31 de Julho, 1 e 2 de Agosto de 2000, em que foi executada a interpolação dos pontos para a respetiva construção do MDT, MDS e MDS\_n fornecidos. A ortoimagem multiespectral<sup>2</sup> de alta resolução, de 2005, tem um tamanho de *pixel* de 0.5 m, e foi fornecida pelo Instituto Geográfico Português (IGP).

#### 3.1.2 Estruturação da informação

A construção da base de dados geográfica de forma a organizar todos os dados necessários para a modelação hidrológica e hidráulica, foi efetuada numa *geodatabase* armazenando todos os dados quer em formato vetorial quer em formato *raster*. A escolha deste tipo de estruturação da informação, deve-se ao facto de permitir conter diversos tipos de dados (*features*

---

<sup>1</sup> Utilização autorizada para fins académicos

<sup>2</sup> Utilização autorizada para fins académicos

*classes e raster*), permitir arquivar topologia (que não é possível, noutras estruturas de dados), e de funcionar como um recetáculo de todos os dados de modo a que estes possam ser portáteis. Em concreto, foi usada uma *File Geodatabase* (FG) armazenada no sistema operativo como uma pasta, isto é um sistema de ficheiros (cada conjunto de dados até 1 TB em tamanho; extensível até 256 TB para conjuntos *raster* muito grandes) (Almeida, 2012). Para uma melhor organização a nível de ficheiros relativos aos vários temas, foram criadas dentro da FG vários conjuntos de dados (*feature datasets*), onde partilham o mesmo sistema de coordenadas.

### **3.1.3 Sistema de coordenadas**

As referências espaciais foram definidas aquando da criação das *feature dataset*, sendo que o *datum* usado nesta dissertação foi o ETRS 1989 Portugal TM06.

Os sistemas de referência dos dados fornecidos para a realização desta dissertação eram originalmente Datum73 (MDT, MDS, MDS\_n e ortoimagem), pelo que foi necessário *a priori* fazer a respetiva transformação para o sistema de coordenadas pretendido. Para tal, usou-se o Método das “Grelhas no formato NTv2”, proposto por Gonçalves (2012), por ser um método com precisão muito superior aos métodos usados habitualmente (EMQ: 5cm para Datum 73, e 8cm para Datum Lisboa). Este método consiste na conversão de *datum*, entre um *datum* local e um *datum* global, sendo efetuado pela transformação de Bursa-Wolf, baseada em translação, rotação e escala, sobre coordenadas cartesianas geocêntricas. Essas transformações são aproximadas envolvendo erros de alguns metros, não modelando deformações da rede geodésica que define o sistema local.

### **3.1.4 Modelo de dados no ModelBuilder**

Nesta dissertação todos os processos em ArcGIS fazem parte de um modelo que será executado através do ModelBuilder, pois permitiu análises mais rápidas, fácil alteração dos parâmetros, realização de modelos complexos, representação gráfica do trabalho e edição automática dos temas no ArcMap. Os modelos de dados no ModelBuilder consistem numa série de operações de geoprocessamento, usando diversas ferramentas do ArcToolbox, a fim de possuir uma documentação gráfica para o resultado final.

## 3.2 Pré-processamento do terreno

O pré-processamento do terreno define a etapa de trabalho em que se realiza uma análise inicial do terreno, preparando um conjunto de dados para posterior processamento na modelação hidrológica bem como na modelação hidráulica, nomeadamente a obtenção dos elementos do sistema de drenagem (bacias e sub-bacias hidrográficas, linhas de drenagem e pontos de drenagem).

Este processo foi realizado na margem norte do Rio Mondego que ocupa o MDT e MDS fornecido, utilizando a extensão ArcHydro do ArcGIS.

### 3.2.1 Delimitação das bacias hidrográficas a partir do MDT vs. MDS

Enquanto no MDT as cotas topográficas são determinantes para a delimitação das bacias, no MDS há que ter em conta os diferentes tratamentos para os vários objetos (edifícios, obstáculos, vegetação, entre outros), que são condicionantes para a referida delimitação. Analisando apenas a vegetação, sabe-se que parte da precipitação que cai sobre as árvores perde-se por interceção, pois é intercetada pela copa das árvores (folhas, ramos e troncos) e perde-se por evaporação ou infiltração no solo.

No contexto urbano o MDS é o mais indicado para o estudo pois os vários objetos modificam o escoamento, no entanto será necessário excluir a altura da vegetação, porque a delimitação automática gera bacias hidrográficas irrealistas segundo a interseção com a altura da copa das árvores. Contudo, para uma correta análise deste efeito, realizou-se o pré-processamento do terreno delimitando as referidas bacias e rede hidrográfica a partir do MDT, do MDS, e do MDS sem altura da vegetação, separadamente. Este foi um processo moroso, ainda que necessário para se conseguir estabelecer uma correta análise de todas as condicionantes.

A fim de se retirar a altura da vegetação ao MDS, foi necessário em primeiro lugar efetuar o cálculo do NDVI. Utilizando a ortoimagem fornecida e aplicando diretamente a equação 22 (secção 2.7.4), obteve-se um *raster* com as zonas onde é calculado o NDVI, com valores de *pixel* compreendidos entre -1 e 1. Neste caso, e segundo a teoria de Jensen (2005) referida na secção 2.7.4, apenas se considerou vegetação nos *pixels* com valores positivos, ou seja entre 0 e 1.

De seguida, procedeu-se à interseção da vegetação obtida segundo o cálculo do NDVI, com a altura dos objetos acima da superfície, através do uso do MDS\_n, a fim de se obter um *raster* com informação dos *pixels* referentes à vegetação e a sua respetiva altura. Por fim, efetuou-se uma subtração da altura da vegetação no MDS, obtendo-se o resultado final (Figura 13).

Posto isto, passou-se a ter um MDT, um MDS original, e um MDS manipulado, onde todos eles serviram de dados de entrada para o pré-processamento do terreno. Na secção seguinte, quando se fala em MDS também se está a referir ao MDS manipulado.

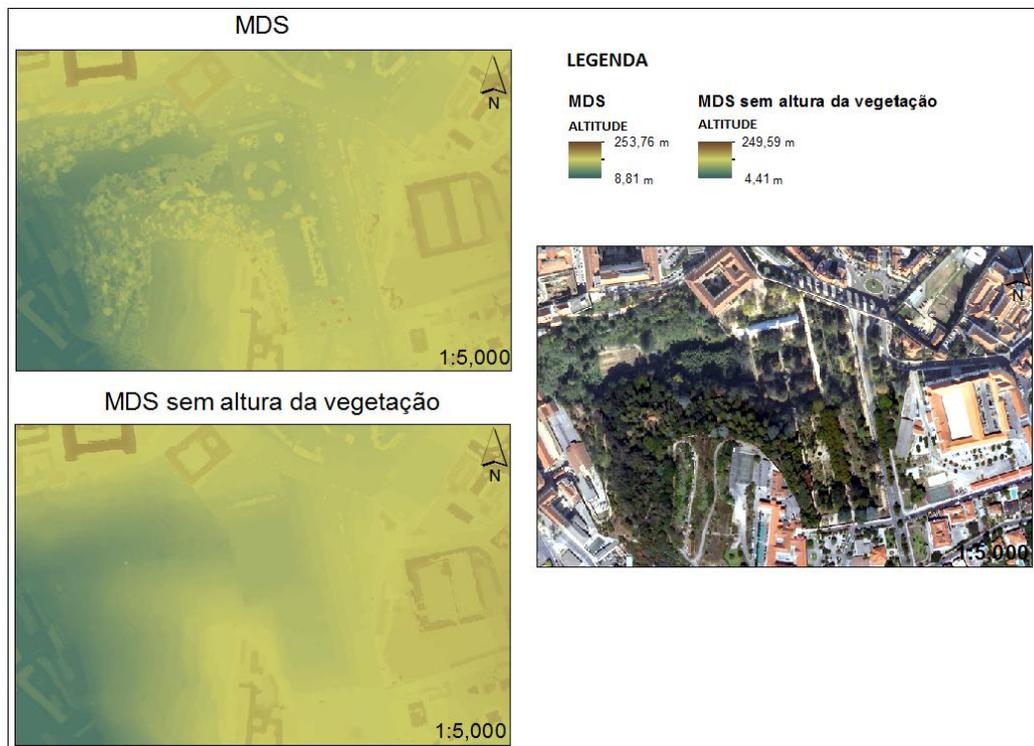


Figura 13 - Extração da altura da vegetação no MDS

### 3.2.2 Construção do modelo de dados ArcHydro

Seguidamente estão descritos todos os procedimentos de forma sequencial para a realização deste pré-processamento do terreno. A ferramenta *Dem Reconditionary* tem como finalidade a imposição de linhas de drenagem previamente conhecidas. Neste caso, por não existirem linhas de água à superfície, optou-se por não se executar este procedimento pois na verdade, com o elevado índice de urbanização da zona da cidade de Coimbra em estudo, as linhas de água foram alteradas.

A Figura 14 ilustra um esquema dos processos levados a cabo para obtenção das bacias e rede hidrográfica, entendendo-se assim de forma mais perceptível todo o encadeamento das diversas ferramentas utilizadas no ArcHydro.

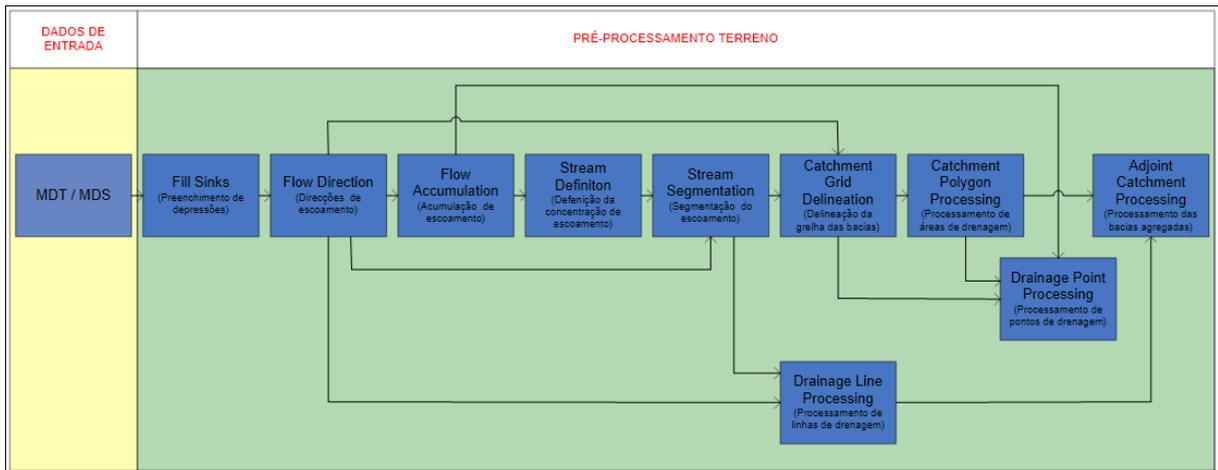


Figura 14 - Esquema da metodologia referente ao pré-processamento do terreno

### Fill Sinks (Preenchimento de depressões):

Aquando da geração do MDT/MDS, podem surgir pequenas depressões reais que resultam da forma de interpolação usada na geração do MDT/MDS. Esta ferramenta preenche essas depressões, garantindo que todas as células têm para onde drenar. Se uma célula é rodeada por células de maior elevação, a água ficará (em teoria) presa nessa célula e não conseguirá fluir. O Fill Sinks (Figura 15) modificou assim os valores de elevação eliminando automaticamente estes problemas, obtendo-se um caminho hidrológico contínuo. Desta forma, obteve-se um MDT/MDS hidrológicamente correto.

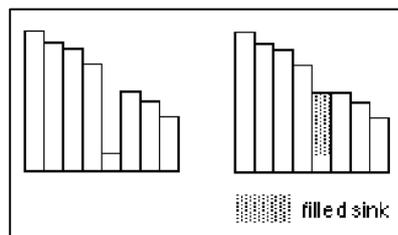


Figura 15 - Vista de perfil de um exemplo de uma depressão antes e após a execução do FILL

Charneca *et al.* 2012

### Flow Direction (Direções de escoamento):

Esta ferramenta permite definir as direções e o sentido do fluxo da água, tendo como argumento o MDT/MDS hidrológicamente correto. Assim, a água que cai em cada *pixel* escoar segundo determinada direção e sentido. A direção é dada pela linha de maior declive do terreno, tendo por base as 8 direções possíveis de fluxo (células vizinhas). Este processo consistiu em atribuir um código segundo um esquema de direções, permitindo assim saber qual a direção segundo a qual ocorre o escoamento (Figura 16). O respetivo sentido foi determinado de montante para jusante, segundo o valor das cotas entre *pixels*.

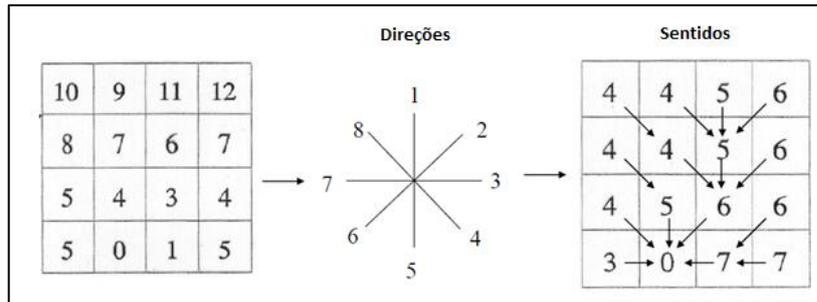


Figura 16 - Matriz de direções e sentidos gerados com base nas cotas do MDT/MDS  
Fonte, 2011

### Flow Accumulation (Acumulação de escoamento):

A acumulação de escoamento é a tradução da área de escoamento em unidades da grelha. Assim, tendo como base de cálculo o sentido de fluxo, calculou-se uma grelha de acumulação de fluxo, que contém o número acumulado de células a montante de uma dada célula, para cada célula do *grid* de *input* (Figura 17).

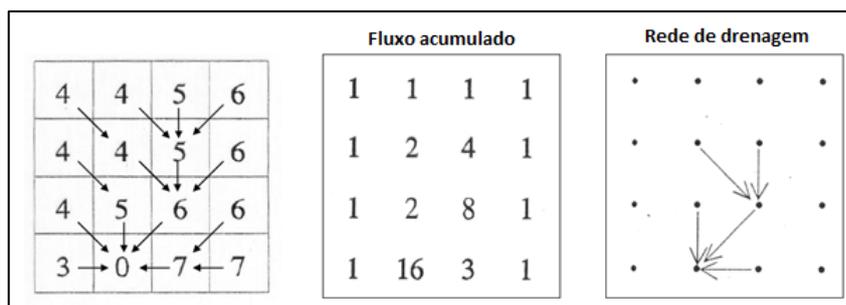


Figura 17 - Matriz de acumulação gerada com base nos sentidos de escoamento do MDT/MDS  
Fonte, 2011

### Stream Definition (Definição da concentração do escoamento):

Esta ferramenta teve como dados de entrada a acumulação de fluxo e gerou uma matriz cujas células estão classificadas como sendo ou não cursos de água. Esta classificação depende dos valores limite impostos, definidos como um número de células, ou como uma área de drenagem (em Km<sup>2</sup>), a partir do qual se determina o ponto de cabeceira de um curso de água. Ou seja, quanto menor for o número de células ou a área que contribui para a determinação de um ponto de cabeceira, mais detalhada será a rede hidrográfica resultante. Assim neste caso, aquando do estudo com o MDT, considerou-se o valor por omissão que o programa apresenta por não haver características relevantes que interfiram nesse limite, o qual corresponde a 1% da acumulação máxima de escoamento. No caso de estudo do MDS, testaram-se vários valores até à consideração da rede hidrográfica detalhada, isto é, até as linhas de água perfazerem quase por completo as estradas. Optou-se por este valor (10 000 células), porque num meio urbano o

escoamento ocorre maioritariamente sobre as estradas, apresentando assim uma rede hidrográfica mais densa, e conseqüentemente um maior número de sub-bacias.

### ***Stream Segmentation (Segmentação do escoamento):***

Esta ferramenta atribui um valor único a cada segmento da rede hidrográfica. É de notar que um segmento pode ser definido como segmento principal, ou então como um segmento entre dois nós do segmento. Todas as células de um determinado segmento têm o mesmo código de grelha, específico desse segmento.

### ***Catchment Grid Delineation (Delineação da grelha das bacias):***

Esta ferramenta criou uma grelha em que cada célula contém um valor de código, que indica a bacia hidrográfica a que pertence. O valor corresponde ao número de identificação do ponto de saída de cada bacia hidrográfica, sendo que todas as células de cada bacia têm o mesmo valor.

### ***Catchment Polygon Processing (Processamento de áreas de drenagem):***

Esta ferramenta tomou como dados de entrada a grelha representativa das bacias hidrográficas (em formato *raster*), e converteu-a para formato vetorial uma *feature class* de polígonos das bacias hidrográficas.

### ***Drainage Line Processing (Processamento de linhas de drenagem):***

Esta ferramenta converteu a grelha da rede hidrográfica numa *feature class* de linhas de drenagem. Cada linha contém assim um identificador da bacia hidrográfica em que está situado.

### ***Adjoint Catchment processing (Processamento das bacias agregadas):***

Esta ferramenta gerou as bacias agregadas a montante de uma *feature classe* de bacia hidrográfica. Para cada bacia, que não seja uma bacia principal, foi construída e guardada uma *feature class* adicional que representa toda a área a montante, e que drena para o ponto de entrada dessa bacia. Esta entidade é usada para o processo de delimitação de pontos de drenagem.

Com a realização deste processo, houve a criação automática de uma nova coluna na tabela de atributos, intitulada *NextDownID* do tema *Catchment*. Este campo registou para cada polígono do tema *Catchment* o *HydroID* do polígono de jusante. Quando o valor do campo *NextDownID* tem valor “-1”, significa que essa sub-bacia hidrográfica não drena para nenhuma sub-bacia a jusante.

### *Drainage Point Processing* (Processamento de pontos de drenagem):

Esta ferramenta permitiu gerar os pontos de drenagem associados às bacias hidrográficas, pontos esses que foram gerados sobre o centro das células correspondentes ao ponto de descarga.

### **3.3 Carta representativa do CN para o meio urbano de Coimbra**

O *InterSIG – Gestor de Informação Geográfica do INAG* fornece a carta de CN<sup>3</sup> de todo o território nacional português. Para a elaboração desta carta, houve o cruzamento de dados referentes ao tipo hidrológico do solo (1:3 000 000), ao uso do solo (1:100 000) e ao tipo geológico do solo (1:1 000 000). A informação referente ao uso do solo é fornecida pelo IGP na Carta de Ocupação do Solo, mais conhecida por CLC – *CORINE Land Cover*<sup>4</sup> à escala 1:100 000. Esta carta tem sido muito utilizada para diversos estudos, embora com maior aplicabilidade em zonas não urbanas pela sua escala pouco pormenorizada.

A carta de CN do INAG apresenta dois problemas consideráveis para estudos urbanos: a falta de pormenores dos dados que lhe deram origem, mais propriamente devido à ocupação do solo (CLC), e o tamanho da célula, visto ser de 500 m. Para este estudo, totalmente urbano, foi elaborada uma nova carta de CN em formato *raster* apropriada para o meio urbano de Coimbra, onde cada *pixel* corresponde a um determinado CN.

Em primeiro lugar, estudou-se quais as soluções para a carta de solos. A ideia inicial era usar dados à escala 1:25 000, o que não foi possível por não existir tal carta a esta escala para a região de Coimbra. Teve que se recorrer à carta à escala 1:1 000 000, tal como no INAG em que os solos são classificados segundo FAO (*Food and Agriculture Organisation*). O solo predominante em Coimbra é o cambissolo. *Ferreira (2000)* caracteriza-o como sendo um solo “jovem, moderadamente desenvolvido sobre uma rocha parental pouco a moderadamente meteorizada, não apresentando quantidades significantes de argila, matéria orgânica e compostos de alumínio e ferro”. Também no *PBHRV (2002)* é mencionado que os cambissolos são caracterizados pela sua textura franco-arenosa ou mais fina e espessura mínima de 15 cm, situando-se a base a pelo menos 25 cm da superfície do solo. Ao analisar também a carta litológica, verificou-se que a zona em estudo pertence às formações sedimentares tendo predominância em conglomerados, areias e cascalhos. Com base nestas três averiguações anteriores, e como não há uma correspondência

---

<sup>3</sup> Dados de livre acesso disponibilizados pelo INAG a partir de <http://intersig-web.inag.pt/intersig/>

<sup>4</sup> Dados de livre acesso disponibilizados pelo IGP a partir de [http://www.igeo.pt/produtos/Inf\\_cartografica.htm](http://www.igeo.pt/produtos/Inf_cartografica.htm)

direta entre o tipo de solo e o GHS, definiu-se como GHS predominante o B (ver secção 2.5.3). Isto porque é uma zona com pouca argila, textura grosseira, areias, cascalheira e conglomerados, logo poderia considerar-se de infiltração moderada, daí se ter estipulado o GHS B.

Em segundo lugar, averiguaram-se as diferentes soluções possíveis para a carta de ocupação do solo. Optou-se pela criação de uma carta de ocupação do solo específica para a área urbana de Coimbra, recorrendo a técnicas de deteção remota de classificação supervisionada.

Em terceiro lugar, definiu-se que a carta de CN a elaborar deveria possuir uma resolução de *pixel* de 1 m, já que em meios urbanos quanto mais pequeno for o tamanho da célula melhor correspondência haverá, considerando-se uma classificação mais credível da realidade.

É importante salientar que, mesmo fazendo um estudo mais pormenorizado para a obtenção da carta dos CN, irá continuar a haver certas reservas, embora mais diminutas que as obtidas através do INAG.

### **3.3.1 Classificação do solo pelo método da classificação supervisionada**

Para a classificação do solo no meio urbano de Coimbra, todos os processos foram realizados no ArcGIS, sendo utilizado o algoritmo de máxima verosimilhança.

Várias metodologias têm sido desenvolvidas para a classificação de imagens em meios urbanos, sendo que muitas delas incidem essencialmente na quantificação de áreas permeáveis e impermeáveis. Também muito se tem falado sobre quais as classes mais predominantes em meios urbanos, sendo que este estudo não segue uma metodologia de estipulação de classes já definida, porque se pretende que haja uma correspondência o mais exata possível com a Tabela 2 definida pelo SCS, citada na secção 2.5.3.

Assim, como o centro urbano de Coimbra é uma zona totalmente edificada, com vegetação estabelecida, consideram-se as seguintes classes com os respetivos números de CN para a classificação supervisionada do meio urbano de Coimbra (Tabela 4):

Tabela 4 - Correspondência entre o CN do GHS (B) e o tipo de cobertura para as classes do solo predominantes em Coimbra

Correspondência entre CN e o tipo de cobertura do solo em meio urbano, segundo SCS		Denominação das classes de ocupação do solo para Coimbra
Tipo de cobertura	CN	
Espaços abertos (parques, jardins, campos de golfe...) → Médias condições	69	Espaços Abertos
Áreas residenciais (Edificado) → 1/8 Hectares	85	Edifícios
Áreas impermeáveis (estacionamentos pavimentados ou telhados, calçadas) e Áreas impermeáveis (ruas e estradas → Pavimentadas; calçadas e galerias pluviais)	98	Estradas / Estacionamentos

A ortoimagem disponível para a elaboração da classificação do solo, apresenta muito o efeito de sombra, causado por altos edifícios, árvores entre outros objetos. É comum haver este efeito em tais imagem, devido às causas mencionadas na secção 2.3.2. Neste trabalho, tal como Loureiro (2008) resumido na secção 2.3.2, também a sombra é constituída ruído. Assim numa primeira abordagem consideraram-se as zonas de sombra, como uma classe para a classificação do solo, sendo posteriormente cada *pixel* reclassificado numa classe presente na Tabela 4, tendo como critério de escolha a altura dos objetos acima da superfície. O efeito de sombra pode incidir tanto sobre as Estradas/Estacionamentos, sobre os Espaços Abertos, como sobre os Edifícios, assim em termos práticos foi necessário efetuar uma interseção da classe sombras com a altura dos objetos presente no MDS<sub>n</sub>. Após tal interseção, e para se obter uma carta de CN sem qualquer *pixel* pertencente à classe de sombra, foram reclassificados os *pixels* que apresentavam altura até 1 m como Estradas/Estacionamentos, de 1 m a 22 m como Espaços Abertos e acima de 22 m como Edifícios.

Outra condicionante nesta classificação foi a confusão do nível radiométrico entre estradas e edifícios com cobertura de cimento, pois a cor de ambos é muito idêntica. Aplicando diretamente o algoritmo da máxima verosimilhança, os edifícios com cobertura de cimento foram classificados como pertencentes à classe Estradas/Estacionamentos. A fim de solucionar este problema, foi novamente feita uma interseção com a altura dos objetos acima da superfície, usando o MDS<sub>n</sub>, onde se estipulou que os *pixels* da classe Estradas/Estacionamentos com altura dos objetos até 1 m permanecem na classe Estradas/Estacionamentos, e os *pixels* com altura dos objetos acima de 1 m, são reclassificados a fim de pertencer à classe Edifícios.

Após solucionar todas estas problemáticas, obteve-se a classificação do solo tal como desejado. Contudo, foram aplicados vários filtros os quais permitem uma melhor delimitação e homogeneização dos limites das classes. Com a utilização destes filtros, os *pixels* individuais foram removidos e as fronteiras entre as classes dos solos suavizadas. Também as classes de uso do solo constituídas por um número inferior a 200 *pixels* foram removidas, pois considerou-se que não eram significativas para o resultado final. Às zonas onde estes *pixels* foram removidos, foi-lhes atribuído o valor da classe que aparece com mais frequência na vizinhança imediata.

Por fim, obteve-se a carta representativa de CN reclassificando estas classes com o número de CN correspondente.

### **3.3.2 Avaliação da classificação**

Após a geração do mapa de classificação, foi necessário avaliar a sua qualidade a fim de se poder averiguar se fiável ou não.

Assim, baseado na metodologia de *Congalton et al. (1999)* mencionada na secção 2.7.3, foram gerados 50 pontos aleatórios por classe, pois a área de estudo é relativamente pequena e o número de classes reduzido. Ao gerar estes pontos amostra, foi possível avaliar o erro com a construção de uma matriz de confusão, comparando os dados classificados com os dados verdadeiros referentes ao terreno. Na construção da matriz de confusão, foram contabilizados os números de pontos amostrais que estavam na classe correta e os que estavam erradamente classificados. Para isso, utilizou-se apenas como referência de comparação a ortoimagem onde foram geradas as áreas de treino. Em zonas onde os pontos amostrais se posicionavam no limite da classe, houve um maior cuidado a fim de ponderar a qual classe era mais provável pertencer, optando-se então pela classe mais predominante na sua vizinhança.

Com a matriz de confusão construída, procedeu-se à sua avaliação através de análises estatísticas, calculando-se a exatidão global, exatidão do produtor, exatidão do utilizador e o fator K. Todos estes valores serão apresentados na secção 4.2.

### **3.4 Modelação hidrológica e modelação hidráulica**

A aplicação dos modelos hidrológicos e modelos hidráulicos nesta dissertação foi feita apenas para uma pequena zona da cidade de Coimbra, compreendida entre a Praça da República e Santa Cruz, ao longo da Avenida Sá da Bandeira (Figura 18). Foi feita esta escolha por apresentar um declive acentuado, uma área predominantemente impermeável, e por escoar para

uma zona mais antiga da cidade, de importância histórica e onde é frequente existirem inundações. Pretende-se com esta aplicação saber o caudal que escoar para a Praça da República, bem como de todas as ruas tributárias da Avenida Sá da Bandeira, e com isto prever o nível de inundação causado em Santa Cruz, assim como a velocidade de escoamento.

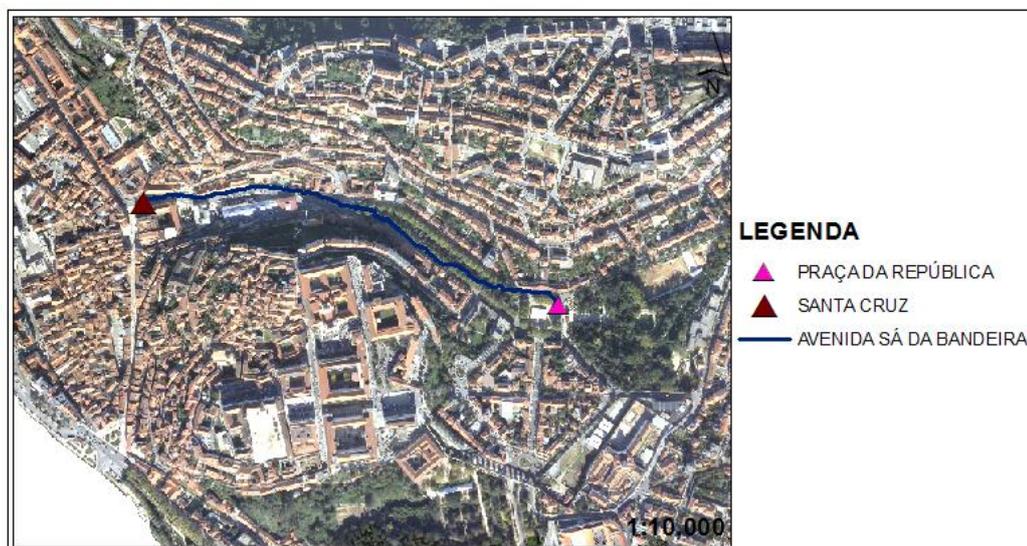


Figura 18 - Avenida Sá da Bandeira, com ponto mais a montante (Praça da República) e ponto mais a jusante (Santa Cruz)

### 3.4.1 Pré-modelação hidrológica em HEC-GeoHMS

Os vários modelos hidrológicos necessitam da delimitação das bacias hidrográficas com a respetiva rede hidrográfica, que foi obtida anteriormente com o ArcHydro. Também necessitam da determinação dos respetivos parâmetros morfológicos e hidrológicos referentes às bacias e à rede. Estes foram determinados num processo de pré-modelação hidrológica no HEC-GeoHMS, para facilitar o cálculo dos hidrogramas de cheia em cada bacia e o respetivo caudal, utilizando o HEC-HMS.

Em termos práticos, ao configurar um dado projeto no HEC-GeoHMS, é necessária a especificação de um ponto de controlo a jusante, representando o limite a jusante para o projeto HEC-HMS, que neste caso foi posicionado em Santa Cruz. A Figura 19 representa o ponto de estudo mais a jusante e toda a área de drenagem que contribui para ele.

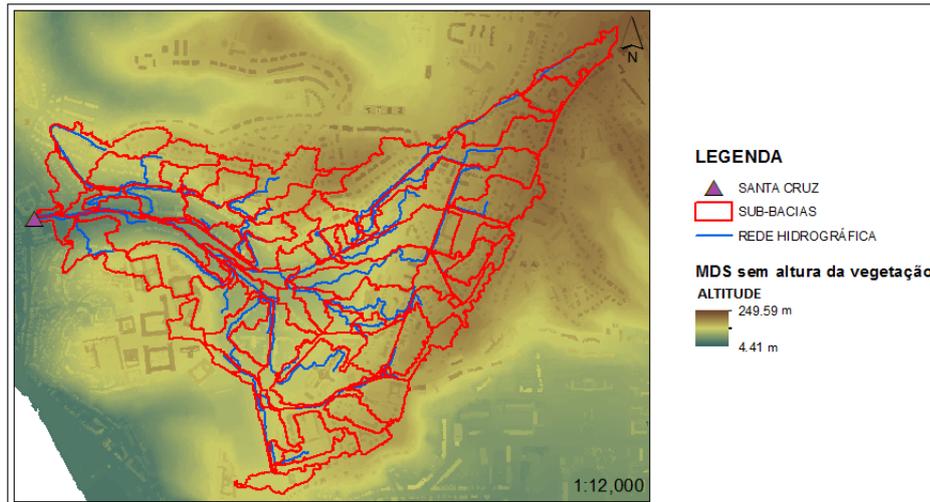


Figura 19 - Sub-bacias e rede hidrográfica de Santa Cruz (Coimbra)

Após esta especificação, foi possível extrair as características físicas da rede e das sub-bacias anteriormente delimitadas no ArcHydro para a área a montante. As características físicas da rede hidrográfica extraídas no HEC-GeoHMS incluem o comprimento dos troços da rede, a cota a montante e jusante e a respetiva inclinação. Uma vez extraída esta informação, foi armazenada na respetiva tabela de atributos de cada troço. Das características físicas das sub-bacias hidrográficas, extraiu-se o comprimento mais longo do troço pertencente a cada sub-bacia, o centroide da sub-bacia e também a sua inclinação média. É importante referir que o centroide foi criado pelo método do comprimento mais longo, ficando posicionado conseqüentemente a meio do respetivo troço.

Além das características físicas, estimaram-se os valores iniciais de vários parâmetros hidrológicos, como o tempo de concentração, a percentagem de perdas iniciais e o tempo de atraso. Estes parâmetros foram calculados consoante o modelo escolhido, nomeadamente o modelo do SCS para o cálculo do modelo das perdas iniciais, modelo do SCS (método do cálculo do HUS) para o modelo de transformação, modelo de *Lag* para o modelo de propagação. No entanto, não foi escolhido nenhum modelo para o modelo de escoamento base, pois não é tido em linha de conta neste estudo. Também para o cálculo destes parâmetros, teve-se em conta a carta representativa do CN criada anteriormente através do método da classificação supervisionada.

Com todos estes parâmetros determinados foi possível fazer uma representação SIG do modelo HEC-HMS, ou seja construir uma rede hidrográfica que contém os elementos característicos do HEC-HMS representados pelos diversos nós, troços e bacias. Criaram-se os três ficheiros característicos do HEC-HMS, nomeadamente *.basin*, *.met* e *.gage* que representam

respetivamente o modelo da bacia e o modelo meteorológico. O modelo da bacia captura os elementos hidrológicos, suas ligações e informação geográfica, enquanto o modelo meteorológico captura os dados de precipitação, hietogramas. Neste caso considerou-se apenas um posto, o Centro de Geofísica da Universidade de Coimbra e criou-se um ponto nesse local que será utilizado diretamente no projeto HEC-HMS.

### 3.4.1 Modelação hidrológica em HEC-HMS

Para se efetuar a modelação hidrológica no HEC-HMS, foi necessária a introdução de dados de precipitação para a construção do modelo meteorológico, bem como a introdução de todos os parâmetros hidrológicos e morfológicos adquiridos na pré-modelação com o HEC-GeoHMS para o modelo da bacia.

Para a construção do modelo meteorológico, estava previsto a utilização de um evento real e de hietogramas de projeto (mm/h). Não havendo dados passíveis de calibração, optou-se apenas por simular hietogramas de projeto propostos por *Matos (1987)* e calculados com base nas curvas IDF de *Matos et al., 1986* (in *David, 2005*). A zona de Coimbra pertence à zona A (ver Anexo B), consideraram-se os dados referentes a um período de retorno de 20 anos ( $Tr_{20}$ ), ou seja os dados introduzidos dizem respeito à probabilidade de ocorrência de um valor igual ou superior à considerada de uma vez em 20 anos.

Em relação às especificações de controlo, estas regem-se segundo os dados referentes ao hietograma, admitindo-se que ocorrem numa data aleatória. O hietograma de projeto tem uma duração total de 4 horas e onde são introduzidos dados em intervalos de 1 minuto, com durações de ponta de 15min, valor próximo do tempo de concentração de bacias urbanas. A Figura 20 representa a forma do gráfico com os valores do hietograma.

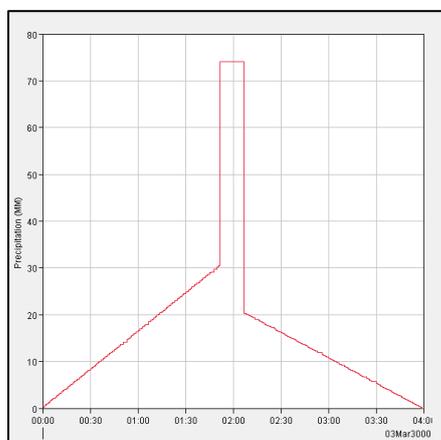


Figura 20 - Gráfico do hietograma de projeto adotado neste caso de estudo

Após se efetuarem todas estas configurações, tanto o modelo da bacia como o modelo meteorológico, bem como as especificações de controlo apresentaram os dados necessários para a simulação através do *software*. Obtiveram-se assim, os gráficos e tabelas para cada sub-bacia que drena para Santa Cruz, cada troço, bem como para cada nó, com informação acerca do caudal máximo, área de drenagem, e também a hora do pico de escoamento.

### 3.4.2 Pré-modelação hidráulica em HEC-GeoRAS

A pré-modelação hidráulica no HEC-GeoRAS consiste na elaboração dos dados característicos da linha de água, nomeadamente o traçado e perfis transversais a serem posteriormente utilizados no HEC-RAS para a devida análise.

Neste caso, considerou-se a Avenida Sá da Bandeira como o meio condutor do escoamento, tendo em consideração o caudal de todas as ruas afluentes e sub-bacias que para aí drenam.

Foi digitalizado um troço no sentido do escoamento sobre esta avenida, coincidente com a rede hidrográfica proveniente do ArcHydro, e criados perfis transversais no ponto de ligação das ruas tributárias com a Avenida Sá da Bandeira (Figura 21). A fim de se interpolarem os perfis com a altitude do terreno, foi usado o MDS (sem altura da vegetação). Após este processo, exportaram-se estes ficheiros com o intuito de passar de formato SIG para formato RAS (*RASImport.sdf*) para serem utilizados diretamente na modelação hidráulica no HEC-RAS.

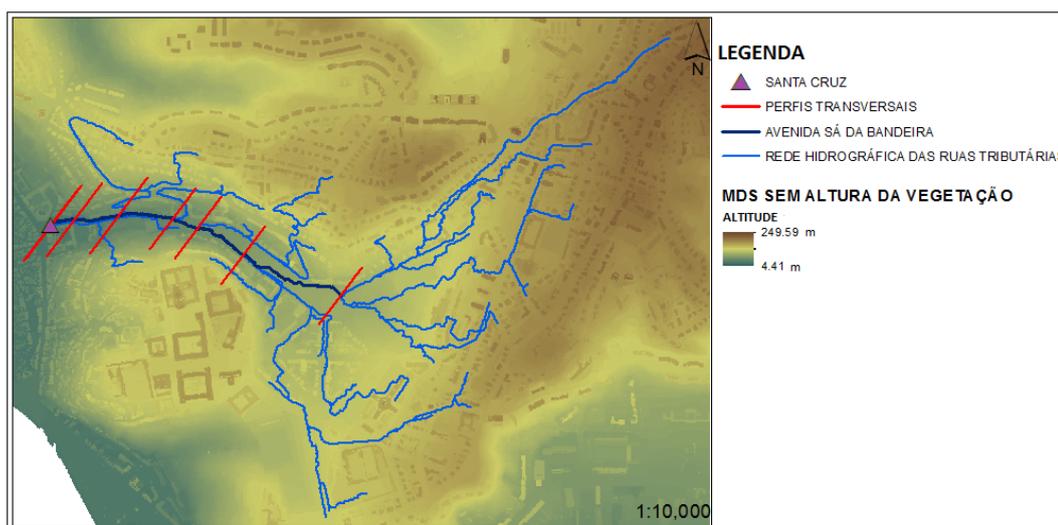


Figura 21 - Traçado da Avenida Sá da Bandeira e perfis transversais

### 3.4.3 Modelação hidráulica em HEC-RAS

Ao se iniciar a modelação hidráulica, em primeiro lugar importaram-se os dados geométricos criados anteriormente na pré-modelação hidráulica, onde se pode visualizar os perfis transversais em cada ponto (Figura 22).

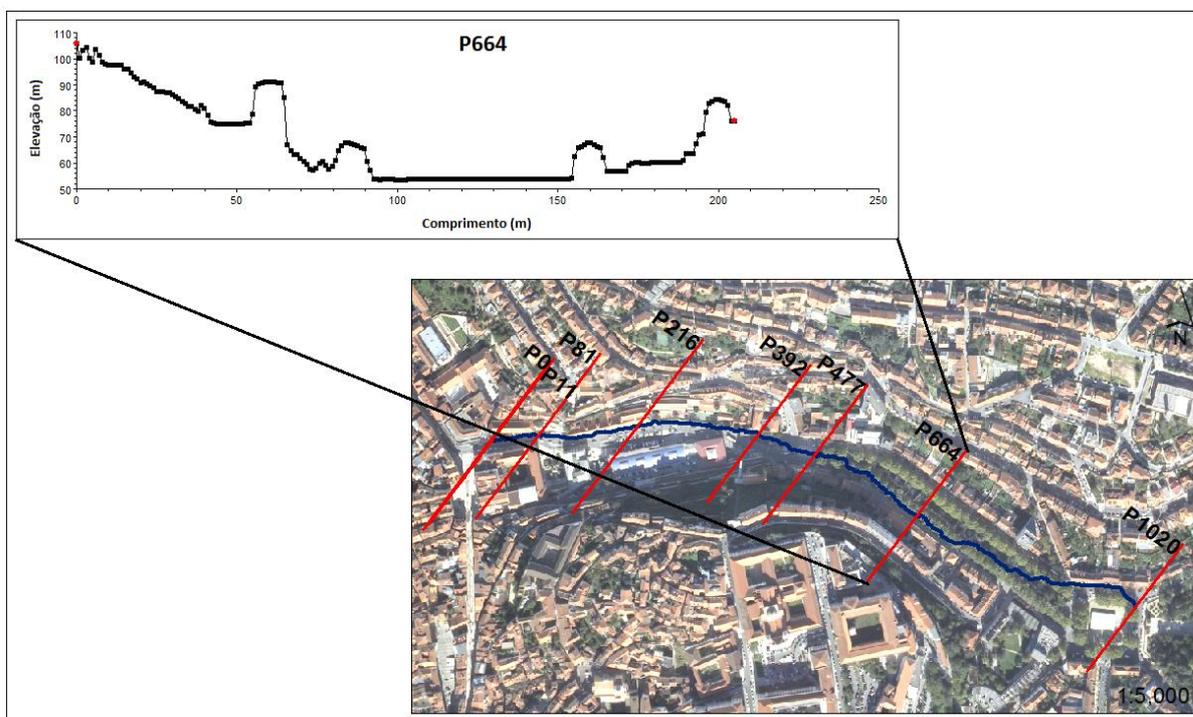


Figura 22 - Exemplo de perfil transversal

Neste tipo de análises é possível fazerem-se duas abordagens, nomeadamente analisar os dados em regime permanente uniforme e regime permanente variado. Neste caso, procedeu-se ao estudo do regime permanente variado, pois são introduzidas as condições de fronteira variáveis ao longo do tempo, apropriadas a cada ponto específico. Para tal, no ponto de interseção do primeiro perfil na Praça da República (condição de fronteira externa), foi introduzido o hidrograma de escoamento e a todos os outros perfis intermédios, foram introduzidas condições de contorno laterais, ou seja o hidrograma referente às ruas tributárias da Avenida Sá da Bandeira. Os hidrogramas usados derivaram da modelação hidrológica efetuada no HEC-HMS, considerando a resposta aos dados do hidrograma referente a 4 horas, de minuto a minuto. No último perfil situado em Santa Cruz, foi necessário introduzir uma condição de fronteira, onde foi introduzida uma inclinação da superfície da água para estimar o *Friction Slope*, que neste caso foi considerado de 0.01

Neste caso não se consideraram condições de escoamento iniciais, pois considera-se a rua inicialmente sem água por isso o escoamento base não está a ser contabilizado.

Ao se introduzir estas condições de contorno obteve-se os perfis transversais, com a representação do nível de inundação ao longo da avenida e a velocidade de escoamento até Santa Cruz, tendo-se assim a perceção do que acontece na Baixa da cidade com uma forte chuvada.

Estes dados foram exportados novamente para formato SIG (*RASExport.sdf*) para assim se proceder a uma pós-modelação hidráulica.

#### **3.4.4 Pós-modelação hidráulica em HEC-GeoRAS**

No processo de pós-modelação hidráulica, a fim de os dados serem novamente inseridos no HEC-GeoRAS, foi necessário convertê-los de um formato SDF para XML.

Para se elaborar o mapa de cheias e de velocidade em formato *raster*, criou-se uma análise RAS onde se procedeu à importação dos dados, e criação automática de *feature class* correspondentes aos perfis transversais (3D), polígono delimitador da inundação e aos pontos onde há maior velocidade, ao longo da avenida.

O mapa de inundação foi criado por dois processos consecutivos. O primeiro consistiu na construção da superfície de água em formato TIN (**T**riangulated **I**rrregular **N**etwork), e o segundo consistiu na comparação do TIN com o MDS (sem altura da vegetação) a fim de se obter a diferença de elevação no interior do polígono delimitador da inundação.

O mapa de velocidades foi obtido por interpolação da velocidade entre cada secção transversal com o polígono delimitador da inundação.

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Delimitação das bacias e rede hidrográfica a partir do MDT vs. MDS

Um dos primeiros objetivos deste trabalho foi perceber qual o melhor processo para a delimitação das bacias e rede hidrográfica num contexto urbano. Após o pré-processamento do terreno obteve-se os vários resultados dos dados derivados do MDT, MDS e MDS sem altura da vegetação. Far-se-á em primeiro lugar uma análise comparativa entre o MDT e o MDS, e em segundo lugar entre o MDS e o MDS sem altura da vegetação.

Ao analisarem-se as diferenças na Figura 23 entre a delimitação das bacias e rede hidrográfica, derivadas do MDT e do MDS, observa-se que o MDS apresenta um número considerável de bacias que contornam os edifícios, e por conseguinte uma rede hidrográfica muito mais densa que no MDT. Esta densidade deve-se não só ao facto de ter sido construída segundo o MDS, mas também ao facto de no seu processo se ter optado por definir com 10 000 células a concentração do escoamento (*Stream Defenition*). Em ambas as situações, observa-se que a rede de drenagem foi delineada na zona mais baixa como era de esperar, contudo observa-se que no MDS a rede hidrográfica é praticamente construída sobre as ruas, o que no MDT não é possível obter. Estas conclusões fundamentam-se nos pormenores da Figura 24 que se descrevem de seguida.

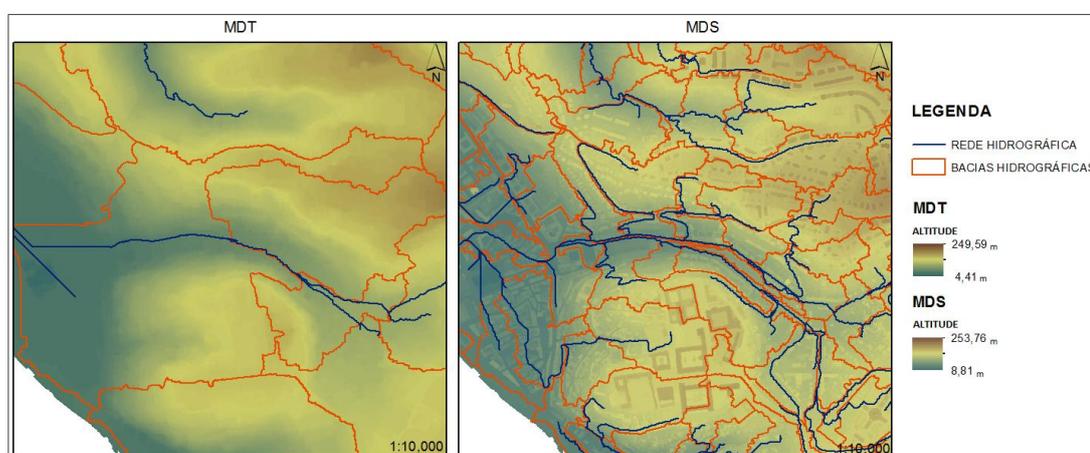


Figura 23 - Comparação entre o MDT e o MDS

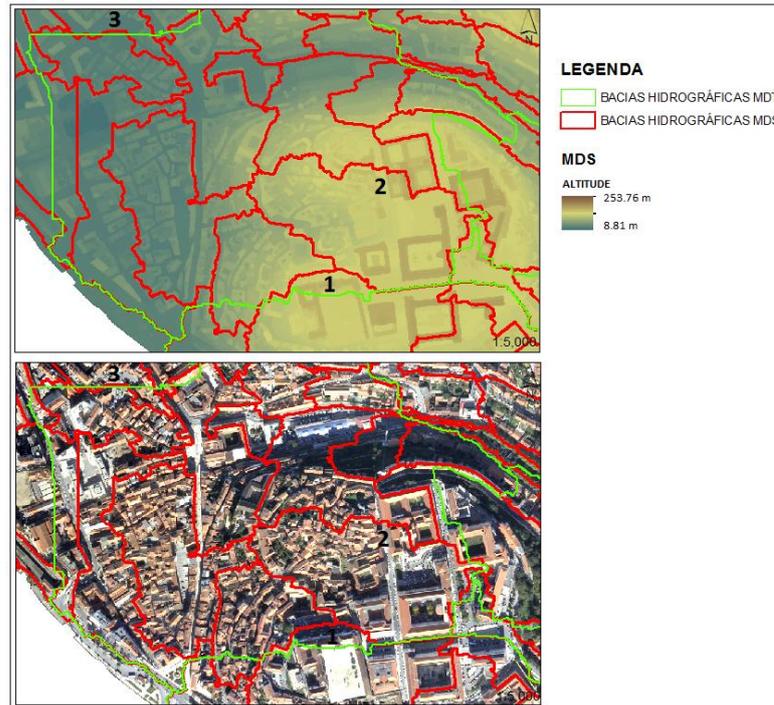


Figura 24 - Comparação mais pormenorizada entre o MDT e o MDS

Fazendo uma análise mais pormenorizada da Figura 24, verifica-se que: **1)** a bacia hidrográfica originária do MDS apresenta-se de uma forma mais correta, como pode por exemplo, ser visto no contorno da Faculdade de Direito, onde a drenagem do átrio se faz toda no mesmo sentido, enquanto que na bacia hidrográfica originária do MDT, observa-se uma incoerência, pois esta atravessa o átrio da Faculdade, o que impossibilita algum do escoamento, ficando retido; **2)** com conhecimento de campo, sabe-se que nesta zona deverá existir o limite de uma bacia, o que se comprova com a bacia originária do MDS, pois este local apresenta uma subida do relevo na Couraça dos Apóstolos, voltando a baixar junto ao Museu Nacional de Machado de Castro; **3)** a delimitação da bacia originária do MDT está representada por uma linha quase reta, o que não acontece na realidade, pois neste caso, como não entra em consideração com a altura dos objetos acima da superfície, foi traçada por cima dos edifícios. Estas comparações permitem afirmar que, tal como esperado, o MDS apresenta em todas as circunstâncias uma melhor delimitação das bacias e rede hidrográfica, representando melhor a realidade.

Ao se compararem as bacias e rede hidrográfica originárias do MDS e MDS sem altura da vegetação, como exemplifica a Figura 25, observa-se que aparentemente ambas apresentam contornos semelhantes. Contudo, principalmente nas zonas com predominante vegetação (Ex: Jardim Botânico) verificam-se determinadas diferenças, nomeadamente no traçado de certas

bacias que deixou de ser feito pela copa das árvores, no caso do MDS sem altura da vegetação. Em relação à densidade da rede hidrográfica, esta manteve-se praticamente inalterada pois o critério para o número de células que contribuem para a concentração do escoamento foi o mesmo, ou seja 10 000 células. Estas conclusões fundamentam-se nos pormenores da Figura 26 (Avenida Sá da Bandeira) que se descrevem em seguida.

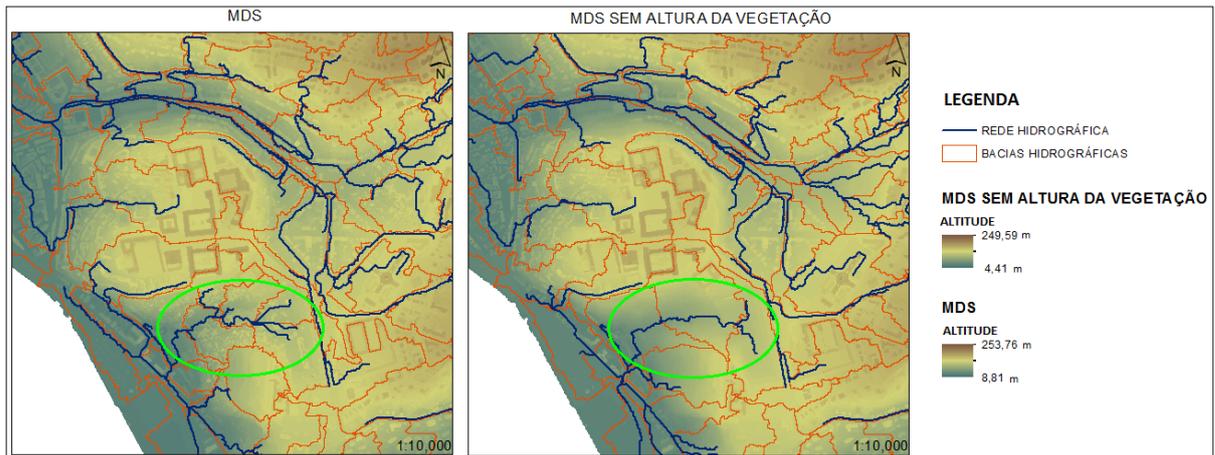


Figura 25 - Comparação entre o MDS e o MDS sem altura da vegetação

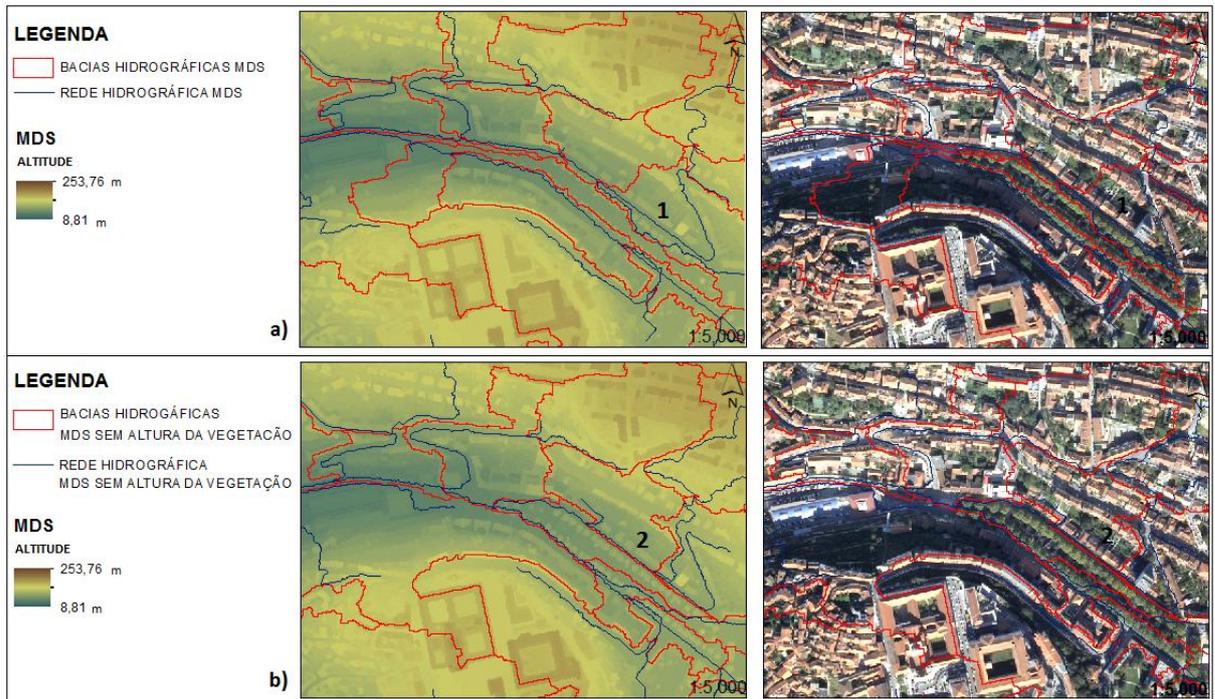


Figura 26 - Comparação mais pormenorizada entre o MDS e o MDS sem altura da vegetação

Analisando com mais pormenor a Figura 26 a) na zona 1), pode verificar-se que as bacias hidrográficas originárias do MDS estão traçadas sobre as copas das árvores e que existe um grande emaranhado de limites de bacias a jusante. Na realidade não é isto que acontece, pois

como ocorre interceção com a vegetação nomeadamente na copa das árvores, estas não definem um limite para bacia de drenagem. Na Figura 26 b) na zona 2) observa-se um diferente traçado das bacias, pois estas não tiveram em linha de conta a altura da vegetação. Também se observa a jusante uma definição das bacias mais simplificada. Se na comparação anterior já se tinha chegado à conclusão que o MDS seria o mais correto, nesta comparação averigua-se que não só é necessário o MDS, como também é necessário retirar a altura da vegetação, pois esta mostra ser uma condicionante neste tipo de estudos.

A Figura 27 apresenta uma análise global dos três diferentes estudos efetuados, podendo afirmar-se que vai de encontro à ideia inicial mencionada na secção 3.2.1, representando assim melhor a realidade de um meio urbano.

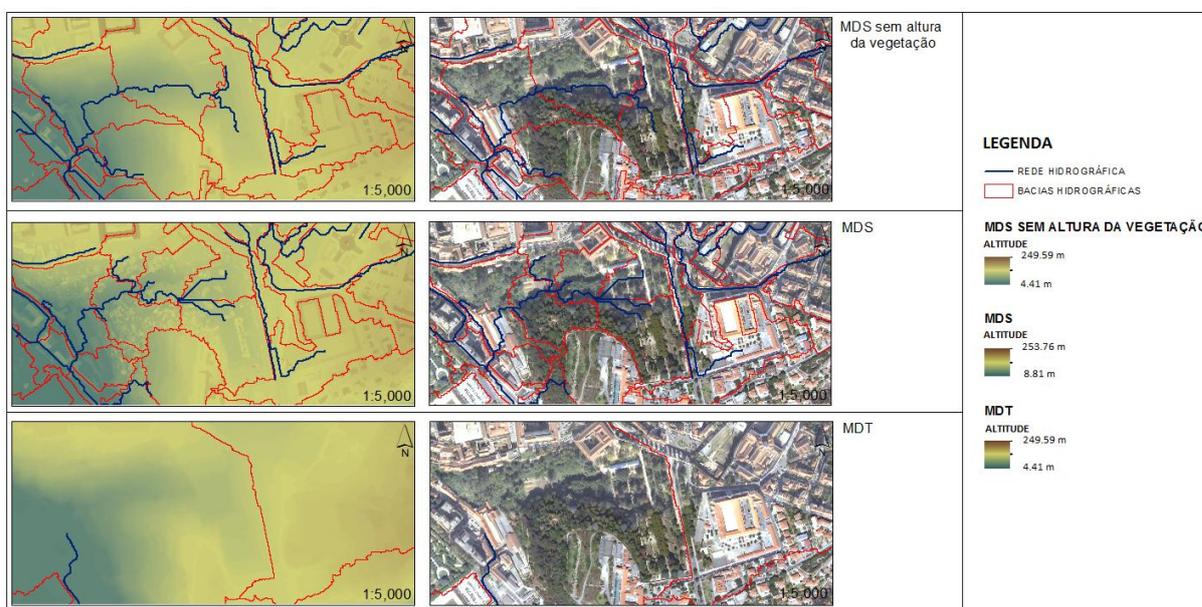


Figura 27 - Análise geral dos três estudos efetuados

## 4.2 Carta representativa do CN para o meio urbano de Coimbra

A ortoimagem utilizada apesar de ter muito boa resolução apresentou várias condicionantes, sendo que o efeito de sombra era o mais visível.

Fazendo uma análise progressiva da metodologia utilizada na classificação (Figura 28), verifica-se que mesmo após a resolução das condicionantes e aplicação de filtros, tal como mencionado na secção 3.3.1, continua a haver alguma incoerência com a realidade, embora muito mais diminuta que na carta de CN do INAG (Figura 29).

Na Figura 28 a), está representada a classificação originária do algoritmo da Máxima Verossimilhança, sem qualquer tratamento *a posteriori*. Aqui verifica-se que existe uma grande

quantidade de zonas classificadas como sombras e edifícios com cobertura de cimento classificados como Estradas/Estacionamentos, como é o caso do item 1). Na Figura 28 b), observa-se as zonas de sombra reclassificadas segundo os critérios estipulados para esta metodologia, bem como a atribuição da classe Edifícios aos edifícios com cobertura de cimento, anteriormente classificados como Estradas/Estacionamentos. A Figura 28 c), mostra o resultado final com a respetiva aplicação dos filtros.



Figura 28 - Análise progressiva da metodologia utilizada na classificação

Na Figura 29, observa-se a grande diferença entre a carta de CN produzida nesta dissertação e a carta de CN do INAG, desde o tamanho do *pixel* à atribuição do número de CN. A carta de CN produzida para o meio urbano de Coimbra mostra assim ser um dado com muito mais pormenor, e de um modo geral constitui uma boa representação da ocupação do solo.

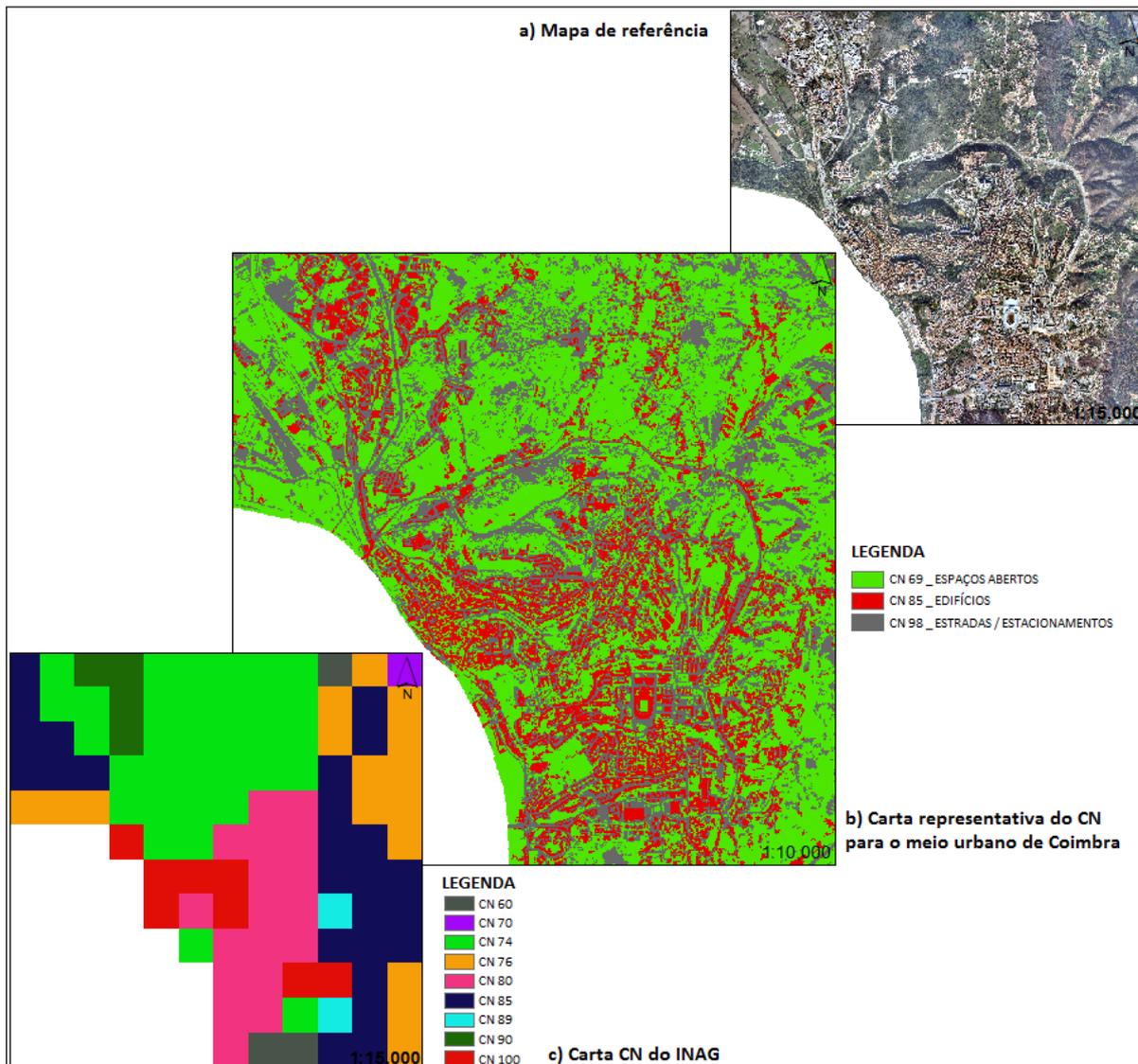


Figura 29 - Comparação entre a carta representativa do CN para o meio urbano de Coimbra e a Carta de CN do INAG

Para se determinar se esta classificação é fiável ou não, analisou-se a matriz de confusão (Tabela 5) e seguidamente efetuou-se uma análise estatística sobre esta.

Tabela 5 - Matriz de Confusão

Informação do mapa de classificação	Informação do mapa de referência				Total linha	Exatidão do Utilizador
	Classe	Espaços Abertos	Edifícios	Estradas Estacionamentos		
Espaços Abertos		45	2	1	48	93.75%
Edifícios		14	32	4	50	64.11%
Estradas Estacionamentos		16	1	35	52	67.31%
Total coluna		75	35	40	150	
Exatidão do Produtor		60%	91.43%	87.50%		

A diagonal principal da matriz representa o número de pontos bem classificados. No entanto observa-se, por exemplo, que 14 pontos foram erradamente classificados como Edifícios devendo estes pertencer à classe Espaços Abertos, e 16 pontos que foram classificados como Estradas/Estacionamentos mas deveriam ter sido classificados como Espaços Abertos. Estes dois valores refletem uma má classificação, e devem-se sobretudo à reclassificação da classe sombras, pois quando esta foi interceptada com o MDS\_n nem todos os casos foram abrangidos dentro dos limites estipulados para a altura dos objetos. Este problema também está representado na matriz pela exatidão do produtor e do utilizador. Analisando a exatidão do produtor, a classe Espaços Abertos apresenta apenas 60% de exatidão e analisando a exatidão do utilizador, a classe Edifícios e Estradas/Estacionamentos apresentam apenas 64.11% e 67.31% de exatidão, respetivamente. Todas as outras classes apresentam valores mais aceitáveis.

Também se procedeu ao cálculo da exatidão global, que neste caso é de 74.67% e ao cálculo do fator  $K$ , apresentando um valor de 0.62. Analisando o valor de  $K$ , e segundo a metodologia proposta por Landis et al., 1977 (in Jensen, 2005) mencionada na secção 2.7.3, este valor está entre 0.40 e 0.80, representando assim uma concordância moderada.

A qualidade global da classificação poderia ser melhor. Contudo, para o caso de estudo em causa, aceitou-se esta classificação como fiável, pois apresenta-se melhor do que os próprios dados geográficos normalmente usados para este efeito, como é o caso da carta do INAG.

### **4.3 Modelação hidrológica**

Os resultados referentes à modelação hidrológica referem-se aos caudais e aos hidrogramas em cada sub-bacia e na secção final, que foram obtidos também com o intuito de serem usados na modelação hidráulica da linha de água que se forma na Avenida Sá da Bandeira. São apresentados os resultados referentes aos pontos principais, o mais a jusante (Santa Cruz) e o mais a montante (Praça da República), bem como os resultados referentes às ruas tributárias da Avenida Sá da Bandeira.

Numa primeira abordagem, calculou-se todo o caudal afluente a Santa Cruz, onde se obteve  $1060.6 \text{ m}^3/\text{s}$ . A Figura 30 representa o hidrograma de cheia na Praça da República e em Santa Cruz. Com esta figura pode observar-se o tempo de atraso entre os dois hidrogramas, pois o hidrograma da Praça da República apresenta um pico de escoamento às 2:08h e o hidrograma de Santa Cruz às 2:20h. O hidrograma de Santa Cruz é o reflexo do somatório de todos os

hidrogramas que para ele drenam. O tempo de 12 minutos é compatível com o geralmente usado em zonas urbanas.

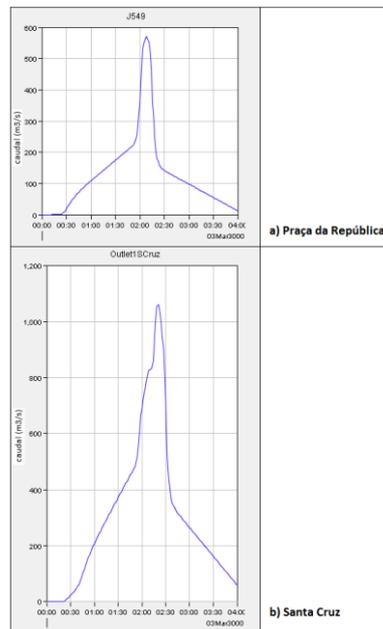


Figura 30- Comparação entre o hidrograma de cheia da Praça da República e o de Santa Cruz

Numa segunda abordagem, obteve-se o caudal das ruas tributárias individualmente. Na Figura 31, pode observar-se a localização dos pontos de interseção, com as características obtidas, bem como os hidrogramas de cheia, verificando-se um aumento de caudal consoante o aumento da área de drenagem para cada ponto.

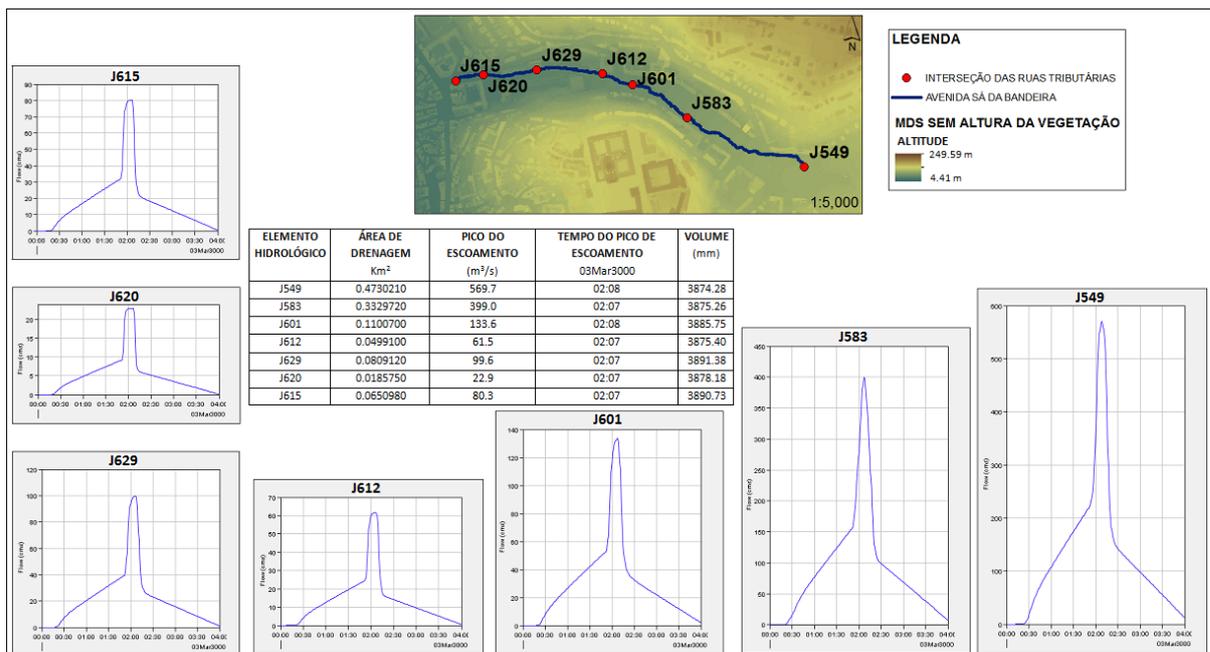


Figura 31 - Resultado final da segunda abordagem

## 4.4 Modelação hidráulica

A modelação hidráulica tem uma grande particularidade, distinta da modelação hidrológica, pois estuda o escoamento entrando em consideração com as características de profundidade e largura do canal. Após inserção das características hidráulicas, obteve-se um perfil longitudinal de toda a Avenida Sá da Bandeira, representado na Figura 32.

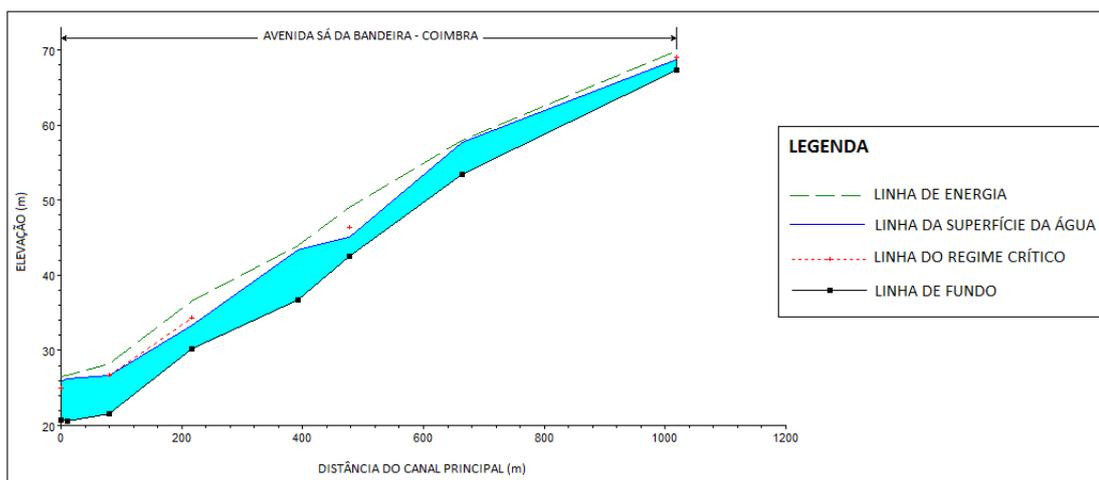


Figura 32 - Perfil longitudinal da Avenida Sá da Bandeira

Analisando o perfil longitudinal, pode observar-se que há a ocorrência de cheia ao longo de toda a avenida. A linha de energia está representada em relação ao fundo do canal, e como neste caso o escoamento apresenta um regime variado (ver secção 2.6.2), a linha de energia decresce conforme as condições do escoamento.

O HEC-RAS desconhece se está perante um escoamento rápido ou lento. Durante os constantes cálculos do escoamento ao longo do canal, cria-se uma linha de regime crítico e as linhas de regime rápido e lento. Visto a linha do regime crítico ser traçada apenas para um cálculo auxiliar do HEC-RAS, não se vai analisar com pormenor nestes resultados.

Em cada perfil transversal traçado nos pontos de interseção das ruas tributárias com a Avenida Sá da Bandeira, tem-se a informação do nível de cheia nesse local, a linha de energia, e a velocidade de escoamento. A Figura 33 representa o perfil transversal da Praça de República (1020), onde se verifica que a linha de energia é paralela à linha da superfície livre. No entanto, analisando o seu declive na tabela, este valor embora mínimo é de 0.064473 (m/m). Analisando o número de Froude, e segundo a metodologia da secção 2.6.2, neste perfil pode dizer-se que se está perante um movimento rápido ou tendencial, ou seja as perturbações pequenas não se propagam para montante.

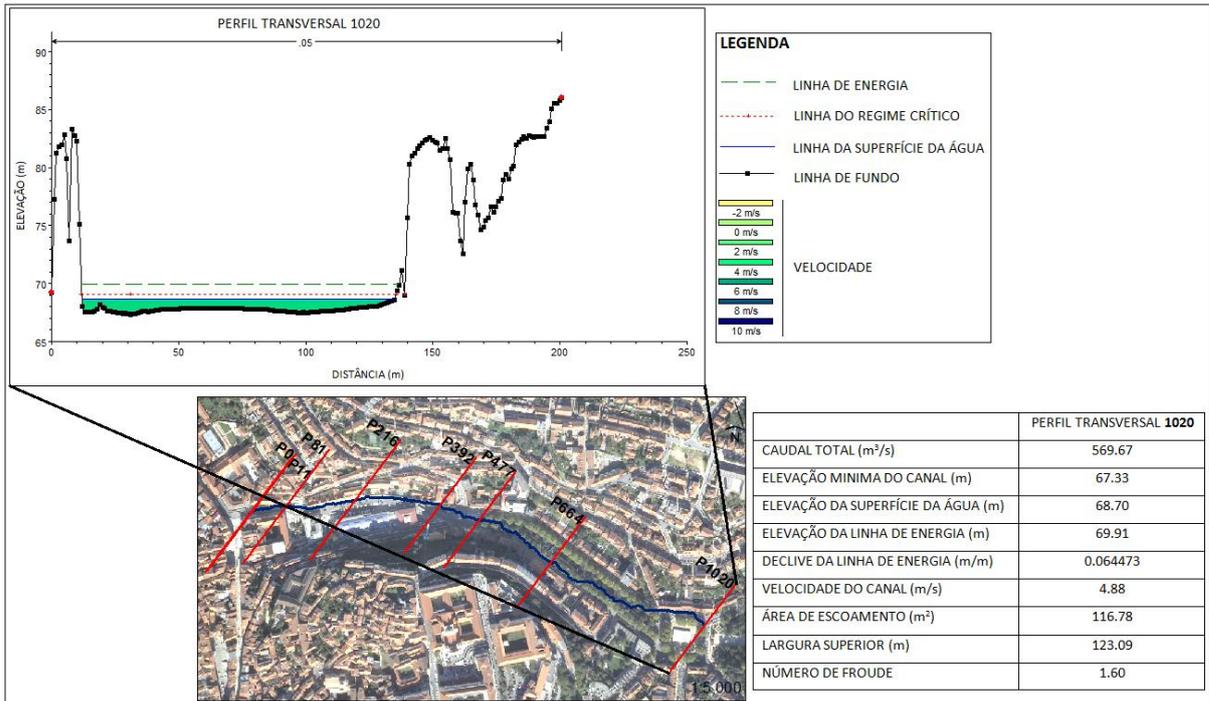


Figura 33 - Perfil transversal 1020 e suas características

A Figura 34 representa o perfil transversal de Santa Cruz (0), onde também a linha de energia segue paralela à linha da superfície livre (pelos mesmos motivos do perfil 1020) e está-se perante um movimento lento, pois o número de Froude é inferior a 1.

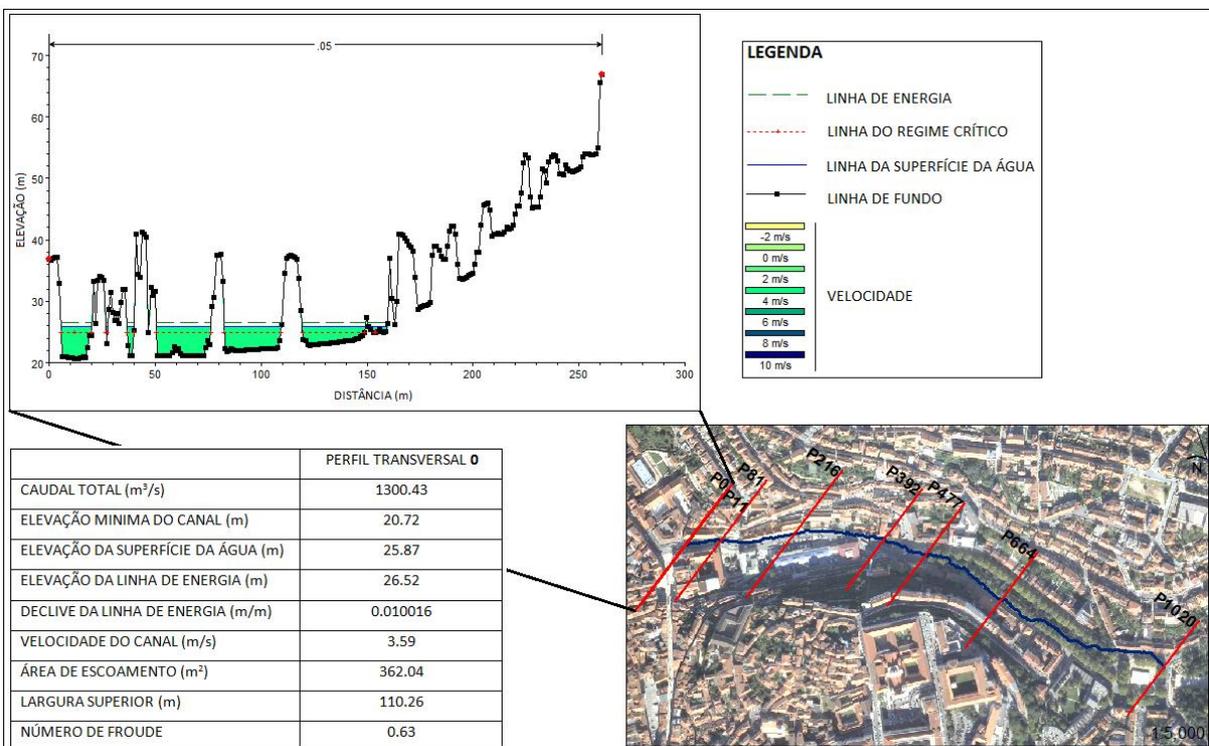


Figura 34 - Perfil transversal 0 e suas características

Comparando as duas figuras anteriores, verifica-se que ambas não têm uma velocidade muito elevada, pois os perfis estão localizados em zonas de menor declive comparando com a zona central daquela avenida, como se pode ver nos restantes perfis transversais no Anexo C. Também se verifica o aumento do nível de inundação na zona mais baixa da cidade de Coimbra e o consequente aumento do caudal total. Os edifícios representados nos perfis transversais na zona de cheia mostram ser barreiras do escoamento, pois a água contorna-os escoando por ambos os lados.

A Figura 35 apresenta um gráfico com a variação do caudal. Este varia tendo em conta não só as características do canal, como os hidrogramas de cheia referente a cada rua tributária. Fazendo uma comparação entre o caudal calculado pelo HEC-HMS ( $1060 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e pelo HEC-RAS ( $1300.43 \text{ m}^3/\text{s}$ ) no ponto mais a jusante (Santa Cruz), confirma-se que o caudal calculado segundo o modelo hidráulico é maior como seria de esperar. Isto acontece pois no HEC-HMS os cálculos foram efetuados sem se entrar em linha de conta com a largura e profundidade da linha de água, enquanto no HEC-RAS esses parâmetros foram considerados.

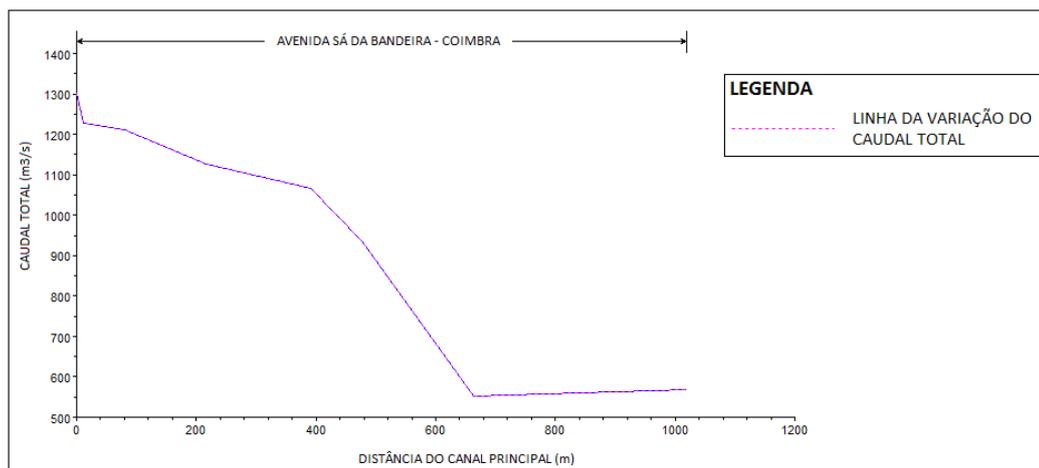


Figura 35 - Variação do caudal total na Avenida Sá da Bandeira (modelo hidráulico)

Na cidade de Coimbra, o sistema de drenagem é praticamente unitário, ou seja as águas pluviais e domésticas escoam no mesmo coletor, isto é, o caudal pluvial que entra no coletor mistura-se com o caudal residual doméstico e ambos afluem à ETAR. Para ter em conta o escoamento enterrado, seria necessário criar uma nova linha de água de secção circular situada mais abaixo e distribuir uma parte do caudal total pelo coletor. Contudo, a situação simulada não é irrealista pois muitas vezes devido à má limpeza dos sumidouros/sargetas associado a um grande fenómeno de precipitação, o sistema de drenagem enterrado entra em carga e não

consegue transportar mais caudal e o escoamento passa a ser enterrado e à superfície (drenagem dual) ou apenas à superfície.

No processo de pós-processamento, obteve-se um mapa de inundação e de velocidades. Na Figura 36 a) tem-se o mapa de inundação onde se pode averiguar a extensão lateral da inundação, e na Figura 36 b) tem-se a perceção dos locais onde o nível de cheia é mais elevado. Este mapa apresenta um resultado bastante perceptível do que acontece na realidade, pois observa-se com bastante clareza a água que escorre à superfície contornando os edifícios. Contudo, na zona **1)** os resultados não foram os mais interessantes de observar, pois a água flui por cima do telhado do Mercado Municipal D. Pedro V. Isto acontece porque o MDS que originou este mapa de inundação, provem de dados LiDAR adquiridos em Agosto de 2000, e o Mercado Municipal sofreu uma grande remodelação que teve início em Outubro de 2000, sendo construído um grande edifício nesse local. A presença de inundação nesse local está atualmente afastada, pois foi resolvida com a construção do novo mercado.

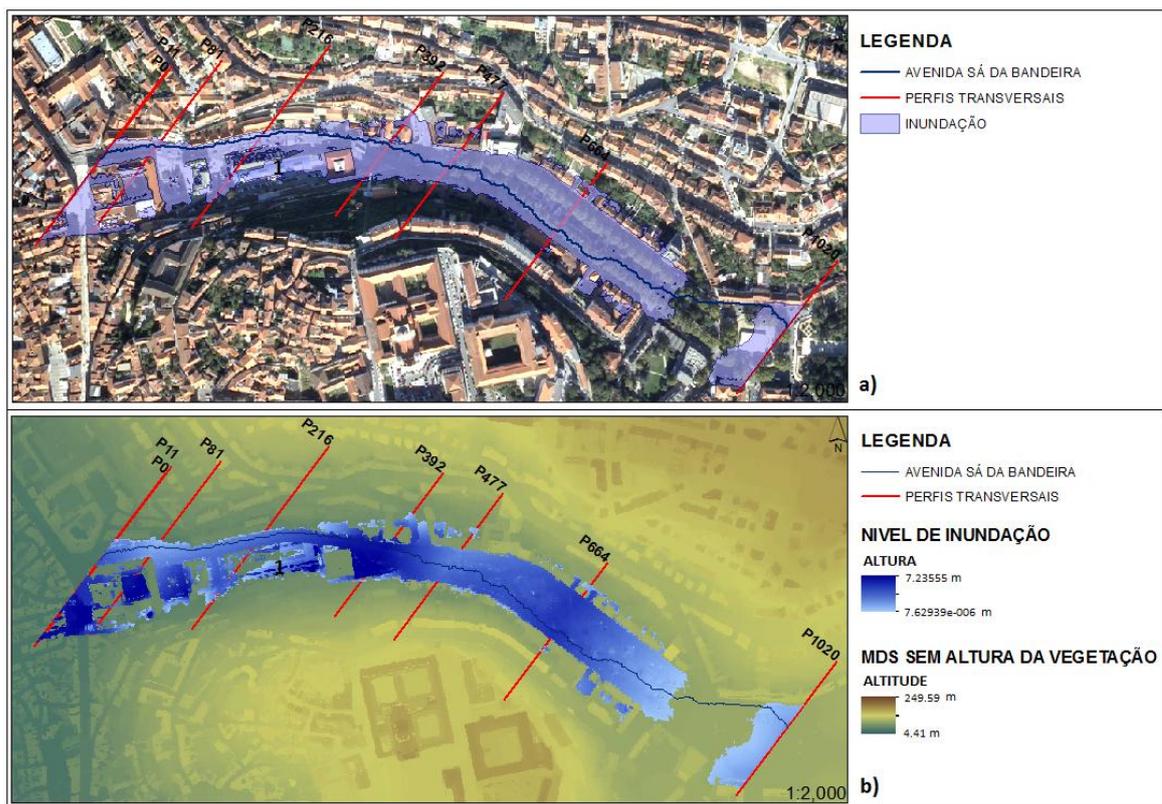


Figura 36- Mapa de inundação

Na Figura 37 tem-se o mapa de velocidades, onde se averigam os locais de maior e menor velocidade relacionados também com o gráfico. Verifica-se que no centro da parte livre da linha de água a velocidade é mais elevada como seria de esperar, baixando junto das margens.

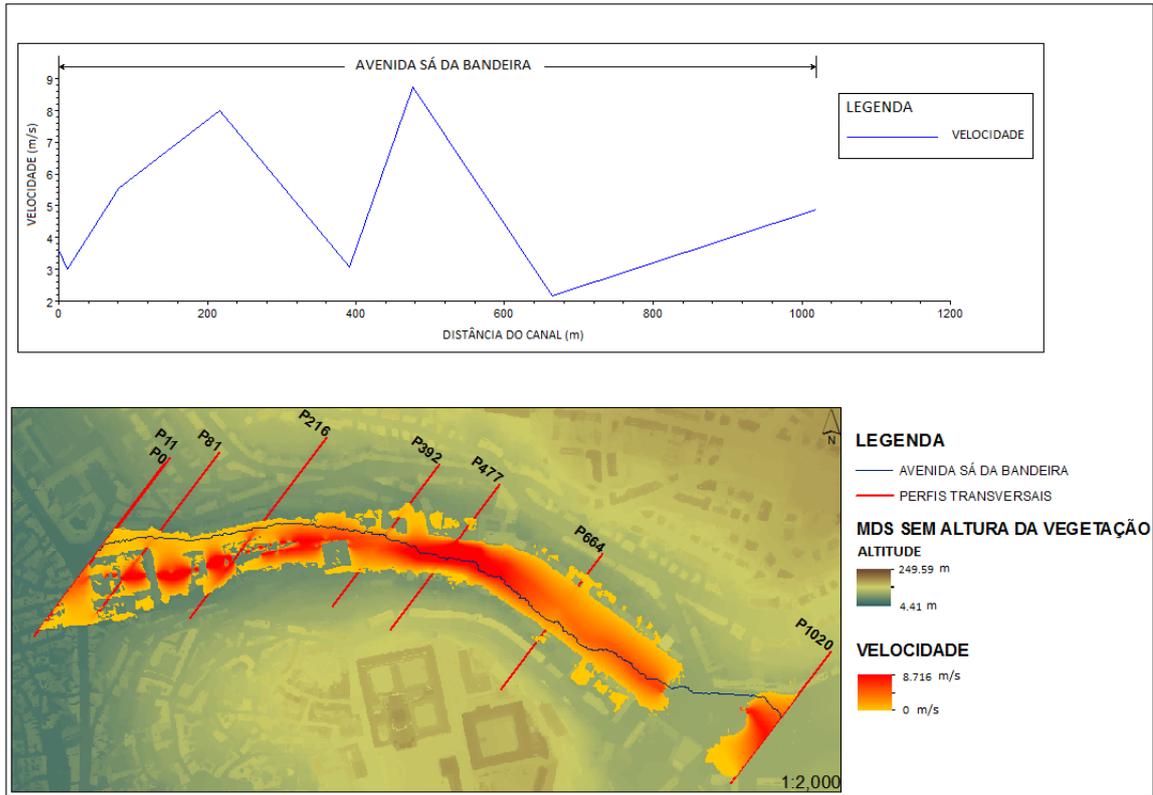


Figura 37 - Gráfico de velocidades e o respetivo mapa de velocidades

## 5 CONCLUSÕES E PROSSEGUIMENTOS DE ESTUDO

Na zona mais baixa da cidade de Coimbra, à semelhança de outras zonas urbanas, as inundações têm sido periódicas causando prejuízos preocupando os organismos oficiais responsáveis e os habitantes.

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia que consistiu na geração de uma base de dados em ambiente SIG, a fim de organizar todos os dados necessários para a modelação hidrológica e hidráulica numa zona urbana com diferentes ocupações. Foi efetuada a geração automática das bacias e rede hidrográfica usando o *software* ArcHydro, onde se efetuou um pré-processamento do terreno obtendo-se dados segundo o MDT, o MDS e o MDS sem altura da vegetação. Foi elaborada a carta representativa do CN para o meio urbano de Coimbra por técnicas de deteção remota, mais propriamente classificação supervisionada. Foram criadas as bases de dados que permitiram a construção de modelos e foram aplicadas na Avenida Sá da Bandeira, compreendida entre a Praça da República e Santa Cruz mostrando assim, como se comporta o escoamento superficial numa zona problemática da cidade. A pré-modelação hidrológica e pré-modelação hidráulica foram realizadas no HEC-GeoHMS e Hec-GeoRAS respetivamente, e consistiram na preparação de todos os parâmetros morfológicos e hidrológicos referentes às sub-bacias e à rede, bem como na preparação dos parâmetros hidráulicos, necessários para os modelos. Os modelos hidrológicos foram aplicados no *software* HEC-HMS onde se obtiveram os hidrogramas da cheia em vários pontos, nomeadamente na Praça da República, em Santa Cruz e em todas as ruas tributárias à Avenida Sá da Bandeira, que foram utilizados para a simulação hidráulica na mesma avenida. O modelo hidráulico foi aplicado no *software* HEC-RAS, onde se obteve o nível de inundação representado nos perfis transversais, o mapa de inundação e de velocidades de escoamento. Toda esta metodologia foi desenvolvida adequadamente a fim de se obter maior variabilidade das características urbanas.

Considera-se que a metodologia apresentada mostra as vantagens que as tecnologias SIG associadas à modelação hidrológica e hidráulica fornecem hoje em dia. No entanto, fazendo uma análise global, é importante mencionar que o estudo efetuado com o intuito de perceber em pormenor qual os melhores dados para a geração das bacias e rede hidrográfica, bem como para a geração da carta representativa do CN em meio urbano, constituíram uma grande componente de

estudo nesta dissertação. Com isto, conclui-se que para este tipo de estudos, os dados LiDAR fornecem uma maior garantia nos resultados finais, tanto em termos de resolução quanto à possibilidade do uso do MDS normalizado, isto é, informação apenas da altura dos objetos – pela existência de informação do primeiro e último impulso. Não esquecendo de referenciar que os dados LiDAR, dada a componente urbana e a geração de bacias e rede hidrográfica, necessitam de ser manipulados a fim de se retirar a altura da vegetação; de facto, no decorrer desta metodologia mostrou ser o dado de base que originou melhor a representação do escoamento superficial.

Realça-se que em estudos de escoamentos superficiais anteriores foi praticamente sempre usada a carta de CN do INAG com resolução de *pixel* de 500 m e efetuada a partir da CLC com uma escala de 1: 100 000, o que para um meio urbano esta é inapropriada. Com a carta elaborada, conseguiu-se uma resolução de *pixel* de 1 m propondo-se assim que seja sempre feita uma carta usando a metodologia proposta tendo em especial atenção a resolução das condicionantes à classificação supervisionada.

A componente da modelação hidrológica e hidráulica nesta dissertação, mostrou que os *softwares* utilizados fornecem uma utilidade muito satisfatória, pois permitem o cálculo dos caudais, hidrogramas de cheia, níveis de inundação e velocidades de escoamento num curto espaço de tempo e de uma forma muito mais prática e intuitiva. Analisando em concreto os *softwares* de código aberto utilizados (HEC-HMS, HEC-RAS, HEC-GeoHMS e HEC-GeoRAS), associados ao ArcGIS, averiguou-se que foram desenvolvidos com o intuito de interligar todo o tipo de dados, facilitando os cálculos, a construção da base de dados, ou seja a sistematização dos procedimentos.

Analisando os resultados hidrológicos e hidráulicos, concluiu-se que dado o contexto urbano, e por a infiltração ser muito reduzida, provocou um escoamento bastante rápido, ou seja um tempo de concentração curto, evidenciando os altos picos de descarga. No entanto, é importante referir que o escoamento enterrado não foi considerado e que estes modelos não foram calibrados, mas mostraram uma proximidade com a realidade podendo ajudar em muito na solução de inundações.

Esta base de dados permite o estudo da incorporação de diferentes órgãos nos sistemas de drenagem, tais como algerozes, caleiras, ou telhados sem drenagem e de componentes SUDS (Sistema de **D**renagem **U**rbana **S**ustentável), tais como telhados verdes, bacias de retenção, adaptando-se ao sistema de drenagem já existente. Permite também analisar diferentes elementos

que influenciam o hidrograma de cheia, bastando para isso mudar parâmetros como o CN, tempos de escoamento, entre outros, consoante o modelo a utilizar.

Como prosseguimento futuro deste estudo, propõe-se que seja acrescentado ao modelo o escoamento que ocorre pelo sistema enterrado, pois dará uma maior correspondência da realidade e mostrará de que forma se pode intervir mais corretamente num fenómeno de inundação, nomeadamente avaliar de que forma se pode intervir no sistema de drenagem.

Esta metodologia foi desenvolvida e aplicada para uma zona da cidade de Coimbra, mas com os critérios tidos em conta durante todo o seu desenvolvimento mostrou ser também aplicável a outra área urbana relativamente edificada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Abreu, M. R.**, 1983, Contribuição para o estudo da drenagem de águas pluviais em zonas urbanas [Livro]. Lisboa.

**Acabado, M. G.**, 2003, Determinação de Caudais de Cheia em Pequenas Bacias Hidrográficas [Conferência] // 6º SILUSBA - Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Cabo Verde.

**Agriculture United States Department of**, 1986, Urban Hydrology for Small TR-55 [Livro]. United States.

**Almeida, J. P.**, 2012, Apontamentos de Análise e Desenvolvimento de SIG [Manual]. Coimbra.

**Araki, H.; Centeno, J. A.; Huinca, S. C. e Cavalheiro, A. C.**, 2005, Ortorectificação de imagem Quickbird utilizando Modelos Geométricos dependentes de terreno e Modelo de Superfície gerado com dados Laser Scanning [Conferência] // IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. Curitiba.

**Baltsavias, E. P.**, 1999, A comparison between photogrammetry and laser scanning [Jornal]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.

**Carvalho, R. F. e Tavares, P.**, 2006, Apontamentos de Hidrologia e Recursos Hídricos - Modelos Precipitação-Escoamento [Relatório].

**Charneca, N. e Carvalho, R. F.**, 2012, Curso: SIG para planeamento e gestão de Recursos Hídricos [Livro].

**Congalton, R. G.**, 1991, A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data [Artigo] // Remote Sensing of Environment.

**Congalton, R. G. e Green, K.**, 1999, Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices [Livro]. Boca Raton.

**Crisógono, P. J.**, 2011, Detecção Remota em Meio Urbano: Teste com Classificadores Supervisionados a Nível do Pixel Sobre Imagens de Alta Resolução Espacial Aplicados Numa Lógica Hierárquica de Classes [Relatório]. Lisboa.

**David, L.M.**, 2005, Descargas de Excedentes de Sistemas de Drenagem Urbana - Estudo Referenciado em Resultados Experimentais Obtidos em Portugal - Tese de Doutoramento [Relatório], IST Lisboa

**Faria, R. e Pedrosa, A.**, 2005, Aplicação SIG na elaboração de cartografia temática de base na bacia hidrográfica do Rio Uíma - Santa Maria da Feira [Relatório]. Porto.

**Felix, N. A. e Binney, D. L.**, 1989, Accuracy Assessment of a Landsat-assisted Vegetation Map of the Coastal Plain of the Arctic National Wildlife Refuge [Artigo] // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.

**Ferreira, A.**, 2000, Caracterização de Portugal Continental [Relatório].

**Fonseca, A. D. e Fernandes, J. C.**, 2004, Detecção Remota [Livro]. Lisboa : LIDEL.

**Fonte, C.**, 2011, Apontamentos de Sistemas de Informação Geográfica [Livro]. Coimbra.

**Gaspar, J.**, 2004, Dicionário de Ciências Cartográficas [Livro]. Lisboa : LIDEL.

**Gomes, N. M.**, 2011, Integração de dados LiDAR com imagens de muito alta resolução espacial para determinação de áreas urbanas com potencial solar [Relatório] : Dissertação de Mestrado / Faculdade de Ciências Sociais e Humanas ; Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.

**Gonçalves, G.; Fernandez, P.; Pereira, L. e Moreira, M.**, 2009, Use of LIDAR data and multispectral images for urban flood modelling: State of Art [Relatório].

**Gonçalves, G. e Seco, L. G.**, 2007, Utilização de dados LiDAR na classificação de objectos situados em zonas rurais [Livro]. Actas da V Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia : Editora LIDEL.

**Gonçalves, J. A.**, Maio 2012, Transformação de coordenadas cartográficas e geográficas usando grelhas de transformação de datum em <http://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/coordenadas/> [Online]

**Gonçalves, J. A.; Santos, Z. e Morgado, A. M.**, 2004, Geração de Ortofotos utilizando Modelos Digitais de Superfície [Conferência] // Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia. LIDEL.

**Gonçalves, L. M.; Júlio, E. N. e Caetano, M.**, 2008, Estudo Sobre um Futuro Aumento da Resolução Espacial dos Sensores de Muito Grande Resolução Espacial [Relatório].

**Hidroprojecto** Aproveitamento do vale do Mondego [Livro].

**Holtz, A. C.; Pinto, N. L.; Martins, J. A. e Gomide, F. L.**, 1976, Hidrologia Básica [Livro]. São Paulo : Edgard Blucher, Ltda.

<http://webhelp.esri.com> [Online].

<http://www.geography.hunter.cuny.edu> [Online].

**Jensen, J. R.**, 2005, Introductory Digital Image Processing - A Remote Sensing Perspective [Livro]. University of South Carolina : PEARSON. 3ª Edição.

**Jensen, J. R.**, 2007, Remote sensing of the environment: an earth resource perspective [Livro].

**Konecny, G.**, 2003, Geoinformation - Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems [Livro]. London and New York : Taylor & Francis.

**Landis, J. e Koch, G.**, 1977, The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data [Artigo] // Biometrics.

**Leitão, J. P.; Boonya-aroonnet, S.; Prodanović, D. e Maksimović, C.**, 2008, Influence of DEM resolution on surface flow network for pluvial urban flooding and simulations of integrated system [Conferência] // 11th International Conference on Urban Drainage. Edinburgh, Scotland and UK.

**Lencastre, A. e Franco, F. M.**, 1992, Lições de Hidrologia [Livro]. Lisboa.

**Lencastre, A.**, 1983, Hidráulica Geral [Livro]. Edição Luso-Brasileira.

**Li, Z. e Gold, C.**, 2004, Digital Terrain Modeling - Principles and Methodology [Livro]. CRC PRESS.

**Lima, J. P.; Martins, C. M.; Mendes, M. G.; Abreu, J. M.; Almeida, J. L. e Lima, I. P.**, 2010, Hidrologia urbana - Conceitos básicos [Livro]. Lisboa.

**Lohr, U.**, 1998, Laserscanning for DEM generation [Relatório].

**Loureiro, M. L.**, 2008, Exploração das Características Espectrais de Imagens IKONOS para Caracterização da Ocupação do Solo: Comparação de Classificadores [Relatório] : Dissertação de Mestrado / Universidade Técnica de Lisboa ; Instituto Superior Técnico. Lisboa.

**Lourenço, L.**, 2004, Riscos naturais e protecção do ambiente - Coimbra e os riscos naturais (passado e presente) [Relatório]. Coimbra : Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra.

**Maidment, R.**, 2002, ArcHydro, GIS for water Resources [Livro]. California : ESRI.

**Mata-Lima, H.**, 2007, Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação e um caso de estudo [Livro]. Ouro Preto.

**Matos, J. L.**, 2001, Fundamentos de Informação Geográfica [Livro]. LIDEL. 2ª Edição.

**Matos, M. R. e Silva, M. H.**, 1986, Estudos de precipitação com aplicação no projecto de sistemas de drenagem pluvial. Curvas de intensidade-duração-frequência da precipitação em Portugal [Livro]. Lisboa : LNEC.

**Matsuoka, C. T.**, 2003, Actualização Cartográfica Urbana utilizando Imagem Quickbird [Relatório].

**Paine, D. P. e Kiser, J. D.**, 2003, Chapter 23: Mapping Accuracy Assessment [Artigo] // Aerial Photography and Image Interpretation. New York : John Wiley & Sons. 2ª ed.

**Paiva, I.**, 2006, Risco de Inundação em Coimbra: fatores físicos e acção antrópica [Relatório]. Coimbra : Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra.

**PBH do Rio Vouga**, 2002, Anexo 12, Situações de Risco, Parte A. "Análise do Risco de Erosão e Assoreamento" [Relatório].

**Pereira, Z.**, 2006, Apontamentos da disciplina de Detecção Remota [Livro]. ESTGA

- Ponce, V. M.**, 1989, Engineering Hydrology - Principles and practices [Livro]. New Jersey.
- Portela, M. M.**, 2006, Modelação Hidrológica [Relatório].
- Priestnall, G.; Jaafar, J. e Duncan, A.**, 2000, Extracting urban features from LiDAR digital surface models [Artigo] // Computers, Environment and Urban Systems. Pergamon.
- Richards, J. A. e Jia, X.**, 1999, Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction [Relatório]. Berlin.
- Rocha, F. J.**, 2002, Integração de Dados Estatísticos na Classificação de Imagens de Satélite [Relatório]. Lisboa.
- Rosenfield, G. H. e Fitzpatrick-Lins, K.**, 1986, A coefficient of Agreement as a Measure of Thematic Classification Accuracy [Artigo] // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.
- Rouse, J. W.; Hass, R. H.; Schell, J. A. e Deering, D. W.**, 1974, Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS [Conferência] // 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium - Vol. 1.
- Sá-Marques, A.; Carvalho, R. F.; Simões, N. e Reis, P.**, 2004, Estudos de Hidrologia Urbana no Município de Coimbra [Relatório]. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia de Universidade de Coimbra - Departamento de Engenharia Civil.
- Sartori, A.**, 2004, Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos [Livro]. - Campinas, SP.
- Smith, J. S. e Smith, D. G.**, 1996, Operational experiences of digital photogrammetric systems [Artigo] // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXI.
- Story, M. e Congalton, R.**, 1986, Accuracy Assessment: A User's Perspective [Artigo] // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.
- Tenedório, J. A.; Rocha, J.; Encarnação, S. e Sousa, P. M.**, 2007, Classificação de Uso do Solo Urbano através da Análise Linear de Mistura Espectral em Imagens de Satélite [Relatório].
- Tucci, C. E.**, 1998, Modelos Hidrológicos [Livro]. Porto Alegre.
- Tucci, C.E. M.; Porto, R. L. e Barros, M. T.**, 1995, Drenagem Urbana [Livro]. Porto Alegre.
- Viessman, Jr. W. e Lewis, G. L.**, 1996, Introduction to Hydrology [Livro]. Nova Iorque: HarperCollins College Publishers.
- Vosselman, G. e Maas, H. G.**, 2010, Airborne and Terrestrial Laser Scanning [Livro]. CRC PRESS.
- Walter, R.**, 2005, O espaço de Coimbra da instalação da urbanidade ao fim do antigo regime [Livro]. Coimbra.

# ANEXO A – Esquema geral da metodologia

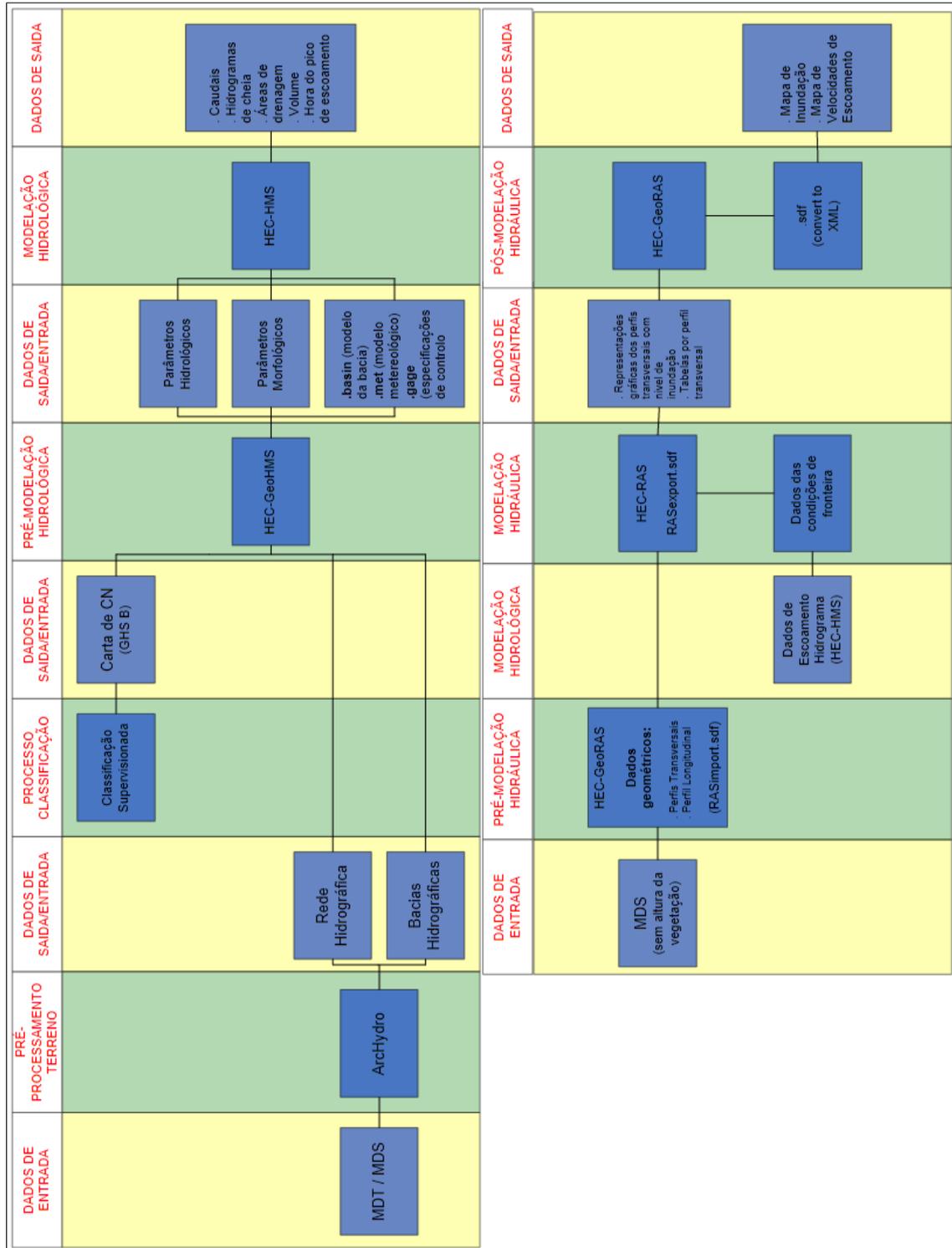


Figura 38 - Esquema geral da metodologia

## ANEXO B – Regiões pluviométricas para o hietograma de projeto

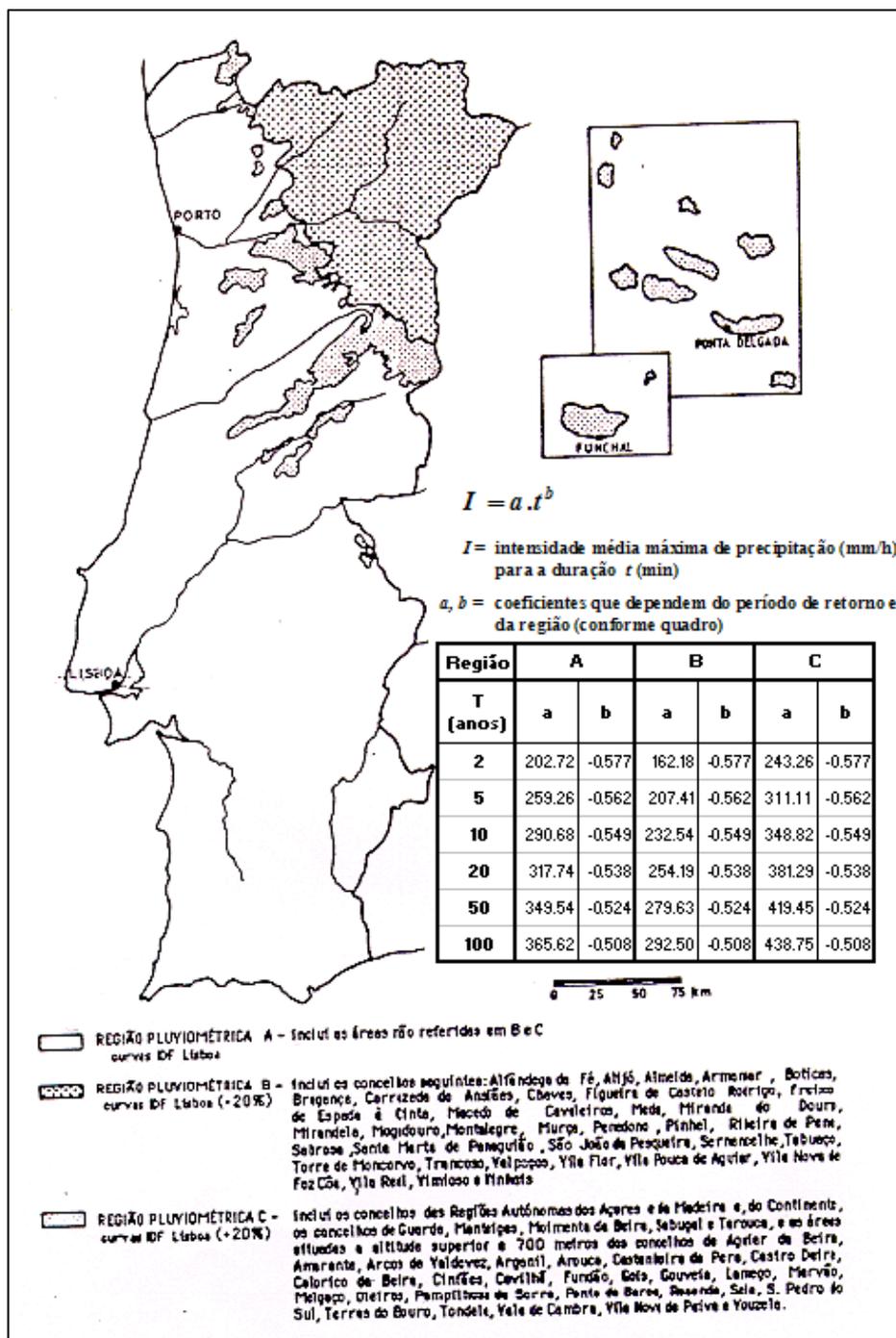


Figura 39 - Regiões pluviométricas para os hietogramas de projeto baseados nas curvas IDF

## ANEXO C – Perfis transversais e suas características nos pontos de interseção das ruas tributárias com a Avenida Sá da Bandeira

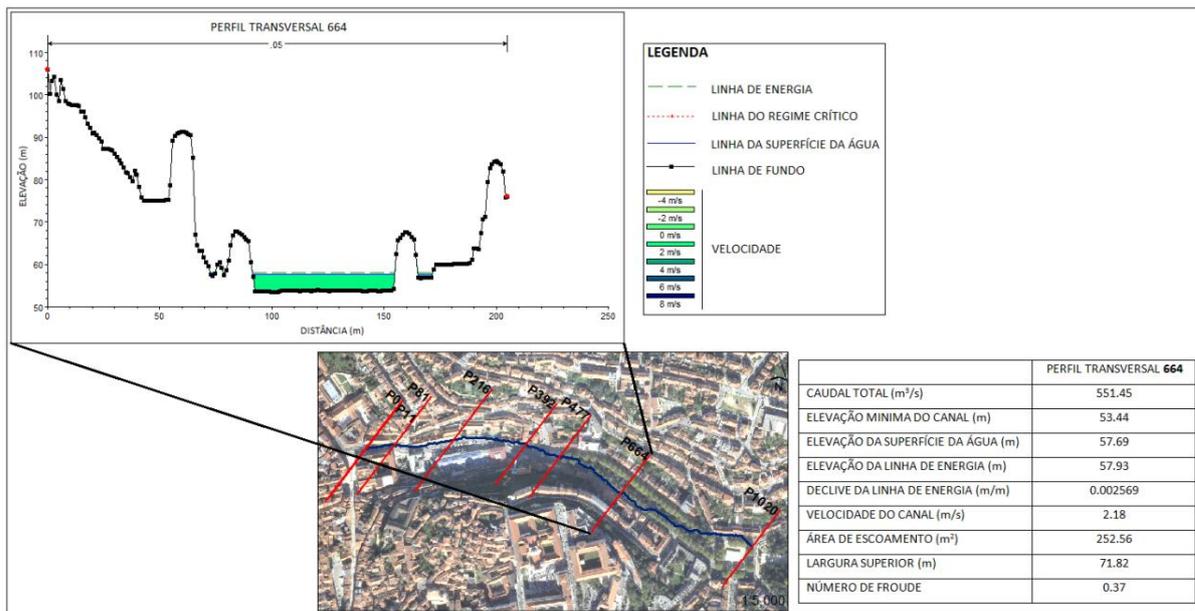


Figura 40 - Perfil transversal 664

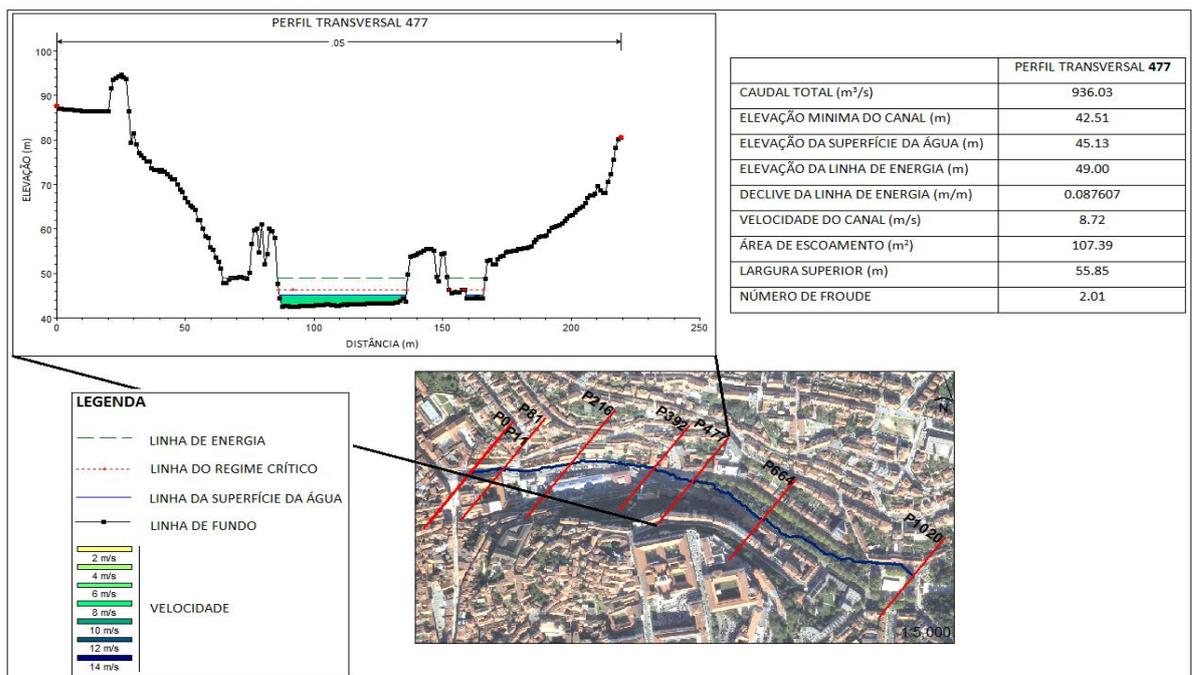


Figura 41 - Perfil transversal 477

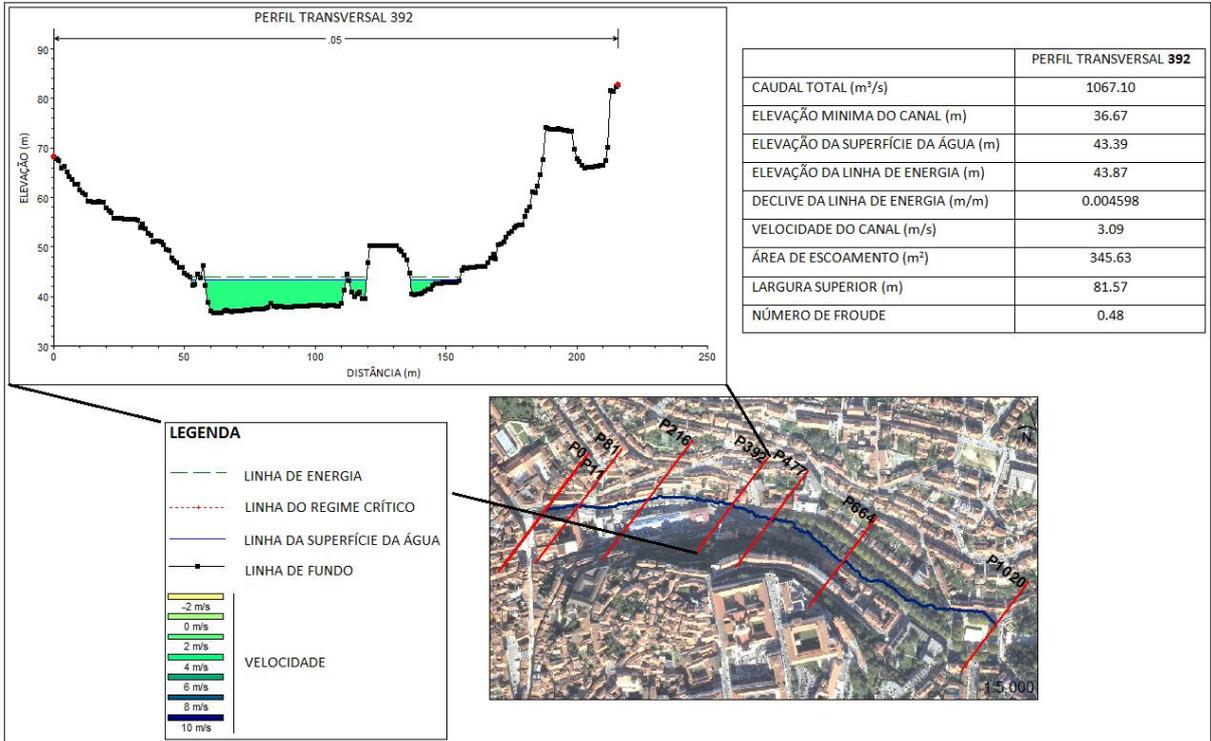


Figura 42 - Perfil transversal 392

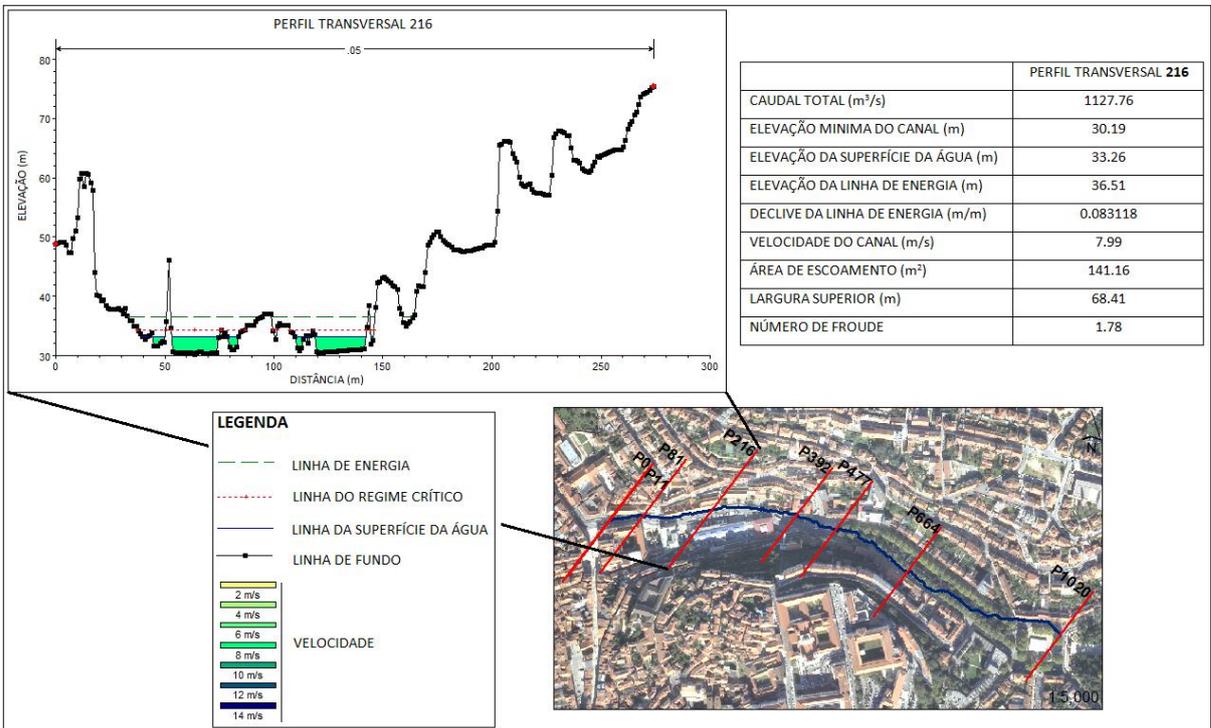


Figura 43 - Perfil transversal 216

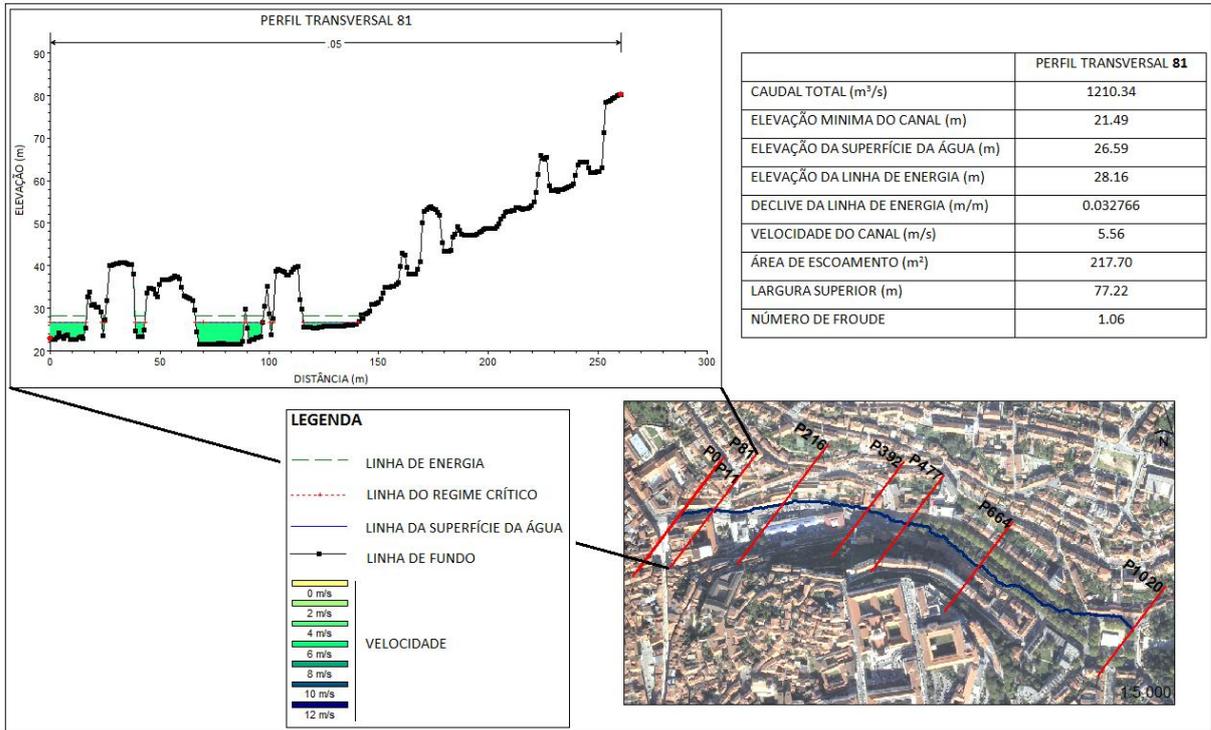


Figura 44 - Perfil transversal 81

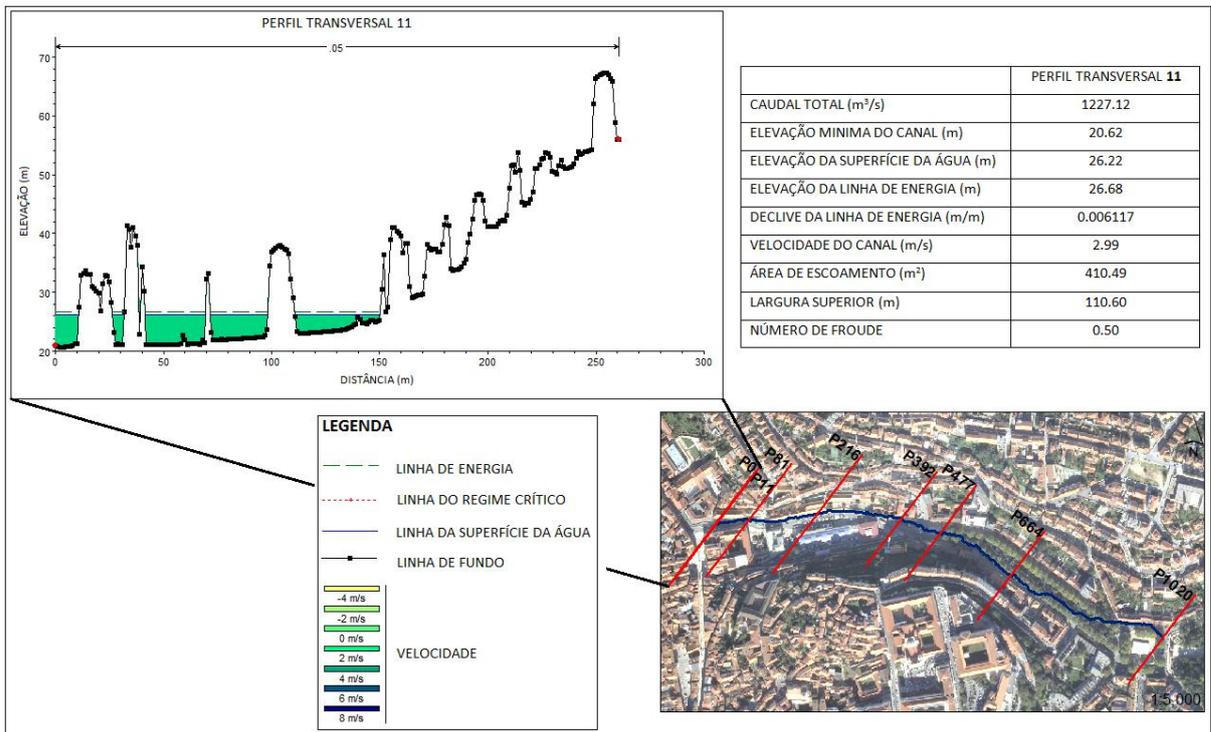


Figura 45 - Perfil transversal 11