

**FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO**

**Integração de Ferramentas de SIG na Modelação Hidrológica  
de Pequenas Bacias Hidrográficas**

Daniel Fernando Melo e Silva

Licenciado em Biologia  
pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos  
requisitos para a obtenção do grau de mestre  
em  
Engenharia do Ambiente  
(área de especialização de Tratamento de Águas e Águas Residuais)

Dissertação realizada sob a orientação de  
Doutor Paulo Santos Monteiro  
do Departamento de Engenharia Civil  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Março de 2008

## **Agradecimentos**

Ao orientador Doutor Paulo Monteiro, pelo conhecimento e experiência transmitida, orientação e incentivo na realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Miguel Oliveira, por todas as sugestões e auxílio prestado no elaborar do trabalho.

À Dra. Ana Isabel Gomes, pela disponibilidade, participação e ajuda no decurso do trabalho.

À Dra. Ana Cristina Padilha, pela ajuda prestada no decorrer do trabalho.

Ao Engenheiro Tiago Gomes, pela disponibilidade, participação e ajuda no trabalho de campo realizado.

Ao Doutor Henrique Silva, pela ajuda na revisão do documento.

Aos meus pais, pela paciência, continua compreensão e incentivo. À minha companheira, Ana Isabel, por toda a paciência e compreensão.

## Sumário

Países em todo o mundo enfrentam populações em crescimento sem o correspondente aumento de abastecimento de água. Problemas de conservação e alocação deste recurso tornam-se, como consequência, mais agudos e urgentes. Avanços recentes, em disponibilidade de informação e tecnologia para o seu processamento, permitem, cada vez mais, o desenvolver de modelos precisos o suficiente para que sejam determinantes numa correcta gestão dos recursos hídricos.

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

Este documento tem por objecto de estudo um pequeno curso de água perene e costeiro, inserido na malha urbana periférica do Concelho de Vila Nova de Gaia. Por meio de um exercício de planeamento torna-se perceptível o estado actual do regime do escoamento da referida bacia hidrográfica.

A linha de água em questão foi objecto de trabalho de campo, onde a colheita de dados, imprescindíveis à calibração dos modelos trabalhados, foi feita. Por esta forma, pretende-se assegurar uma representação mais fidedigna dos resultados obtidos pela conjugação dos Sistemas de Informação Geográfica e do *software* de Modelação Hidrológica.

## **Abstract**

Countries around the World face increasing population, with no corresponding increase in water supply. Problems of conserving and allocating water become, as a consequence, more acute and more pressing. Recent advancements in data collection and software technology are now helping better model how water behaves.

With its ability to pull spatial data from different sources into an integrated environment, Geographic Information Systems simplifies the process of preparing data for hydrologic modelling, and greatly extends the analytical power of the model. Applications such as watershed delineation or topographic characteristic extraction are examples on how Geographic Information Systems supported hydrologic modelling can, in fact, provide an informed basis for sound decision making regarding water resource management.

The present document as for its study object a small costal and perennial watershed located at Vila Nova de Gaia Municipal suburban tissue. By means of a planning exercise it becomes apparent its present flow regime.

The analysed watershed was object of field work, where indispensable data collection for the hydrologic model calibration took place. In this way the relation between Geographic Information Systems and Hydrologic Modelling was furthered.

# Índice Geral

---

## AGRADECIMENTOS

## RESUMO

## ABSTRACT

## CONCEITOS E ABREVIATURAS

	<b>Pág.</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA</b>	
2.1 Introdução .....	17
2.2 Representação .....	18
2.2.1 Modelos de Dados Vectoriais .....	19
2.2.2 Modelos de Dados <i>Raster</i> .....	20
2.3 Georreferenciação .....	21
2.4 Visualização .....	22
2.5 Análise Espacial .....	22
2.6 Considerações Finais .....	24
<b>3 MODELAÇÃO HIDROLÓGICA</b>	
3.1 Introdução .....	26
3.2 Breves Considerações Sobre Modelação .....	27
3.3 Classificação dos Modelos Hidrológicos .....	29
3.4 Aplicação da Modelação Hidrológica à Análise de Cheias .....	31
3.4.1 Componentes de um Hidrograma .....	31
3.4.2 Forma do Hidrograma e Factores Condicionantes .....	33
3.4.3 Modelos para Separação do Escoamento Directo e do Escoamento de Base .....	35
3.4.4 Precipitação .....	36
3.4.5 Hietograma das Precipitações .....	42
3.4.6 Precipitação Útil e Modelação das Perdas de Precipitação .....	44
3.4.6.1 Modelo de Perdas de Intensidade Constante .....	47
3.4.6.2 Modelo de Perdas do <i>Soil Conservation Service</i> (SCS) .....	48
3.4.7 Modelação do Escoamento Directo .....	54
3.4.7.1 Modelo do Hidrograma Unitário .....	55
3.4.7.2 Modelo da Onda Cinemática .....	58
3.4.8 Propagação de Hidrogramas de Cheia em Trechos de Canal .....	67
3.4.9 Resumo das Componentes do Hidrograma de Cheia e do Correspondente Hietograma da Precipitação Total .....	71

---

---

<b>4 OS SIG E A MODELAÇÃO HIDROLÓGICA</b>	<b>Pág.</b>
4.1 Introdução .....	73
4.2 Modelos Digitais do Terreno .....	74
4.3 Modelos Digitais do Terreno e Modelação Hidrológica .....	80
4.3.1 Considerações Sobre Escala Cartográfica .....	82
4.3.2 Considerações Sobre Área Mínima de Drenagem .....	82
4.3.3 Resolução do MDT .....	83
4.3.4 Algoritmos de Individualização das Bacias Hidrográficas e Respective Cursos de Água .....	83
4.3.5 Zonas de Depressão Altimétrica no MDT .....	86
4.4 Determinação de Parâmetros de Caracterização dos Modelos Hidrológicos por Recurso a Informação Digital Georreferenciada .....	87
 <b>5 APLICAÇÃO À BACIA HIDROGRÁFICA DA RIBEIRA DE VALADARES</b>	
5.1 Introdução .....	89
5.2 Sistemas de Informação Geográfica Utilizados .....	90
5.3 Descrição da Área de Estudo .....	91
5.3.1 Localização .....	91
5.3.2 Geologia .....	93
5.3.3 Tipo Hidrológico de Solos .....	94
5.3.4 Ocupação do Solo e Coberto Vegetal .....	95
5.3.5 Demografia e Ocupação Industrial .....	96
5.3.6 Clima .....	98
5.3.7 Resumo .....	99
5.4 Elaboração do Modelo Digital do Terreno .....	101
5.4.1 Caracterização do Relevo .....	105
5.5 Delineamento de Sub-Bacias Hidrográficas e Rede de Drenagem .....	109
5.5.1 <i>Software</i> Utilizado .....	110
5.5.2 Eliminação de Depressões do MDT .....	110
5.5.3 Grelha da Direcção do Escoamento .....	112
5.5.4 Grelha de Escoamento Acumula .....	114
5.5.5 Delineamento de Bacia, Sub-Bacias e Rede de Drenagem .....	115
5.6 Elaboração do Modelo Hidrológico .....	121
5.6.1 <i>Software</i> de Modelação Hidrológica Utilizado .....	121
5.6.2 Estruturação do Modelo Hidrológico .....	122
5.6.3 Modelo Hidrológico .....	126
5.6.3.1 Modelo de Bacia .....	127
5.6.3.1.1 Modelo de Escoamento Directo .....	127
5.6.3.1.2 Modelo de Perdas de Precipitação .....	137
5.6.3.1.3 Modelo de Escoamento de Base .....	140

---

---

	<b>Pág</b>
5.6.3.1.4 Modelo de Propagação do Escoamento em Canal .....	141
5.6.3.2 Modelo de Precipitação .....	143
5.6.3.3 Especificações de Controlo .....	148
5.6.4 Calibração e Resultados do Modelo Hidrológico .....	148
5.6.4.1 Calibração do Modelo de Bacia .....	149
5.6.4.2 Resultados do Modelo Hidrológico de Projecto .....	158
<b>6 CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>160</b>
<b>7 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>164</b>
<b>ANEXOS</b>	
A – Valores do coeficiente de rugosidade do modelo da onda cinemática ( $N$ ) para diferentes tipos de superfícies .....	171
B – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) para canais a céu aberto.....	172
C – Valores do número de escoamento ( $CN$ ) para zonas urbanas, suburbanas e rurais	173
D – Valores de escoamento observados e simulados, previamente e após calibração, para o evento de precipitação registado a 2 de Janeiro de 2008 na foz da bacia de Valadares .....	174
E – Resultados do programa HEC-HMS, para o modelo de bacia calibrado, para o evento de precipitação registado a 2 de Janeiro de 2008. Valores relativos às Sub-bacias e Junções da bacia de Valadares .....	179
F – Resultados do programa HEC-HMS, para o modelo de bacia calibrado, para o evento de precipitação de projecto. Valores relativos às Junções e foz da bacia de Valadares .....	194

---

## Índice de Figuras

Capítulo 3	Título	Pág.
3.1	Diagrama de fluxo numa bacia hidrográfica .....	27
3.2	Classificação de modelos hidrológicos .....	29
3.3	Componentes de um hidrograma .....	33
3.4	Características do hidrograma tipo .....	35
3.5	Modelo de recessão do escoamento de base .....	36
3.6	Mapa de isolinhas dos valores máximos da precipitação em a) 60 minutos e em b) 6 horas, expressos em percentagem dos valores em 24 horas. Período de retorno de 100 anos .....	38
3.7	Valores máximos de precipitação horária para diferentes frequências estatísticas .....	39
3.8	Superfícies de valores do quociente $P_t/P_{24}$ (%) entre duas precipitações com o mesmo período de retorno T, uma com duração t, $P_t$ , e outra com duração de 24 h, $P_{24}$ , (valores de t de 1, 2, 3 e 4 h) .....	41
3.9	a) Hietograma da precipitação e b) distribuição temporal adimensional da precipitação .....	42
3.10	Representação dos padrões de distribuição de blocos de precipitação em hietogramas .....	43
3.11	Secção da barragem de Toulica. Hidrogramas das cheias afluentes para precipitações com duração igual e tripla do tempo de concentração e com intensidade uniforme e não uniforme .....	44
3.12	Representação das variáveis e funções do modelo do SCS para determinação das perdas de precipitação .....	49
3.13	Carta dos solos de Portugal Continental classificados pelas suas características hidrológicas .....	52
3.14	Grupos hidrológicos correspondentes às classes de solo representadas na Tabela 3.5 .....	53
3.15	Primeiro princípio básico do hidrograma unitário: Princípio da proporcionalidade .....	56
3.16	Segundo princípio básico do hidrograma unitário: Princípio da sobreposição..	56
3.17	Hidrograma em S .....	57
3.18	Elementos usados no processo de cálculo do modelo da onda cinemática ....	62
3.19	Relação entre os elementos representativos do escoamento numa bacia hidrográfica de acordo com o modelo da onda cinemática .....	63
3.20	Padrão de drenagem urbano típico .....	66
3.21	Representação esquemática de um modelo de propagação .....	67
3.22	Modelo de Muskingum. Armazenamento prismático e em cunha .....	68
3.23	Modelo de Muskingum. Efeito do parâmetro x na atenuação da onda de cheia ao propagar-se num trecho de canal .....	69
3.24	Componentes do hidrograma de cheia e do correspondente hietograma da precipitação .....	71

<b>Capítulo 4</b>	<b>Título</b>	<b>Pág.</b>
4.1	Exemplo de um modelo digital do terreno .....	75
4.2	Representação esquemática da triangulação pelo método do varrimento radial .....	76
4.3	Representação esquemática da construção de um diagrama de Voronoi e respectiva triangulação de Delaunay .....	77
4.4	Representação da utilização de linhas de ruptura na geração de MDT .....	78
4.5	Representação esquemática do modelo D8 para delineamento da rede de drenagem .....	85
<hr/>		
<b>Capítulo 5</b>		
5.1	Representação da delimitação da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares e dos limites administrativos do Concelho de Vila Nova de Gaia .....	92
5.2	Cartograma representativo da delimitação administrativa, ao nível da Freguesia, da bacia de Valadares, Concelho de Vila Nova de Gaia .....	92
5.3	Cartograma representativo da litologia da bacia de Valadares .....	93
5.4	Representação do tipo Hidrológico de solos da bacia de Valadares .....	94
5.5	Cartograma representativo da ocupação do solo da bacia de Valadares .....	95
5.6	Cartograma representativo da distribuição da população por subsecção estatística para a bacia de Valadares .....	97
5.7	Cartograma representativo da ocupação industrial da bacia de Valadares .....	98
5.8	Cartograma representativo da evapotranspiração real média total anual na Bacia da Ribeira de Valadares .....	98
5.9	Cartograma representativo da temperatura média anual para o período de 1931 a 1960, para a Bacia da Ribeira de Valadares .....	99
5.10	Cartograma representativo da precipitação total para o período de 1931 a 1960, para a Bacia da Ribeira de Valadares .....	99
5.11	Cartografia altimétrica em formato de dados CAD, balizada à bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares .....	102
5.12	Representação tridimensional do modelo TIN da Ribeira de Valadares .....	103
5.13	Representação gráfica do processo de interpolação bilinear ao MDT. a) Obtenção da grelha; b) Interpolação num <i>pixel</i> da grelha, nas direcções x e y .....	104
5.14	Representação do modelo digital do terreno da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares na sua forma <i>raster</i> .....	105
5.15	Carta hipsométrica da bacia de Valadares .....	106
5.16	Curva hipsométrica da bacia de Valadares .....	107
5.17	Representação de duas possíveis zonas de acumulação de precipitação na bacia de Valadares .....	108
5.18	Carta de declives da bacia de Valadares .....	108
5.19	Representação do MDT da bacia da Ribeira de Valadares ausente de depressões altimétricas .....	111
5.20	Representação altimétrica das depressões do terreno encontradas para a bacia de Valadares .....	112
5.21	Ortofotomapa da bacia de Valadares. Representação das depressões do terreno encontradas .....	113
5.22	Grelha de direcção do escoamento para a bacia de Valadares .....	114

	<b>Título</b>	<b>Pág.</b>
5.23	Grelha de escoamento acumulado para a bacia de Valadares .....	115
5.24	Grelha da rede de drenagem para a bacia de Valadares .....	116
5.25	Grelha de individualização da rede de drenagem .....	117
5.26	Grelha de sub-bacias para a bacia de Valadares .....	118
5.27	Representação da rede de drenagem e respectivas subunidades hidrológicas, em formato vectorial, para a bacia de Valadares .....	118
5.28	Representação da rede de drenagem e respectivas subunidades hidrológicas, em formato vectorial, para a bacia de Valadares, e para uma área mínima de drenagem de 0,7 km <sup>2</sup> .....	119
5.29	Representação do polígono da bacia de Valadares, e respectiva rede de drenagem, gerado e obtido .....	120
5.30	Representação gráfica dos perfis longitudinais da rede hidrográfica da Bacia de Valadares, de acordo com as subunidades enumeradas na Figura 5.28 ...	123
5.31	Representação do esquema de conectividade entre os diferentes elementos hidrológicos que compõem a bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares .....	126
5.32	Representação da divisão das subunidades hidrológicas .....	128
5.33	Cartograma de ocupação do solo de cada um dos planos do modelo da onda cinemática para a bacia de Valadares .....	130
5.34	Representação do método de diferenças finitas no solucionar do modelo da onda cinemática .....	136
5.35	Carta digital da produtividade dos aquíferos em Portugal continental sobreposto pelo polígono da bacia da Ribeira de Valadares .....	141
5.36	Representação no programa HEC-HMS da estrutura hidrológica da bacia da Ribeira de Valadares .....	142
5.37	Representação da distribuição espacial da precipitação diária máxima anual para Portugal Continental .....	145
5.38	Hietograma de projecto para a bacia de Valadares, para um período de retorno de 100 anos, considerando três blocos alternados .....	147
5.39	Local de determinação dos valores de escoamento (foz da Ribeira de Valadares) .....	149
5.40	Representação dos percursos trilhados e dos pontos de recolha de informação geométrica dos canais .....	151
5.41	Representação gráfica do evento de precipitação registado a 2 Janeiro de 2008, respectivos valores de escoamento na foz da bacia de Valadares, observados e simulados, antes e após calibração .....	153
5.42	Representação gráfica da relação entre os valores de escoamento observados e simulados após calibração. Representação da equação resultante da regressão linear aplicada e respectivo coeficiente de correlação	154
5.43	Hidrogramas, e respectivos hietogramas, das diferentes subunidades hidrológicas individualizadas na bacia de Valadares, resultantes do evento de precipitação registado a 2 Janeiro de 2008 .....	156
5.44	Hidrogramas para as diferentes junções definidas para a bacia de Valadares, resultantes do evento de precipitação registado a 2 de Janeiro de 2008 .....	157
5.45	Hidrograma e hietograma de projecto, para um período de retorno de 100 anos, para as Junções nº 1, 2, 3 e Foz da bacia de Valadares .....	158

## Índice de Tabelas

Capítulo 3	Título	Pág.
3.1	Parâmetros da curva IDF para a Região do Porto (Serra do Pilar), para diferentes períodos de retorno .....	40
3.2	Valores medianos da intercepção pela copa como percentagem da precipitação total anual ou sazonal .....	45
3.3	Intercepção por diversas culturas tidas, pelo seu porte, como pertencentes ao estrato herbáceo .....	45
3.4	Classificação de solos, de acordo com o <i>Soil Conservation Service</i> (SCS), e respectiva taxa de perda .....	47
3.5	Propriedades hidrológicas dos solos consoante a respectiva textura .....	51
<b>Capítulo 5</b>		
5.1	Valor das áreas de intercepção da bacia de Valadares com as Freguesias do Concelho de VNG e respectivas fracções percentuais da sua área total .....	93
5.2	Valores das áreas de cada uma das classes litológicas compreendidas na bacia de Valadares e respectivas fracções percentuais da sua área total .....	94
5.3	Valores das áreas de cada uma das classes de ocupação do solo compreendidas na bacia de Valadares e respectivas fracções percentuais da sua área total .....	96
5.4	Representação sistemática da informação digital utilizada na caracterização da Bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares .....	100
5.5	Valores das áreas referentes a cada classe hipsométrica, seu valor de área acumulada e respectivas fracções percentuais da área total .....	106
5.6	Valor da área das sub-bacias de Valadares geradas e comprimento dos troços da respectiva rede de drenagem .....	120
5.7	Modelos hidrológicos constantes do programa HEC-HMS, respectiva classificação .....	125
5.8	Valores dos parâmetros integrantes do modelo da onda cinemática (excepto a rugosidade cinemática), na sua formulação para escoamento à superfície, para a bacia de Valadares .....	129
5.9	Valores definidos para a rugosidade cinemática para cada classe de uso do solo, em situação AMCII e AMCIII, e respectiva média ponderada para os planos das subunidades hidrológicas da bacia de Valadares .....	131
5.10	Valores dos parâmetros integrantes do modelo da onda cinemática, na sua formulação para escoamento em canal, para a bacia de Valadares .....	133
5.11	Valores definidos para o número de escoamento para cada classe de uso do solo, em situação AMCII e AMCIII, média ponderada para os planos das subunidades hidrológicas da bacia de Valadares, e respectivo valor da abstracção inicial .....	138
5.12	Valores médios do número de escoamento, comprimento da linha de água principal e declive da totalidade da bacia da Ribeira de Valadares .....	144
5.13	Curva IDF: Porto (Serra do Pilar) .....	144
5.14	Razão e valores de precipitação acumulada, de acordo com a curva IDF da Região do Porto (Serra do Pilar), para diferentes instantes, e para a bacia de Valadares .....	146
5.15	Processo de cálculo do método dos blocos alternados. Resultado da diferença entre os valores determinados para os instantes assinalados na Tabela 5.14, sua fracção percentual, e respectivo procedimento para disposição alternada ....	147

<b>Capítulo 5</b>	<b>Título</b>	<b>Pág.</b>
5.16	Valores determinados para o centro de massa do hietograma, escoamento de ponta, tempo de resposta, tempo de descida e os pontos relativos ao limiar do escoamento de base, para a bacia de Valadares, para o evento registado a 2 de Janeiro de 2008 .....	155

## **Conceitos e Abreviaturas**

AMC – *Antecedent Moisture Conditions*

BGRI – Base Geográfica de Referência de Informação

CAD – *Computer Aided Design*

CN – *Curve Number*

ESRI – *Environmental System Research Institute*

GUI – *Graphical User Interface*

HEC-GeoHMS – *Hydrologic Engineering Center – Geospatial Hydrologic Modelling Extension*

HEC-HMS – *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modelling System*

IGEO – Instituto Geográfico do Exército

IGP – Instituto Geográfico Português

INAG – Instituto Nacional da Água

MDT – Modelo Digital do Terreno

SCS – *Soil Conservation Service*

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

TIN – *Triangular Irregular Network*

USDA – *United States Department of Agriculture*

# **Capítulo 1**

## Introdução

O presente trabalho de investigação foi desenvolvido no âmbito de um projecto, a decorrer na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), de caracterização das ribeiras litorais entre a barrinha de Esmoriz e o Rio Minho.

Para a implementação do mencionado projecto foi necessário o desenvolvimento de diferentes metodologias com vista ao solucionar das suas diversas componentes. Sucintamente:

- Modelação Hidrológica e Hidráulica
- Modelação da Qualidade da Água
- Caracterização Ecológica

A estas diferentes perspectivas de análise de uma bacia hidrográfica assiste um tronco comum constituído pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG), onde, entre outras, se faz o armazenamento e gestão da informação recolhida e gerada.

O documento elaborado procura substanciar, do ponto de vista formal, a metodologia de modelação hidrológica empregue para o estudo do fenómeno de cheia. Nomeadamente, a sua vertente hidrológica e os respectivos interfaces com o SIG. Procurar-se-á ao longo do trabalho a aplicação de um conjunto de ferramentas capazes de descrever a situação hidrológica actual da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, Concelho de Vila Nova de Gaia. Os resultados obtidos por modelação serão contrapostos a dados observados em campo, afim de avaliar a representatividade de tal metodologia.

Esta dissertação procura, assim, uma legitimação da metodologia desenvolvida, mais concretamente na escolha e aplicação de modelos e *software* hidrológico, bem como as respectivas ancoragens ao SIG. Procurando, deste modo, responder a uma necessidade pragmática sentida no decurso do referido projecto que, por naturais contingências de tempo, não pode ser atendida.

## **Capítulo 2**

### Sistemas de Informação Geográfica

## 2.1 Introdução

Um Sistema de Informação Geográfica é desenhado para capturar, armazenar, visualizar, comunicar, transformar, analisar e arquivar informação georreferenciada, i.e., informação com uma localização espacial específica. Os SIG substituem o papel tradicionalmente desempenhado pela cartografia, sendo igualmente capazes de lidar com informação proveniente de imagens de satélite, bem como com dados provenientes de registos administrativos, desde que associados a uma localização espacial. Estes sistemas são cada vez mais utilizados em estudos de cariz científico como suporte a investigação baseada na obtenção de dados cruzados (Goodchild, 2005).

As origens dos sistemas de informação geográfica podem ser datadas de meados dos anos 60. Suportados por periféricos específicos, como digitalizadores de mapas, e com a crescente capacidade de processamento informático (à data ainda limitado), surgem os primeiros SIG. De entre estes, destaca-se o *CGIS (Canada Geographic Information System)* que surge como resposta a um problema de capacidade de processamento de dados de mapas, pelo *Canada Land Inventory*, nomeadamente: tendo por base uma grande quantidade de mapas criados para documentar os usos de solos do Canada, como gerar tabelas, de área de solo disponível para determinado fim. Esta tarefa é tradicionalmente morosa e inexacta quando desempenhada manualmente. Mas se a cartografia fosse digitalizada, simples algoritmos resolveriam a questão. Este primeiro SIG surge assim como resposta a uma necessidade bem definida.

Na década de 80, surgiram os primeiros SIG comerciais, oferecendo uma grande variedade de funções que seriam de outra forma demasiado complexas, imprecisas, ou dispendiosas para solucionar manualmente. Estas incluíam simples medidas de área e comprimento, transformação do formato de dados, análises estatísticas simples como o cálculo de médias e desvios padrão, e um conjunto mais complexo e sofisticado de métodos genericamente designados por análise espacial. Adicionalmente, estes SIG estavam equipados com capacidades avançadas de visualização da informação. A comunidade científica rapidamente reconheceu as potencialidades dos SIG e no início dos anos 90 estes emergem como ferramentas indispensáveis para investigação em qualquer ramo que envolva obtenção, manipulação ou produção de dados espaciais.

Em anos recentes os SIG sofreram transformações significativas, sobretudo pelo surgimento de aplicações que ultrapassam em muito a noção original de um assistente digital para o desempenho de tarefas meramente morosas e repetitivas. Com o advento da Internet ocorre, simultaneamente, um acréscimo muito significativo de todo um conjunto de informação digital disponível ao utilizador dos SIG, do profissional ao curioso. Neste novo contexto, os SIG e as suas potencialidades são vistos como uma forma privilegiada de trabalhar informação, assumindo destaque a análise espacial. Esta actualmente definida como um conjunto de métodos pelos quais um operador do SIG adiciona valor à informação, tornando visível algo que de outro modo não o seria para outro utilizador dessa mesma base de dados (Goodchild, 2005).

Mais recentemente, os SIG não se encontram, de todo, confinados ao uso em escritório, tendo passado a ser ferramentas de campo. Comunicação do tipo *wireless*, permitindo o descarregar e carregar de informação via Internet, em tempo real, e a autonomia dos dispositivos portáteis assegura qualquer operação em SIG. O advento do SIG de campo promete revolucionar a natureza e prática do trabalho realizado no campo, nas mais diversas ciências.

## 2.2 Representação

No cerne de um SIG está um sistema de representação, pelo qual características do mundo real são codificadas no alfabeto binário do computador digital. As representações em SIG incluem tipicamente 3 aspectos das características que procuram representar:

- sua localização espacial, recorrendo a um sistema de coordenadas conveniente;
- os seus atributos;
- as relações entre os dois itens acima mencionados.

As relações entre características são normalmente de carácter espacial, tais como relação de adjacência ou de conexão.

Os atributos e sua ligação aos elementos gráficos afiguram muita da riqueza e possibilidades de representação dos SIG. As soluções SIG, comercialmente disponíveis, integram sistemas de bases de dados alfanuméricos e sistemas de armazenamento e gestão de dados gráficos.

Os modelos de dados espaciais que são, usualmente, objecto de trabalho dos SIG podem ser agrupados em dois grandes grupos: os modelos vectoriais e os modelos *raster* (Aranof, 1989).

Os modelos de dados vectoriais integram informação gráfica organizada em pontos, linhas e polígonos, situados espacialmente por meio de coordenadas geográficas. Os modelos de dados do tipo *raster* ou quadrícula integram apenas informação gráfica estruturada em matrizes.

No caso do modelo vectorial, os objectos incluídos no modelo de dados não têm de cobrir toda a região representada mas, apenas, as respectivas localizações, podendo extensas áreas não estar referenciadas no modelo. Ainda neste modelo, às entidades geográficas identificadas é associada informação de natureza alfanumérica, geralmente organizada numa base de dados do tipo relacional, proporcionando aos utilizadores dos SIG a exploração integrada dos dados de natureza gráfica e estatística e/ou descritiva.

No caso dos modelos *raster* ou de quadrícula, cada tema ou entidade tem como forma de representação a totalidade do espaço modelado, que está dividido em quadrícula, podendo os valores associados a cada elemento variar consoante as condições que se verificarem no interior de cada uma das respectivas células em relação ao tema ou entidade representada. A cada tema distinto corresponderá uma matriz diferente.

### 2.2.1 Modelos de Dados Vectoriais

Os SIG foram concebidos de modo a proporcionar ao utilizador a integração de informação georreferenciada de natureza multi-sectorial num único sistema informático permitindo, não só, a inquirição (a partir da localização ou dos atributos associados, às entidades gráficas armazenadas) e o acesso interactivo aos dados como, ainda, a criação de nova informação (resultante de operações de cruzamento de dados multi-sectoriais e de análise espacial) em resposta às necessidades específicas dos utilizadores.

Os SIG e os CAD (*Computer Aided Design*) têm na sua génese objectivos distintos, embora os primeiros também disponham de funcionalidades típicas de desenho automático, e estas tenham vindo a ser desenvolvidas, seja para a conversão de escalas e produção de cartas, seja para a introdução e edição de informação gráfica.

Hoje em dia existe uma tendência de convergência destes dois tipos de software. Assim, os tradicionais sistemas de dados CAD, em que pontos, linhas e polígonos são organizados por conjuntos sequenciais de pontos coordenados, sem registo possível das relações espaciais que se verifiquem entre os diversos objectos representados são, nas suas versões mais actuais, dotados de modelos de dados topológicos, comuns nos SIG no tratamento de dados vectoriais, existindo uma estrutura interna de informação gráfica que assegura automaticamente o registo das relações espaciais referidas (Henriques, 1996).

A operação de estruturação de dados gráficos num SIG, designada por atribuição de topologia, consiste na definição das relações entre entidades básicas (arco, nó e polígono) que constituem uma carta ou um tema de uma carta estruturada em base vectorial, com a consequente criação (automática) das tabelas que estabelecem essas mesmas relações espaciais, bem como das tabelas de conversão entre os arcos e nós e as coordenadas geográficas dos pontos que os definem.

Algumas das operações de análise espacial que se desenvolvem com os SIG são executadas em condições de grande eficácia, recorrendo às relações entre dados contidos nas tabelas que definem a topologia da informação armazenada.

Na constituição da generalidade dos SIG hoje disponíveis no mercado, os dados gráficos topologicamente estruturados são organizados por camadas ou *layers*, em que cada camada corresponde a um determinado tema de informação da carta original. São exemplos de *layers* vectoriais de informação: a altimetria, a rede hidrográfica, o coberto florestal, a divisão administrativa e outros.

Associada aos dados gráficos está uma base de dados do tipo relacional que permite que a inquirição e a manipulação dos dados possa ser feita, não só, com base na localização espacial dos objectos definidos como unidades espaciais mas, também, com base nos atributos associados a esses objectos.

Os SIG estão, ainda, dotados de funções analíticas próprias que permitem, por exemplo, realizar operações de sobreposição de cartas temáticas diversas referentes a uma determinada região, facultando simultaneamente aos utilizadores diversos operadores de cálculo aritmético e lógico para a manipulação integrada dos dados. Dispõem de linguagens de programação para a realização de operações mais complexas que incluem, designadamente, a possibilidade de construção de aplicações dirigidas a objectivos específicos (Djokic e Miller, 1997).

Acresce o facto de no tratamento de dados vectoriais as formas de saída de resultados obtidos através da exploração dos SIG não estarem geralmente condicionadas pelos critérios de representação gráfica e simbólica da cartografia tradicional, cabendo ao utilizador a escolha da forma de representação mais sugestiva para o fim em causa.

### 2.2.2 Modelos de Dados Raster

Os modelos de dados do tipo raster baseiam-se na organização matricial da informação, i.e., a cada variável ou tema de uma carta corresponde uma matriz. Cada elemento da matriz (célula) é referenciado pelas coordenadas (linha e coluna) correspondentes à respectiva localização no interior da matriz, e tem associado o valor do atributo da variável ou tema representado.

À dimensão da célula (medida do terreno), ou unidade elementar, que constitui a matriz, corresponde a resolução espacial com que determinado tema se encontra representado. A orientação da matriz é dada pelo ângulo definido pela direcção das colunas do reticulado e o Norte (Goodchild, 2005).

A estrutura de dados *raster* torna-os particularmente adequados para a integração de informação obtida por detecção remota, de que são exemplos as imagens provenientes de sistemas de observação instalados em satélites, ou de fotografias aéreas previamente convertidas para formato digital. Esta estrutura revela-se igualmente eficiente na representação simplificada de diversas temáticas caracterizadoras da fisiografia, da ocupação humana e das actividades que se desenvolvem em determinada região ou, ainda, em trabalhos de modelação matemática de fenómenos espacialmente distribuídos. Nestes casos de aplicação exploram-se as vantagens da simplificação inerentes à estrutura matricial da informação.

Este tipo organizacional de dados SIG inclui, também, através do padrão da quadrícula, e do respectivo sistema de numeração dos seus elementos, a topologia.

Os *softwares* SIG actuais dispõem de módulos para a conversão automática do formato *raster* de informação em formato vectorial, permitindo, assim, a exploração e conversão da informação disponibilizada por qualquer entidade produtora de cartografia temática. Esta geralmente em formato de dados CAD.

Quer no caso dos modelos de dados do tipo *raster*, quer no caso dos modelos vectoriais importa referir que os SIG estão munidos de linguagens de programação próprias, permitindo o

desenvolvimento de módulos específicos para o tratamento de temas. Estes módulos podem, inclusivamente, ser produzidos por um qualquer utilizador, bastando para tal o domínio das referidas linguagens. Diversas entidades internacionais produzem estes módulos, usualmente referidos como extensões, uma vez que expandem as funcionalidades disponíveis de base.

## 2.3 Georreferenciação

Um sistema de localização espacial é uma componente essencial de qualquer representação num SIG. As convenções mais recentes estabelecem a latitude e a longitude como o standard universal para georreferenciação, baseando-se em medidas do Meridiano de Greenwich e do Equador. No entanto, a Terra não é uma esfera perfeita, e tem ao longo dos tempos sido aproximada por uma variedade de funções matemáticas para diferentes partes do globo, conduzindo cada uma destas a ligeiras diferenças de latitude e longitude (Paulo, 1998).

Os elipsóides de revolução utilizados em Portugal para representar a forma e dimensões da Terra, aqueles que menor distorção local apresentam nessa aproximação, são os de Bessel, WGS84 e sobretudo o elipsóide de Hayford (ou Internacional). Um elipsóide posicionado em relação à Terra recebe o nome de *datum*. A forma, dimensões e posição do centro do elipsóide relativamente ao centro de massa da Terra são determinados para que a superfície do elipsóide se adapte o melhor possível à superfície terrestre num determinado país ou região. Os *data* locais mais utilizados em Portugal são o *datum* Lisboa e o *datum* 73. O *datum* Lisboa é mais antigo e a sua origem situa-se no Castelo de S.Jorge, em Lisboa. O *datum* 73 utiliza como origem um ponto mais central, o vértice de Melriça. Ambos os *data* utilizam o elipsóide Hayford. Os programas de SIG actuais tornam possível a pronta conversão de um *datum* para outro, podendo, no entanto, ocorrer variações da ordem dos 200m entre determinações, decorrente da aproximação matemática envolvida na transformação.

Complementarmente, a georreferenciação faz frequentemente uso de métodos de projecção da superfície curva da Terra para planos, associando a estes sistemas de coordenadas planares. Estes sistemas incluem o *Universal Transverse Mercator* (UTM), o standard da NATO, frequentemente utilizado pelas diversas agências cartográficas nacionais. O UTM consiste de 60 projecções distintas e respectivos sistemas de coordenadas. A projecção, geralmente, utilizada para os *data* Nacionais mencionados anteriormente é a de Gauss-Krüger.

O aplanar da superfície terrestre foi fundamental na era em que a tecnologia digital ainda não estava disponível, sendo que nos dias de hoje o uso de projecções é um tanto paradoxal, uma vez que nada num computador digital requer este procedimento. No entanto, a maioria das aplicações científicas dos SIG são conduzidas em áreas de reduzida dimensão, onde a distorção introduzida por esse aplanar é reduzida, e onde os benefícios de trabalhar num sistema de coordenadas rectangulares são apelativos. A simples medição de área ou de distância é complexa quando realizada a partir da latitude e longitude, por oposição à utilização de coordenadas planares expressas em metros.

## 2.4 Visualização

Os Sistemas de Informação Geográfica são inerentemente uma tecnologia visual, convidando os seus utilizadores a tirar partido do poder e eficácia da informação quando devidamente trabalhada visualmente. Os mapas são as formas tradicionais de visualização da informação geográfica, ficando a evolução dos SIG a dever-se ao legado da cartografia e aos esforços dos cartógrafos em sistematizar a disciplina (Goodchild, 2005). Os SIG actuais dispõem de vastos conjuntos de bibliotecas de símbolos, células e padrões próprios da visualização geográfica tradicional destinados à reprodução automática da carta de acordo com os critérios utilizados no desenho cartográfico (Paulo, 1998).

É no entanto relevante estabelecer as diferenças fundamentais entre a visualização digital permitida por um SIG e os tradicionais mapas. Os SIG transformaram a produção de cartografia num processo sem grandes custos associados e disponível a qualquer interessado, ao invés da forma tradicional bastante morosa, dispendiosa e envolvendo o trabalho de técnicos altamente especializados. Por outro lado, as visualizações em SIG são intrinsecamente dinâmicas e interactivas, enquanto as representações em papel são essencialmente estáticas após a sua geração. O conceito de análise espacial da informação é criado para descrever a exploração interactiva da informação contida num SIG através das suas diversas formas de representação (Goodchild, 2005).

## 2.5 Análise Espacial

Embora a apresentação da informação geográfica na forma de mapas possa ser um instrumento valioso, a verdadeira relevância dos SIG reside na sua capacidade de análise, quer indutivamente na procura de padrões ou anomalias, ou dedutivamente na tentativa de confirmar ou rejeitar hipóteses. As técnicas de análise disponíveis nos SIG designam-se genericamente por análise espacial, reflectindo a importância da localização. Mais precisamente, a análise espacial pode ser definida como um conjunto de técnicas cujos resultados dependem da localização dos objectos em estudo. Assim, os SIG podem ser entendidos como uma tecnologia que implementa métodos de análise espacial, tal como *software* estatístico implementa métodos de análise estatística, ou processadores de texto implementam o processo de escrita.

As capacidades dos SIG no domínio da análise espacial estão associadas a operadores que recorrem aos aspectos topológicos e espaciais dos dados geográficos, bem como aos atributos espaciais ou não espaciais que estão associados às unidades ou entidades gráficas armazenadas no sistema (Aranoff, 1989).

Verifica-se que o estabelecimento de uma relação topológica entre as entidades que constituem os dados introduzidos é fundamental à exploração da informação de natureza gráfica. Entre as funções mais simples de gestão espacial da informação conta-se a função de inquirição e simultânea visualização dos dados armazenados (*query*), esta localização pode ser realizada com base em atributos gráficos ou alfanuméricos.

Segundo Henriques, 1996, as operações de análise espacial dos SIG podem ser agrupadas em quatro tipos:

- Reclassificação do conteúdo de cartas
- Operações de geoprocessamento
- Medição de distâncias
- Análise de vizinhança

A reclassificação do conteúdo de cartas é uma operação que actua sobre uma única *layer* cujo conteúdo é alterado, resultando da operação uma nova *layer* na qual o valor temático associado às unidades originalmente representadas foi alterado. É exemplo desta operação, algo de tão simples como a redistribuição das cores associadas a elementos espaciais com diferentes valores (alfanuméricos) temáticos. No caso dos dados de trabalho se encontrarem em formato vectorial, esta operação pode implicar a dissolução dos limites de, por exemplo, polígonos contíguos, levando necessariamente à reconstrução da topologia.

Uma operação de reclassificação vulgarmente utilizada nos SIG diz respeito à transformação de dados que originalmente apresentam uma distribuição contínua, em dados agrupados por classes, i.e., segundo uma distribuição discreta.

A reclassificação de cartas pode ser baseada, não só, no valor temático da entidade representada como também em propriedades como sejam a localização, a dimensão (área, perímetro, volume) ou a forma, entre outros.

Esta operação pode envolver, de igual modo, a alteração dos valores quantitativos originalmente associados às entidades representadas através de operações aritméticas a aplicar sobre os valores originais (Henriques, 1996).

As operações de geo-processamento de cartas consistem na obtenção de uma nova carta cujo conteúdo foi obtido por sobreposição do conteúdo de duas ou mais *layers*. Na nova carta gerada, a cada ponto ou polígono vai estar associado um valor temático resultante de uma função em que as variáveis independentes se exprimem nos valores temáticos de cada ponto ou polígono correspondente em cada uma das *layers* sobrepostas. As funções citadas incluem, na generalidade dos SIG, todas as operações aritméticas básicas, bem como outras de maior complexidade, envolvendo a avaliação de parâmetros estatísticos (Berry, 1993).

Um ponto relevante, do ponto de vista do operador, diz respeito à aplicação deste tipo de operações quando, por razões tidas com a origem da informação, os limites das mesmas entidades geográficas, em cartas temáticas diferentes, não se sobrepõem. Se tal situação não for corrigida antes da operação de sobreposição irão surgir diversos polígonos de dimensão quase imperceptível que, em

lugar de corresponderem às áreas que cumprem os requisitos estabelecidos, representam apenas áreas geradas entre cada duas linhas que supostamente seriam coincidentes.

No que refere a medição de distâncias, tal como nos sistemas CAD, os SIG dispõem, também, de operadores especificamente vocacionados para o cálculo das mesmas. Possuem, ainda neste âmbito, a funcionalidade de mapeamento automático de zonas de influência de pontos, linhas ou áreas, genericamente designadas como *buffers* (zonas tampão).

As relações de conectividade entre entidades gráficas são determinantes no funcionamento das funções designadas por “medição de distância”, sendo estas definidas aquando da criação da topologia dos dados. Estas relações, por exemplo, se aplicadas a uma matriz gráfica (dados *raster*) permitem o mapeamento da área de visibilidade associada a um ponto de observação (Berry, 1993).

Existe, finalmente, um grupo de funções que permite gerar novas cartas em que os valores temáticos de cada entidade são a função dos valores temáticos que caracterizam a respectiva vizinhança. São, genericamente, referidos como operadores de vizinhança. Estes são utilizados em operações de filtragem, usadas para acentuar ou esbater contrastes temáticos entre entidades vizinhas. No caso dos modelos *raster* de dados estas operações consistem de “janelas” (tipo quatro células) que percorrem toda a matriz, gerando uma nova matriz em que o valor de cada *pixel* (célula) será função dos seus valores vizinhos aquando da análise. Um exemplo de cálculo em que se aplique um operador similar ao descrito, será o da determinação do declive ou orientações do terreno com base em modelos digitais do terreno (MDT).

## 2.6 Considerações Finais

Como ressalta do exposto neste capítulo, o uso dos SIG levanta inúmeras questões relativas à natureza da informação geográfica e inferências feitas por cruzamento dessa mesma informação. Embora os SIG tenham evoluído da perspectiva estática inerente aos mapas em papel, existe todo o interesse em acrescentar dinâmica ao tratamento da informação, mais ainda em desenvolver métodos espaço-temporais de análise.

Segundo Goodchild, 2005, os resultados da ampla adopção dos SIG no contexto científico das passadas duas décadas são impressionantes. É hoje claro que os SIG trouxeram um novo alcance à análise cruzada de informação, bem como à integração de informação da mais diversa origem. Reformaram também, em certa extensão, o limiar de algumas ciências, permitindo dar ênfase a informação de cariz local, sua variação geográfica e analisar dados altamente desagregados.

## **Capítulo 3**

### Modelação Hidrológica

### 3.1 Introdução

Um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do escoamento de água, e seus constituintes, sobre uma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre. Existe uma estreita relação entre as modelações hidrológica, química e ecológica, uma vez que esse mesmo escoamento será o veículo de todo e qualquer constituinte que exista, potencialmente, na bacia hidrográfica. Além disto, a hidrologia está profundamente ligada com as condições climáticas, troposféricas e biosféricas, e, como tal, modelos hidrológicos, atmosféricos e de outra natureza deveriam estar acoplados, sendo que, na prática, esta ligação se torna bastante difícil, uma vez que, nomeadamente, os modelos atmosféricos trabalham com resoluções espaciais muito maiores que as utilizadas na modelação hidrológica (Maidment, 1993).

A bacia hidrográfica é o objecto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos, reunindo as superfícies que captam e conduzem a água para uma rede de escoamento, constituída por um ou mais canais, desembocando estes numa única secção terminal.

Para que melhor se entendam os modelos hidrológicos, é necessário analisar as componentes envolvidas no ciclo hidrológico. Muito embora não se possa considerar um princípio ou um fim para o ciclo hidrológico, tomando a atmosfera como ponto de partida, verifica-se que nesta se acumula vapor de água que, em determinadas condições, origina precipitação: chuva, granizo, neve, orvalho e geada. Um fracção da precipitação é evaporada durante a queda, voltando à atmosfera. Outra fracção é, ainda, interceptada pelas folhas das plantas e estruturas urbanizadas, sendo evaporada e voltando, também, à atmosfera. A restante parte atinge a superfície da terra.

Uma parte da precipitação que atinge a superfície da terra fica retida nela, dando origem à evaporação e ao escoamento superficial, na rede hidrográfica, de onde é também evaporada ou atinge o oceano que constitui a maior fonte de evaporação. Outra parte da precipitação que atinge a superfície dá origem à infiltração, humedecendo o solo que é também fonte de evaporação, alimentando as plantas, através das quais volta à atmosfera por transpiração, ou alimentando os cursos de água ou directamente os oceanos, de onde será evaporada, fechando-se o ciclo (Lencastre e Franco, 1984). A Figura 3.1 ilustra ao nível de uma bacia hidrográfica o exposto.

A hidrologia terrestre abrange assim o estudo da quantidade, distribuição e propriedades das águas nas terras emersas, e das suas relações com o ambiente. A principal entrada de água no sistema é a precipitação.

Nos sub-capítulos que se seguem cada uma das componentes discretizadas será objecto de aprofundamento do ponto de vista da sua modelação.

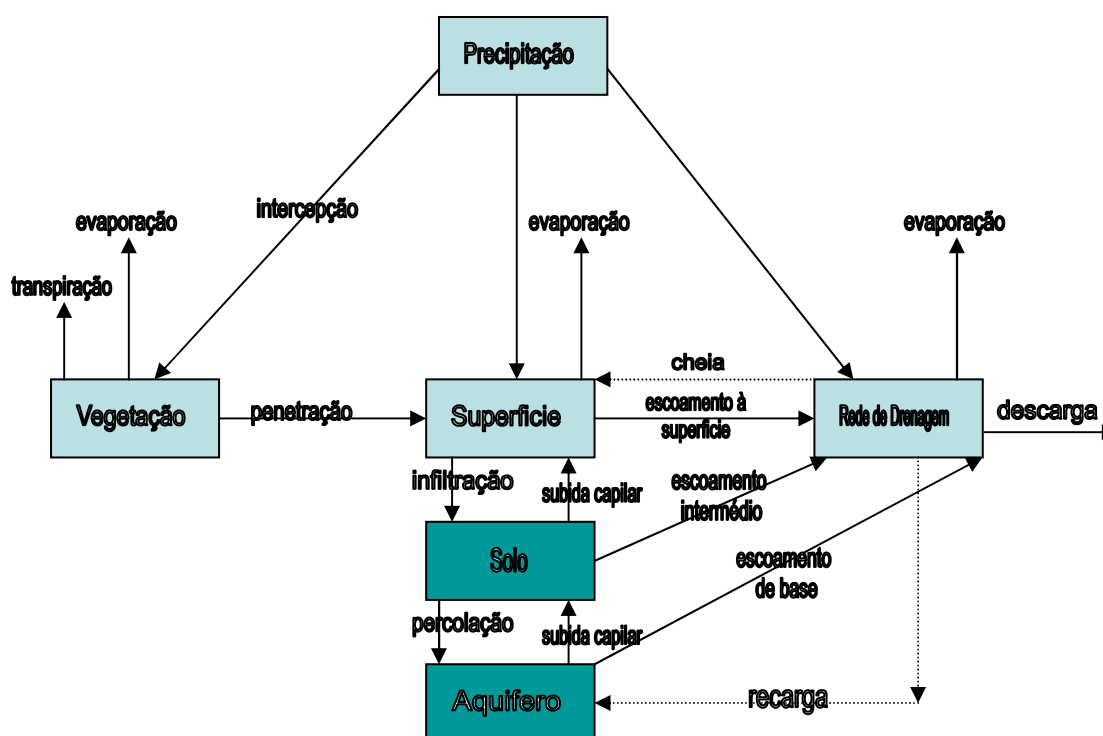


Figura 3.1 – Diagrama de fluxo numa bacia hidrográfica. (HEC, 2000 b)

## 3.2 Breves Considerações sobre Modelação

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando na compreensão dos processos que envolvem essa mesma realidade. O recurso à modelação, e necessariamente aos modelos que a compõem, é cada vez mais uma ferramenta de trabalho em planeamento ambiental, permitindo fazer a análise não só da situação presente ou passada, como também elaborar e analisar cenários de situações futuras.

Os processos ambientais são geralmente bastante complexos. Tal complexidade pode incluir comportamentos não lineares e componentes estocásticos sobre diferentes escalas de tempo e espaço. Mesmo existindo uma compreensão qualitativa de um dado processo, o seu entendimento quantitativo pode ser limitado. A possibilidade de expressar os processos físicos como um conjunto de equações matemáticas detalhadas pode não estar disponível, ou as expressões numéricas em questão podem ser muito complexas, exigindo simplificações para o seu uso (Maidment, 1993).

Além do exposto, limitações computacionais ou a maneira pela qual as equações matemáticas são convertidas em processos numéricos discretos, levam à parametrização de processos complexos em escalas muito detalhadas que podem não ser explicitamente representadas no modelo. Em alguns casos, o conjunto de equações pode ser visto como uma colecção de hipóteses que conectam entradas e saídas do sistema. Esse conjunto de equações, quando parametrizadas, representa a

melhor aproximação do modelador no explicar de determinado processo. É importante reconhecer que um modelo ambiental é, no melhor dos casos, apenas uma representação dos processos reais (Maidment, 1993). Um mesmo processo pode ser representado de diferentes maneiras, sendo algumas mais apropriadas para determinados casos. Não existe um modelo único que seja o melhor mas sim aquele que melhor descreve um fenómeno.

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

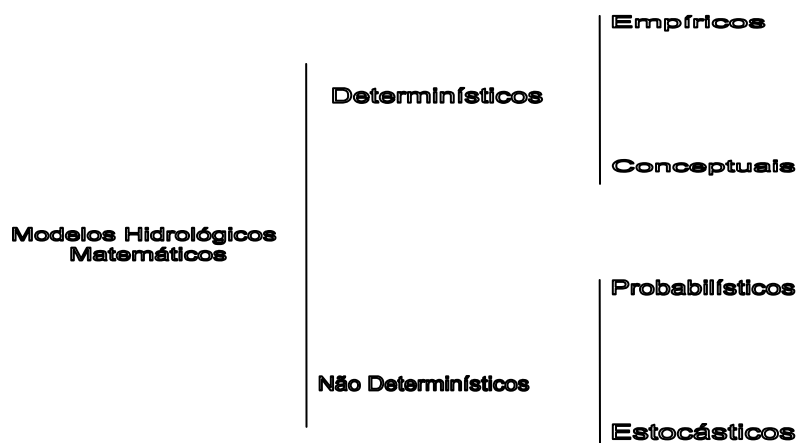
Os parâmetros são medidas numéricas de propriedades reais e complexas. Controlam a relação entre o que entra e o que sai do sistema. Os valores atribuídos aos parâmetros podem ser vistos como dispositivos de afinação do modelo, sendo através da manipulação destes valores que se torna possível a calibração. Tais valores são ajustados para que o modelo possa, com maior precisão e exactidão, prever a resposta física do sistema. Os parâmetros de determinado modelo podem, ou não, ter significado físico. Caso não tenham só é possível estimar o seu valor por meio de calibração.

Num modelo, distinguem-se três tipos de variáveis. A primeira, chamada variável de estado, é o foco de estudo do modelo. Esta variável relaciona-se geralmente com uma equação diferencial. O estado do sistema pode ser descrito apenas por verificação desta variável. Como exemplo, na modelação do balanço de água no solo, uma variável de estado pode ser o conteúdo de água no solo. O segundo tipo de variável é a de processo, também chamada de variável de fluxo, representando as entradas e saídas das variáveis de estado. Tipicamente, os fluxos são calculados como função das variáveis de estado. Também os parâmetros podem ser utilizados no cálculo de fluxos. Novamente, a taxa de infiltração pode ser considerada uma variável de processo que altera o conteúdo de água no solo (variável de estado). O terceiro, e último tipo, refere-se ao conjunto de variáveis ditas de condição fronteira. Este conjunto de variáveis é usado no modelo mas não é calculado por ele, tendo a sua variação de ser traduzida para que possa ser incorporada. Regra geral, este tipo de variável representa um fluxo externo ao modelo que o alimenta ou esgota. A chuva, no exemplo seguido, traduz uma condição fronteira do sistema.

A importância de se identificar cada tipo de variável presente num modelo reside no facto de esta definição influenciar a escolha da estrutura de dados para a sua implementação. O valor das variáveis de estado deve ser armazenado a cada iteração caso se deseje fazer o acompanhamento do estado do sistema ao longo do intervalo de modelação. Por outro lado, os fluxos, que são recalculados a cada instante, não necessitam que o seu histórico seja armazenado (Maidment, 1993).

### 3.3 Classificação dos Modelos Hidrológicos

Uma possível classificação para os modelos hidrológicos é apresentada na figura 3.2 (Quintela e Portela, 2000).



**Figura 3.2** – Classificação de modelos hidrológicos (Extraído de Quintela e Portela, 2000).

Os modelos determinísticos caracterizam-se pelo facto de uma dada acção implicar uma mesma resposta. Se tal resposta é aleatória, pelo menos em parte, o modelo é necessariamente um modelo não determinístico.

Segundo Quintela e Portela, 2000, os modelos não determinísticos podem ser considerados divididos em dois grupos: probabilísticos, quando as variáveis intervenientes têm um comportamento puramente aleatório e é, portanto, ignorada a sequência temporal ou a sequência espacial dos valores dessas variáveis, e estocásticos, quando para além da componente aleatória, têm uma outra, determinística, que permite contemplar a sequência temporal ou espacial dos valores das variáveis.

A anterior distinção é muito frequentemente adoptada em Hidrologia, devendo, porém, notar-se que alguns autores nesta ciência, e em algumas outras, incluem os modelos probabilísticos no âmbito geral dos modelos estocásticos.

Os modelos determinísticos podem ser empíricos, se a análise dos processos hidrológicos em jogo se reduz à procura de uma relação causa – efeito entre variáveis de entrada (*inputs*) e variáveis de saída (*outputs*), ou fisicamente baseados, se procuram reproduzir as leis físicas que regem os fenómenos, sendo estes muitas vezes designados de conceptuais. O estabelecimento de um modelo conceptual pressupõe conhecimentos base dos processos físicos pertinentes na transformação dos dados em resultados. Um modelo empírico, por seu lado, não procura representar explicitamente estes processos de conversão.

Esta distinção é crítica na selecção de um modelo no que respeita à disponibilidade de valores observados, sejam eles dados de carregamento do modelo, ou resultados observados. Um modelo

baseado em parâmetros mensuráveis assenta na determinação de propriedades do sistema, quer por métodos de medição directa, quer indirecta. Por outro lado, um modelo onde os parâmetros são iterados, implica, como indica a designação, o ajuste dos valores paramétricos de modo a que respostas observadas sejam verificadas (HEC, 2000 b).

Os modelos fisicamente baseados podem subdividir-se em agregados ou em distribuídos consoante as variáveis hidrológicas integradas na formulação exprimam valores médios no espaço ou valores em pontos desse espaço, os quais dependem da localização dos referidos pontos. Os modelos distribuídos, mais realistas, consideram a existência de relação espacial entre elementos vizinhos, sendo assim a topologia levada em conta.

No caso dos modelos determinísticos é ainda possível estabelecer a distinção entre modelos de resposta a eventos, onde se procura a simulação de um evento de precipitação e respectiva resposta da bacia hidrográfica, e modelos contínuos, onde se procura simular a resposta da bacia hidrográfica tanto em face da ocorrência de precipitação, como na sua ausência. Esta definição é passível de ser feita quer se tratem de modelos empíricos ou conceptuais. Ou seja, a questão de se um modelo é agregado ou distribuído é uma questão espacial. Se este mesmo modelo é contínuo ou de evento prende-se com uma dimensão temporal.

Os modelos determinísticos são usualmente utilizados na análise de cheias, na simulação de escoamentos fluviais e na modelação de segmentos limitados do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas.

A escolha de um determinado tipo de modelo deve ser feita com base na aplicação que se deseja e na disponibilidade de dados base. O uso de modelos hidrológicos conceptuais e distribuídos baseia-se no argumento de que estes representam de uma forma mais coerente os processos físicos que ocorrem numa bacia hidrográfica, sendo tidos como inerentemente superiores a modelos empíricos e agregados. No entanto, estes modelos requerem necessariamente uma quantidade bastante extensa e detalhada de informação para que a sua parametrização seja aceitável. Segundo Maidment e Djokic, 2000, este tipo de modelo é mais apropriado à exploração das interacções entre os processos e simular os efeitos de futuras mudanças no uso do solo, do que a fazer predições hidrológicas.

Sumariamente, muitos modelos fisicamente baseados não explicam as simplificações utilizadas na solução das equações do próprio modelo, e nem tão-pouco discutem os problemas inerentes à calibração de parâmetros. As equações físicas destes modelos são geralmente definidas para condições homogéneas e bem controladas, a sua generalização não observa a heterogeneidade natural dos elementos envolvidos na modelação. Este conjunto de factores torna-os não muito adequados à modelação de situações extremas, como a análise de cheias, mas particularmente apropriados à simulação de escoamentos fluviais, sendo que neste caso o modelo além de conceptual e distribuído terá necessariamente de ser contínuo.

### 3.4 Aplicação da Modelação Hidrológica à Análise de Cheias

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

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

Do ponto de vista hidrológico, verifica-se a ocorrência de uma cheia quando a bacia hidrográfica é alimentada por água de um modo intenso e prolongado tal que o caudal que daí advém e que aflui à rede hidrográfica excede a capacidade normal de transporte ao longo daquela rede, transbordando as margens naturais ou artificiais e alagando as zonas contíguas.

As cheias podem ser consequência de causas artificiais ou naturais, isoladas ou combinadas. De entre as cheias naturais, merecem especial referência bibliográfica as cheias repentinas (*flash floods*) caracterizadas pelo curto intervalo que decorre entre o acontecimento pluvioso e a cheia que o mesmo origina. Consideram-se sujeitas a cheias repentinas as bacias hidrográficas a que correspondem tempos de concentração até seis horas (Portela, 2000). As cheias repentinas assumem particular importância se afectam zonas urbanas ou edificadas, devido à rapidez com que o fenómeno ocorre e aos elevados caudais de ponta que lhe correspondem.

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

#### 3.4.1 Componentes de um Hidrograma

De um modo geral, o caudal que atravessa a secção transversal de um curso de água na sequência de um dado evento de precipitação intenso não provém, na totalidade, da precipitação que atingiu a bacia hidrográfica. Ao analisar-se um hidrograma num curso de água natural podem ser consideradas duas seguintes componentes principais do escoamento:

- Escoamento de Base
- Escoamento Directo

Considere-se a ocorrência de uma precipitação significativa após um intervalo de tempo sem chuva, de modo a que já não exista água em trânsito sobre o terreno e na rede hidrográfica decorrente

de chuvadas anteriores. Aquando do início do evento, o nível da superfície livre numa secção do curso de água encontra-se a uma dada cota (correspondente a um determinado caudal) decorrendo algum tempo até que tal nível se eleve, em consequência do aumento do caudal escoado. O facto de não ocorrer elevação do nível da superfície livre durante esse período inicial significa que a precipitação caída sobre a bacia hidrográfica não está a contribuir para o aumento do caudal que se escoou na secção considerada do curso de água, fundamentalmente, ao ser interceptada por obstáculos (vegetação e outros), ficando armazenada nas depressões e irregularidades da superfície e por se infiltrar no solo, aumentando o teor de humidade deste último (Figura 3.1).

O intervalo de tempo que decorre entre o instante em que se inicia a precipitação e em que o nível da superfície no curso de água começa a subir depende, entre outros factores, como geológicos, topográficos e de coberto vegetal, do défice de humidade na bacia hidrográfica em relação às condições de saturação, i.e., do estado da bacia hidrográfica, anteriormente à ocorrência da chuvada – condições antecedentes de humidade e de armazenamento de água na bacia – e da própria intensidade de precipitação (Portela *et al.*, 2000 b). Admite-se que aquele défice seja tanto menor quanto maior for a excepcionalidade do acontecimento pluvioso, uma vez que, normalmente, eventos pluviosos excepcionais são antecedidos por períodos, mais ou menos prolongados, de elevada precipitação.

A contribuição da precipitação para o aumento de caudal escoado no curso de água inicia-se quando o défice de humidade na bacia hidrográfica se anula, ou seja, quando a camada de solo imediatamente junto à superfície fica saturada.

Nas condições pressupostas de ocorrência de precipitação (intervalo de tempo prévio significativo sem chuva), o caudal que, antecedendo aquela precipitação, se escoou no curso de água representa o escoamento de base e o acréscimo de caudal que se verifica no curso de água como resultado da precipitação útil, o escoamento directo.

Numa bacia hidrográfica não intervencionada (sem reservatórios) o escoamento de base resulta da contribuição para o hidrograma observado das reservas subterrâneas. O escoamento de base, provém, nesse caso, do esgotamento das reservas subterrâneas, dependendo do armazenamento disponível nestas reservas que, por sua vez, depende das condições antecedentes de ocorrência de precipitação e das características morfológicas, fisiográficas e geológicas da bacia hidrográfica (Lencastre e Franco, 1984).

Numa análise mais pormenorizada, para além destes dois escoamentos principais, poderão ainda considerar-se as seguintes componentes do hidrograma:

- Escoamento Intermédio
- Escoamento resultante da precipitação sobre a rede hidrográfica

O escoamento intermédio resulta da fracção da precipitação que se infiltra, mas que se escoou a pouca profundidade no terreno, devido à existência de substratos impermeáveis mais profundos, ou de um sistema de drenagem artificial enterrado, e que chega aos cursos de água apenas com um ligeiro atraso em relação ao escoamento directo, terminando pouco depois da cessação deste último.

O escoamento resultante da precipitação sobre a rede hidrográfica varia em importância conforme a densidade desta e também, ligeiramente, com o prosseguimento da precipitação total, visto que à subida de níveis nas linhas de água corresponde geralmente um aumento da área da superfície de água.

Na Figura 3.3 estão representadas as componentes do hidrograma, bem como, genericamente, a sua forma mais usual.

Salienta-se que a contribuição do escoamento de base para o hidrograma de cheia observado, aquando da ocorrência de eventos de pluviosidade excepcionais, é pouco significativa, embora passe a representar a totalidade do escoamento observado após períodos relativamente longos de ausência de precipitação (Lencastre e Franco, 1984).

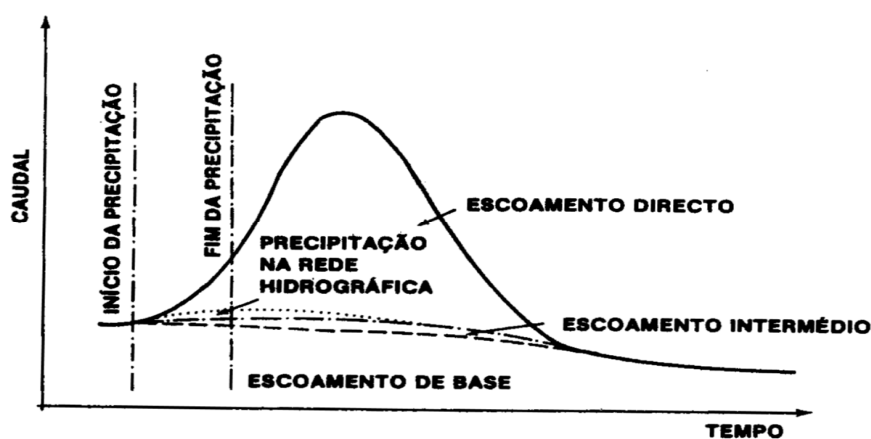


Figura 3.3 – Componentes de um hidrograma (Extraído de Lencastre e Franco, 1984).

Em face de um hidrograma é necessário proceder à separação dos escoamentos directo e de base, ou seja, à identificação das parcelas representativas daqueles escoamentos, tendo em vista o estimar de parâmetros do modelo de análise. Com esta caracterização abordam-se, também, os modelos utilizados para previsão do escoamento de base. A modelação do escoamento directo, dada a sua maior complexidade e prévia integração de todas as componentes envolvidas no escoamento superficial, será objecto de análise posterior.

### 3.4.2 Forma do Hidrograma e Factores Condicionantes

Um hidrograma tipo, registado após a uma chuvada isolada ocorrida na respectiva bacia hidrográfica, tem geralmente a forma de uma campânula assimétrica, onde podem ser consideradas quatro partes distintas (Lencastre e Franco, 1984):

- Curva de Crescimento, corresponde ao aumento de caudal motivado pelo incremento do escoamento, e que ocorre durante o tempo de crescimento ou tempo para a ponta,  $t_p$ .
- Ponta do Hidrograma, i.e., o respectivo valor máximo do escoamento.
- Curva de Decrescimento, corresponde à diminuição progressiva do escoamento directo, e que ocorre durante o tempo de decrescimento,  $t_d$ . A soma dos tempos de crescimento e decrescimento corresponde ao tempo base do hidrograma,  $t_b$ .
- Curva de Esgotamento, corresponde ao decréscimo exponencial do escoamento base, depois de terem cessado as contribuições das restantes componentes do escoamento superficial.

Algumas das definições a que importa atender na interpretação deste mesmo hidrograma, e porque são alvo de caracterização por parte de alguns modelos das diferentes componentes do escoamento superficial, são seguidamente apresentadas:

- Tempo de Resposta da bacia hidrográfica (*lag*),  $t_r$ , corresponde ao intervalo de tempo definido pelos instantes correspondentes ao centro de gravidade da precipitação útil e à ponta do hidrograma.
- Tempo de Precipitação Útil,  $t_r$ , tempo durante o qual ocorre a fracção útil da precipitação, i.e., a que origina o escoamento directo.
- Tempo de Concentração de uma bacia hidrográfica,  $t_c$ , tempo necessário para que toda a sua área contribua para o escoamento superficial na secção de saída ou, reformulando, o tempo necessário a que uma gota de água caída no ponto hidráulicamente mais distante chegue à secção de saída. É uma característica da bacia, não dependendo da natureza do evento de precipitação (duração ou intensidade).
- Tempo de Esvaziamento da rede hidrográfica,  $t_e$ , tempo que medeia entre a ocorrência do ponto de inflexão na curva de decrescimento, e a cessação do escoamento directo. Corresponde à passagem na secção do volume de água armazenada na rede durante a chuvada. Depende das características geométricas dos canais da rede, mas também da tipologia da precipitação.

A Figura 3.4 procura representar graficamente as noções apresentadas.

De uma forma sucinta, é possível atribuir determinada forma do hidrograma a características quer da topografia e geologia da bacia hidrográfica, quer a características da precipitação. As características da precipitação que determinam as diferentes respostas da bacia são a intensidade, duração e distribuição. Os factores topográficos que exercem uma acção na translação e

armazenamento da precipitação útil são, fundamentalmente, a área e forma da bacia hidrográfica, a densidade da rede fluvial, os declives do terreno e dos cursos de água, assim como as obstruções, no terreno ou no próprio leito, susceptíveis de provocarem retenção. As características geológicas influenciam o escoamento intermédio e de base.

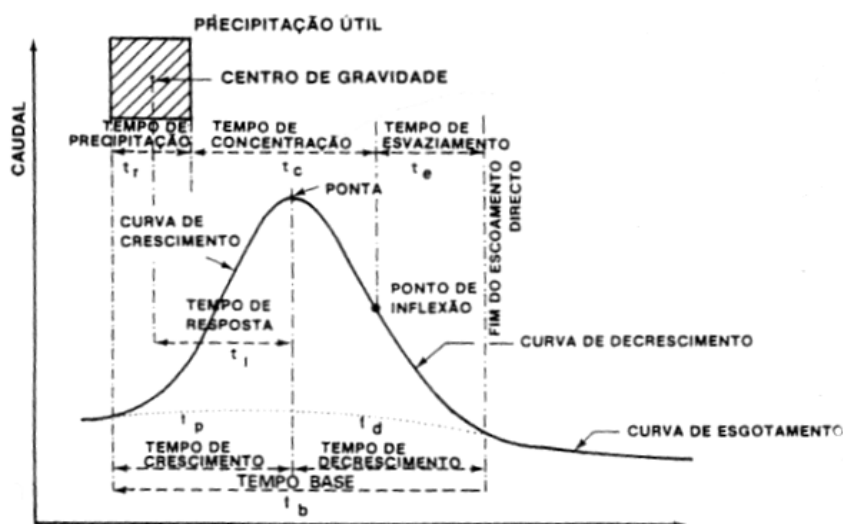


Figura 3.4 – Características de um hidrograma tipo (Extraído de Lencastre e Franco, 1984).

### 3.4.3 Modelos para Separação do Escoamento Directo e do Escoamento de Base

A separação de todas as componentes anteriormente consideradas no escoamento superficial é de difícil realização. No entanto, alguns métodos para proceder à separação dos escoamentos directos e de base foram desenvolvidos. O procedimento mais consensual recorre à curva de recessão do escoamento de base (Portela, 2006 a). Esta curva é geralmente representada pela equação:

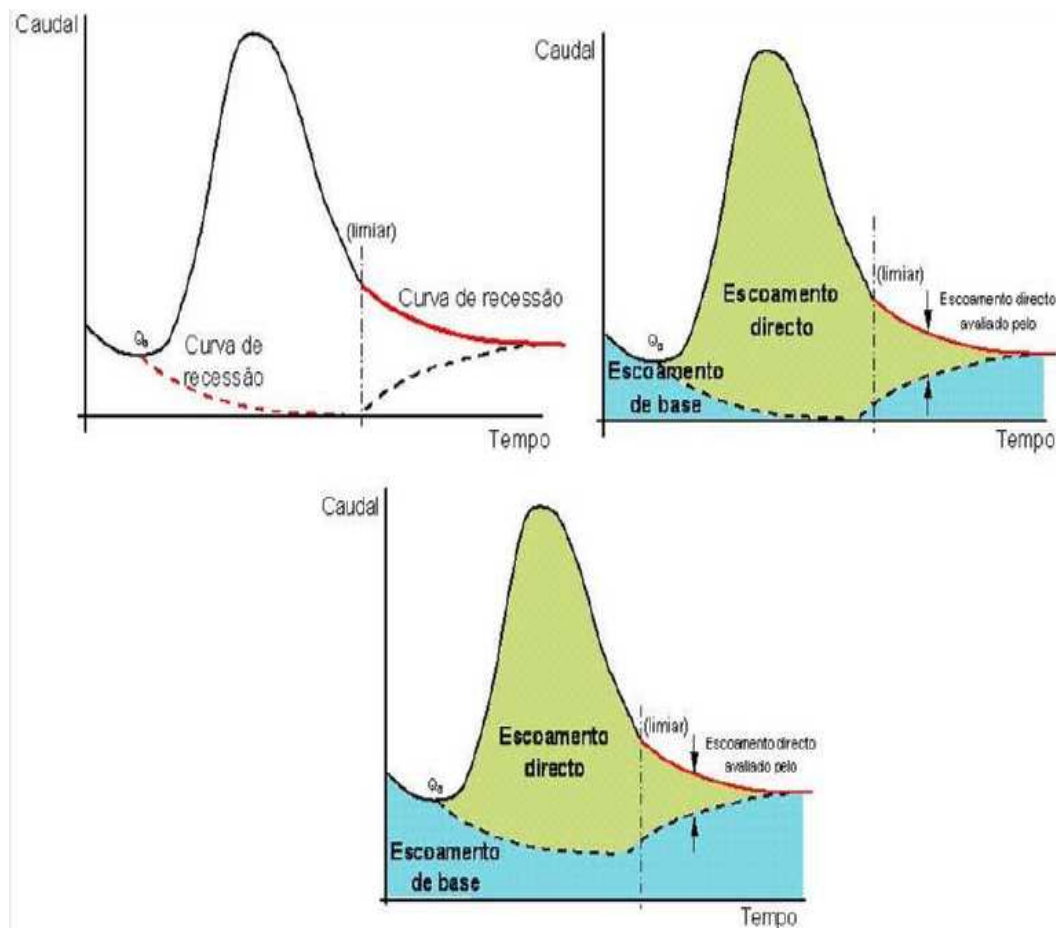
$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\frac{t-t_0}{k}} \quad \text{Equação (3.1)}$$

em que  $Q_0$  é o caudal proveniente do esgotamento dos aquíferos no instante  $t_0$ ,  $Q(t)$  representa o caudal no tempo  $(t - t_0)$  após  $Q_0$  ter ocorrido e  $k$  é a constante de recessão ou de esgotamento que se exprime em unidades de tempo. A representação gráfica desta interpretação do comportamento do escoamento de base está patente na Figura 3.5. Logaritmizando a expressão anterior:

$$\ln Q(t) = \ln Q_0 - \frac{t-t_0}{k} \quad \text{Equação (3.2)}$$

que pressupõe que a representação da variação de caudal com o tempo num gráfico semi-logarítmico é linear.

A tradução física da equação 3.1, que melhor a representa, é a de admitir que o caudal com origem nas reservas subterrâneas pode ser aproximado pela descarga de um conjunto de reservatórios lineares sucessivos, sendo considerado um reservatório linear quando o caudal efluente deste é proporcional ao volume armazenado no mesmo (Portela, 2006 a).



**Figura 3.5** – Modelo de recessão do escoamento de base (Extraído de Portela, 2006 a).

A constante de recessão numa dada secção de um curso de água,  $k$ , pode ser estimada com base em hidrogramas de cheia observados. A representação gráfica semi-logarítmica de um hidrograma observado revela um andamento em forma de segmento de recta nos períodos com ausência de precipitação e afastados da ocorrência anterior de escoamento superficial, ou seja, em período de esgotamento dos aquíferos da bacia hidrográfica (Quintela, 1967). O declive desse segmento de recta traduz-se no valor da constante  $k$ . Este valor encontra-se tabelado para os principais cursos de água Portugueses.

#### 3.4.4 Precipitação

Por acontecimento pluvioso designa-se a ocorrência de uma quantidade significativa de precipitação sobre a bacia hidrográfica, sendo esta antecedida e sucedida por intervalos de tempo sem precipitação mensurável. Por duração entende-se o período de tempo que decorre do início ao fim da mesma (Portela, 2006 b).

A duração da precipitação intensa a considerar na análise de cheias numa secção da rede hidrográfica deve igualar, ou superar, o tempo de concentração da correspondente bacia hidrográfica. Este conceito, precipitação crítica, assegura que a totalidade da área da bacia hidrográfica contribui para o escoamento na secção em estudo, originando, conseqüentemente, o mais elevado caudal de ponta, para a frequência estatística de tal evento pluvioso (período de retorno) (Lencastre e Franco, 1984). Segundo Mockus, o valor máximo de caudal de ponta corresponde à chuvada útil com duração (Lencastre e Franco, 1984):

$$(t_r)_{\text{crítica}} = 2 \cdot \sqrt{t_c} \quad \text{Equação (3.3)}$$

As redes udométricas da responsabilidade do Instituto da Água (INAG) fornecem registos de precipitações diárias máximas anuais. Estes dados são, hoje em dia, de obtenção expedita, via Internet, no portal do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), permitindo a análise de precipitações para a generalidade das bacias hidrográficas portuguesas. Estes dados encontram-se, inclusivamente, disponíveis em formatos de dados de SIG, na forma *raster*, permitindo uma referenciação à bacia em análise de uma forma directa.

Não obstante, as referidas bases de dados não contemplam precipitações intensas de duração inferior ao dia. Estas são as que mais frequentemente intervêm na análise de cheias. Este facto levou a que fossem propostas relações de carácter local, ou nacional, que permitam a obtenção dos referidos dados.

Os parâmetros característicos das relações acima mencionadas são:

- Duração, ou seja, o tempo considerado para a chuvada: dias, horas ou mesmo minutos;
- Intensidade, representando o quociente entre a altura de precipitação caída e o seu tempo de duração;
- Frequência, traduzida por um em  $n$  anos em que um dado evento de precipitação pode em média ocorrer, sendo este um conceito estatístico usualmente designado por período de retorno ( $T$ ).

As expressões gerais que traduzem as ditas relações são:

$$P = \alpha \cdot t^m \quad \text{Equação (3.4)}$$

$$i = \beta \cdot t^n \quad \text{Equação (3.5)}$$

em que  $P$  representa a precipitação, expressa em milímetros, com dado período de retorno,  $t$ , a correspondente duração, expressa geralmente em minutos, e  $i$ , a intensidade média da precipitação, expressa em milímetros por hora. Os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  e os expoentes  $m$  e  $n$  são função do período de

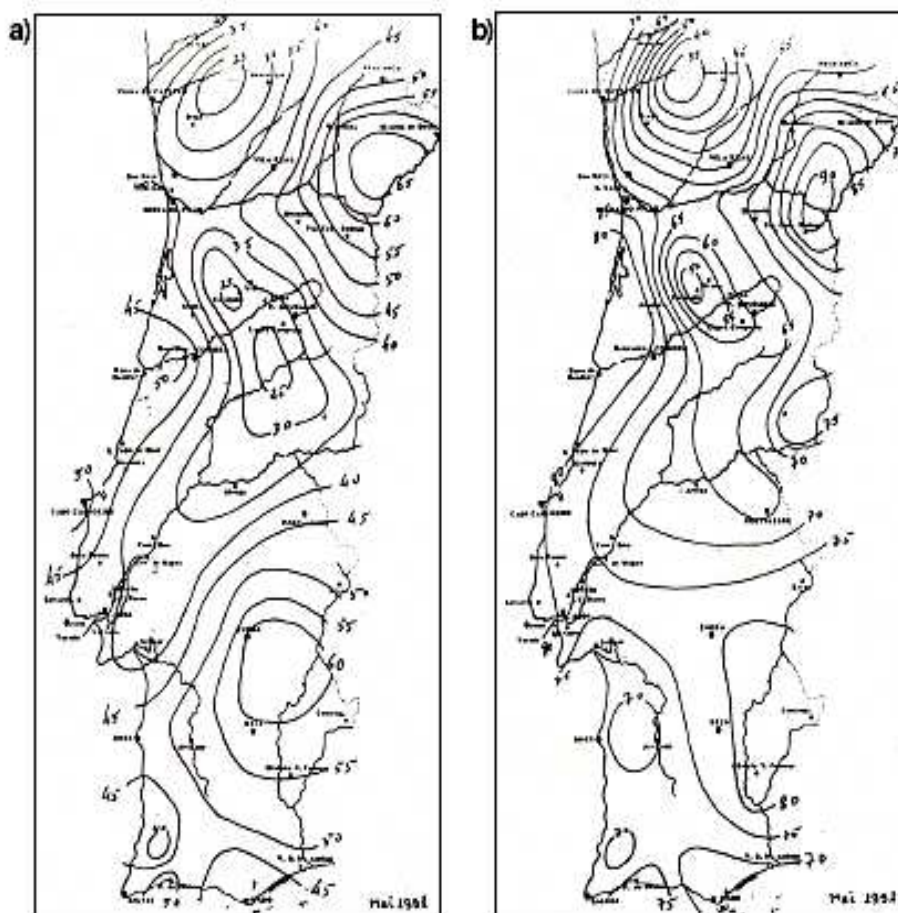
retorno, T. A primeira expressão é referida como a linha de possibilidade udométrica (representada em coordenadas logarítmicas) e a segunda como curva de intensidade – duração – frequência (IDF).

As anteriores expressões traduzem o acréscimo da precipitação com o aumento da respectiva duração, apesar da intensidade média dessa mesma precipitação diminuir com o aumento da duração.

Verifica-se, igualmente, que a altura de precipitação ponderada sobre uma área se reduz à medida que aumenta essa área. Ou seja, o máximo de precipitação não ocorre simultaneamente em toda a área considerada. Este conceito tem uma tradução quanto a considerações sobre a dimensão da bacia hidrográfica em estudo.

A Figura 3.6 representa, em mapas de Portugal Continental, dados obtidos por Godinho, 1984, estando estes representados por isolinhas de precipitação e expressos para um mesmo período de retorno. A figura evidencia que existe uma certa uniformidade espacial no que respeita ao modo como a precipitação com uma dada duração e um dado período de retorno se reparte para durações inferiores (Portela, 2005).

A Figura 3.7 apresenta alguns mapas de isolinhas de precipitação horária para diferentes frequências estatísticas.



**Figura 3.6** – Mapa de isolinhas dos valores máximos da precipitação em a) 60 minutos e em b) 6 horas, expressos em percentagem dos valores em 24 horas. Período de retorno de 100 anos (Extraído de Portela, 2005).

A maioria dos autores sintetiza os seus estudos no domínio das precipitações intensas mediante a apresentação de valores para os parâmetros que constam das duas expressões anteriormente apresentadas, ou por estabelecimento de expressões aplicáveis ao cálculo daquelas precipitações.



**Figura 3.7** – Valores máximos de precipitação horária para diferentes frequências estatísticas (Lencastre e Franco, 1984).

A título exemplificativo são apresentados os valores desses mesmos parâmetros para a região do Porto (Tabela 3.1) de acordo com informação disponível no portal do SNIRH.

**Tabela 3.1** – Parâmetros da curva IDF para a Região do Porto (Serra do Pilar), para diferentes períodos de retorno (Fonte: SNIRH).

	Período de Retorno (T em anos)			
	50	100	500	1000
$\beta$	362	392	463	493
$n$	-0.583	-0.580	-0.576	-0.574

O procedimento mais usual para estimar a precipitação intensa com duração  $t$  ( $P_t$ ) e com o período de retorno de T anos, conhecida a precipitação diária máxima anual na bacia hidrográfica para o mesmo período de retorno ( $P_{24}$ ), considera o quociente directo entre as IDF aplicáveis à região em questão. Uma vez que os parâmetros das curvas IDF consideram a duração  $t$  definida em minuto e a intensidade em milímetro por hora, para o caso de a precipitação ser expressa em milímetro e a duração em hora, o referido quociente para a obtenção da precipitação desejada apresenta-se como:

$$\frac{P_t}{P_{24}} = \frac{a \cdot (60 \cdot t)^b \cdot t}{a \cdot (60 \cdot 24)^b \cdot 24} \quad \text{Equação (3.6)}$$

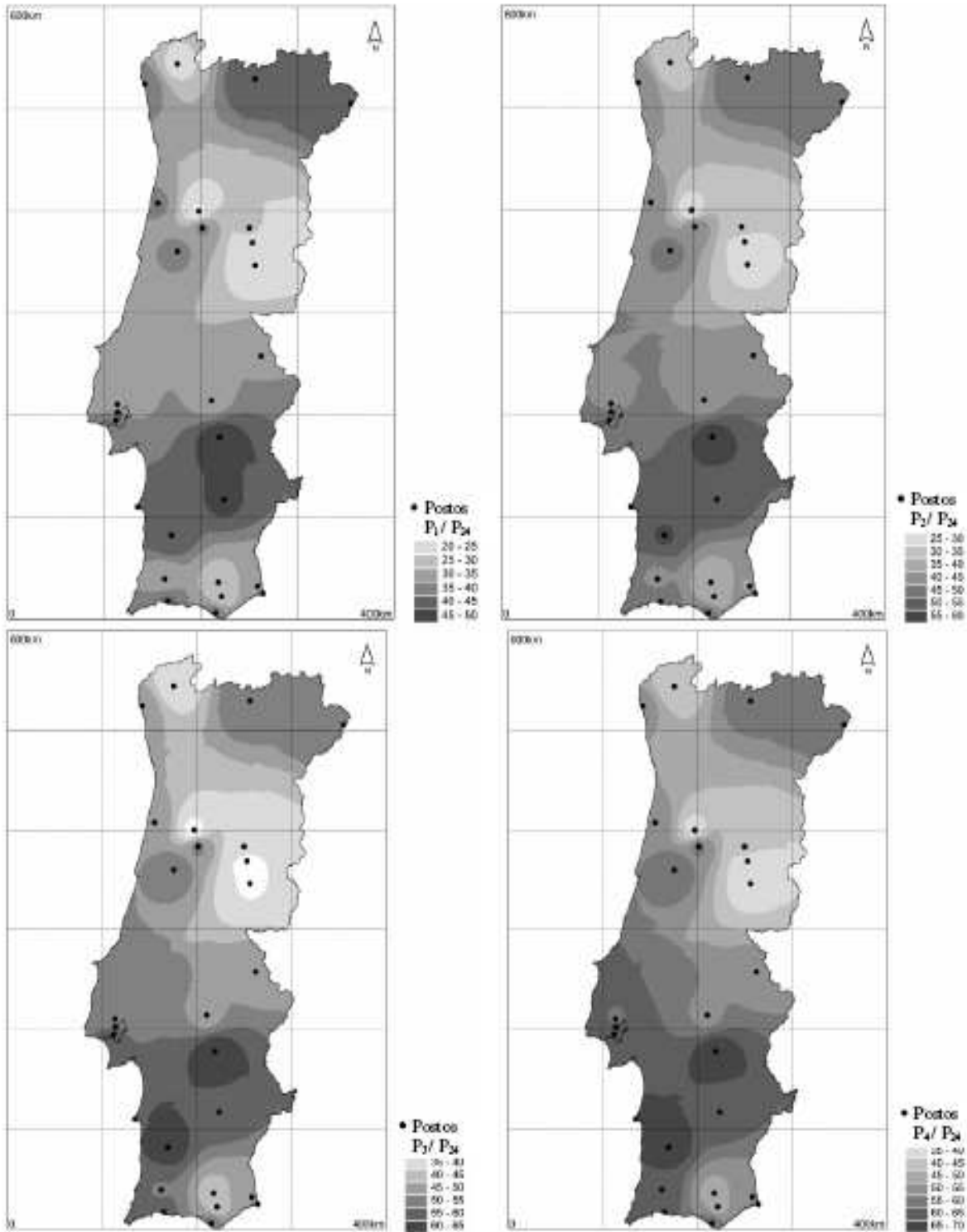
em que,  $a$  e  $b$  representam, respectivamente, o coeficiente e o expoente da curva IDF.

Realça-se que este procedimento admite que a precipitação na bacia hidrográfica com uma duração  $t$  e um dado período de retorno, T, pode ser obtida a partir da precipitação naquela bacia com o mesmo período de retorno e a duração de 24 horas,  $P_{24}$ , por aplicação de um coeficiente de repartição estabelecido com base nas curvas IDF (Portela, 2005).

Existem disponíveis, uma vez mais, em formatos de dados *raster*, superfícies do tipo das representadas na Figura 3.8, obtidas por manipulação das IDF em procedimentos similares aos acima abordados, que sintetizam o valor do quociente  $P_t/P_{24}$  para determinado período de retorno e para valores predefinidos de duração,  $t$ , do evento de pluviosidade. A sua utilização pressupõe unicamente a localização geográfica da bacia hidrográfica e por recurso a uma operação de geoprocessamento, por sobreposição (Capítulo 2), a obtenção do valor do desejado quociente. Este valor multiplicado pelo valor da precipitação máxima diária anual para igual frequência da ocorrência, valor, como referido, também obténível por recurso aos SIG, permite a estima da precipitação intensa com duração  $t$ , para a bacia hidrográfica em análise.

O anterior procedimento apresenta como principal desvantagem o facto de as durações da chuvada,  $t$ , estarem limitadas aos valores predefinidos nas superfícies utilizadas. Se a duração da precipitação crítica interveniente na análise de cheia for distinta da duração considerada em tal superfície, o método não se aplica.

Por fim realça-se que a mais valia de qualquer um dos procedimentos apresentados reside no facto de associarem à precipitação a estimar para a bacia hidrográfica informação udométrica disponível na zona em que a mesma se insere, por meio do valor da precipitação máxima diária anual.



**Figura 3.8** – Superfícies de valores do quociente  $P_t/P_{24}$  (%) entre duas precipitações com o mesmo período de retorno  $T$ , uma com duração  $t$ ,  $P_t$ , e outra com duração de 24 h,  $P_{24}$ , (valores de  $t$  de 1, 2, 3 e 4 h) (extraído de Portela, 2005)

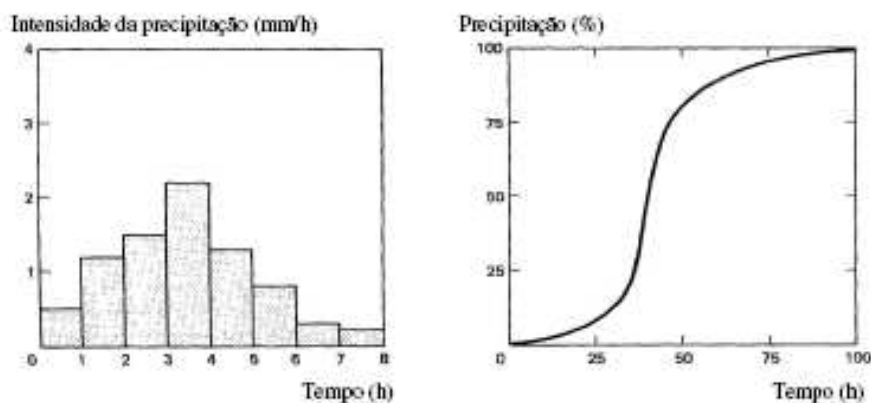
### 3.4.5 Hietograma das Precipitações

Como referido anteriormente, a rede udométrica nacional possibilita a estimativa da precipitação diária máxima anual com dado período de retorno, para as mais significativas bacias hidrográficas do País.

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

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

A discretização temporal do evento de precipitação é melhor traduzida por recurso a diagramas cronológicos dos sucessivos valores da pluviosidade ou da respectiva intensidade. Estas representações podem ser discretas ou contínuas, correspondendo o primeiro caso ao hietograma da precipitação (Figura 3.9).

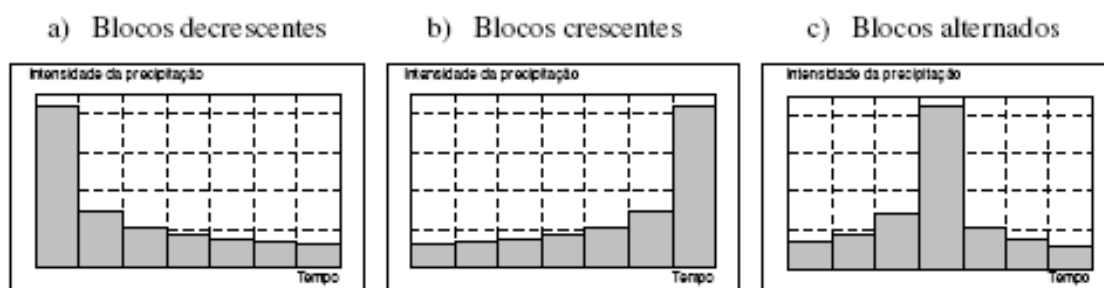


**Figura 3.9** – a) Hietograma da precipitação e b) distribuição temporal adimensional da precipitação (Extraído de Hipólito, 1985).

A segmentação temporal da precipitação evidenciada pelo hietograma teórico, ou de cálculo, é conseguida por recurso às curvas IDF ou a linhas de possibilidade udométrica. Uma das vantagens do recurso ao hietograma prende-se com a subestimação introduzida caso se considere a distribuição uniforme da intensidade da precipitação, para uma dada duração crítica. Neste caso, com o aumento da duração da precipitação, os caudais de ponta de cheia diminuiriam, por diminuição da intensidade média (implícito às curvas IDF), facto que se admite poder não corresponder à realidade.

Os procedimentos expostos em 3.4.4, no que refere a estimativa do valor da precipitação na bacia hidrográfica interveniente na análise de cheias, são igualmente aplicáveis à atribuição a essa precipitação de um hietograma teórico. Neste caso, a duração,  $\Delta t$ , pretendida para cada bloco do hietograma, terá de ser fixada *à priori* e a aplicação dos procedimentos referidos para instantes sucessivos  $i \Delta t$ , sendo  $i$  um número inteiro, entre 1 e  $t/\Delta t$ , e  $t$  a duração da precipitação. Assim, obtêm-se  $i$  valores da precipitação referentes a durações progressivamente maiores, até se igualar a duração  $t$ . De seguida, os incrementos entre cada duas precipitações consecutivas são calculados e organizados de acordo com um dado padrão (HEC, 2000 b).

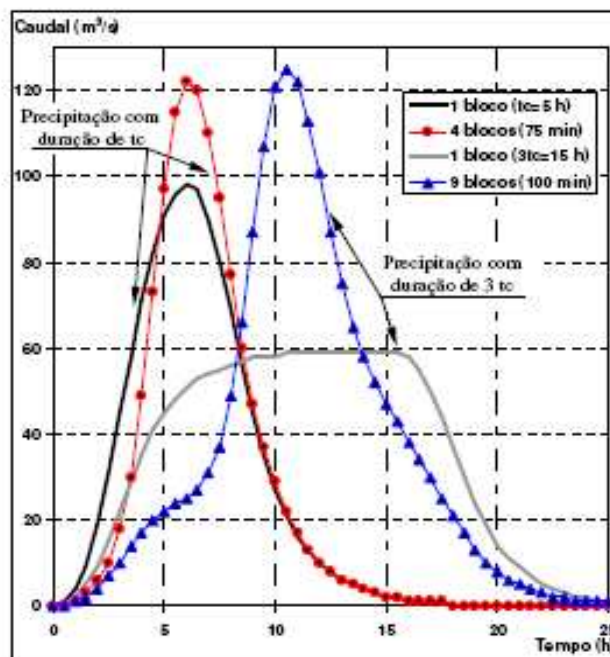
Os padrões mais frequentes em hietogramas referem-se a blocos decrescentes, blocos crescentes e blocos alternados, consoante os incrementos de precipitação nos sucessivos intervalos de tempo são ordenados por valores decrescentes, por valores crescentes ou de modo alternado, respectivamente (Figura 3.10) (Portela, 2006 a).



**Figura 3.10** – Representação dos padrões de distribuição de blocos de precipitação em hietogramas (Extraído de Portela, 2006 a).

Na Figura 3.11 é apresentada a tradução gráfica do exposto no que concerne à relação entre o valor de caudal de ponta do hidrograma e a sua relação com a forma do respectivo hietograma de precipitação, de acordo com os resultados obtidos por Portela, 2006 b, no estudo dos hidrogramas de cheia afluentes à albufeira da barragem de Toulica, localizada na ribeira com o mesmo nome (área da bacia hidrográfica de 26 Km<sup>2</sup>). Os hidrogramas foram obtidos mediante a consideração de precipitações intensas com período de retorno de 1000 anos e durações igual e tripla do tempo de concentração da bacia hidrográfica, estimado em 5 horas.

Portela, 2006 b, conclui que de forma a maximizar as estimativas dos caudais de ponta de cheia se devem adoptar hietogramas de blocos alternados com 4 ou, no mínimo, 3 blocos, para precipitações com durações iguais aos tempos de concentração, e com 9 ou, no mínimo, 6 blocos, para precipitações com durações triplas dos tempos de concentração. Os acréscimos dos caudais de ponta de cheia que se verificam para um maior número de blocos são muito pouco significativos.



**Figura 3.11** – Secção da barragem de Toulica. Hidrogramas das cheias afluentes para precipitações com duração igual e tripla do tempo de concentração e com intensidade uniforme e não uniforme (Portela, 2006 b).

### 3.4.6 Precipitação Útil e Modelação das Perdas de Precipitação

Importa especificar a parcela da precipitação que contribui de facto para o escoamento observado. Esta é designada por precipitação útil ou efectiva, sendo o volume relativo à ocorrência da mesma sobre a bacia hidrográfica igual ao volume do hidrograma de cheia correspondente ao escoamento directo na secção em questão (Lencastre e Franco, 1984).

A diferença entre a precipitação total e a correspondente precipitação efectiva designa-se por perda de precipitação. Tal como referido no início do presente capítulo, os processos envolvidos nas perdas são a interceptação, a infiltração, o armazenamento em depressões do solo e, genericamente, a evapotranspiração.

A interceptação refere-se à parcela da precipitação que aquando da sua ocorrência embate na vegetação, ficando aí retida. A quantidade de precipitação que é, assim, interceptada depende das características da precipitação e da natureza da cobertura do terreno. O tipo, a densidade, a idade, a sazonalidade do povoamento florestal são, entre outros, factores condicionantes da cobertura do terreno.

Segundo Ponce, 1989, as perdas anuais de precipitação por interceptação podem representar 25% da precipitação anual média. No entanto, a quantidade de água interceptada durante as grandes chuvadas é pouco significativa, sendo assim o efeito no desenvolvimento de grandes cheias fluviais reduzido, ou mesmo muito reduzido, dependendo da excepcionalidade da ocorrência.

Já no que diz respeito à conservação do solo, o efeito da intercepção deve ser considerado importante pois, através da redução da energia cinética das gotas da chuva antes delas atingirem a superfície do solo, contribui para uma redução da acção erosiva durante as chuvadas intensas de grande duração (Lencastre e Franco, 1984).

Na Tabela 3.2 são apresentados valores medianos da intercepção pela copa de diferentes povoamentos florestais. O valor interceptado ao nível do estrato herbáceo pode atingir valores da mesma ordem de grandeza, Tabela 3.3, encontrando-se estes mais condicionados a factores de ordem sazonal.

**Tabela 3.2** – Valores medianos da intercepção pela copa como percentagem da precipitação total anual ou sazonal (adaptado de Lencastre e Franco, 1984).

	Número de observações	Intercepção mediana pela copa (% da precipitação total)
<b>FLORESTAS DE FOLHOSAS</b>		
Todos os dados	10	13
<b>FLORESTAS RESINOSAS</b>		
Só chuva	11	22
Observações que incluem chuva e neve	26	28
Dados europeus, somente	9	35
Dados norte-americanos, somente	27	27
Farmosa	1	8

A infiltração diz respeito à passagem da água através da superfície do solo para o seu interior. Existindo disponibilidade de água à superfície do solo, a infiltração depende, entre outros, das características do solo, tipo, granulometria, densidade da cobertura vegetal, temperatura e qualidade da água (Ponce, 1989). A infiltração é o processo de perda de precipitação mais significativo em eventos extremos.

**Tabela 3.3** – Intercepção por diversas culturas tidas, pelo seu porte, como pertencentes ao estrato herbáceo (adaptado de Lencastre e Franco, 1984).

	Durante a época de maior desenvolvimento vegetativo			Durante a época de menor desenvolvimento vegetativo
	Precipitação (mm)	Intercepção (mm)	Intercepção (%)	Intercepção (%)
Luzerna	275	98	36	22
Milho	181	28	16	3
Soja	158	23	15	9
Aveia	171	12	7	3

O armazenamento em depressões do terreno engloba a parcela retida nas irregularidades, naturais ou artificiais, do solo. Esta água pode ser evaporada ou infiltrada, representando inevitavelmente perda de volume efectivo.

A evapotranspiração, parcela que abstractamente representa a soma da água evaporada na bacia hidrográfica e transpirada pela vegetação, assume relevância quando se pretende determinar valores de escoamento fluvial na ausência de precipitação, ou algum tempo depois da ocorrência desta. As perdas de precipitação por evapotranspiração no decorrer do próprio evento pluvioso, ou nos momentos que o precedem, são, no contexto do clima em Portugal, desprezáveis, sendo a sua contabilização na análise de cheias negligenciável.

O resultado do hietograma observado deduzidas as perdas de precipitação, representa o hietograma da precipitação útil.

O somatório das perdas de precipitação das diferentes parcelas enumeradas é de importante quantificação num modelo que pretenda simular de facto o valor de caudal de ponta de cheia ou respectivo hidrograma. Como tal, exige-se a aplicação de um modelo que simule as perdas de precipitação de uma forma adequada ao contexto de precipitações intensas.

Os referidos modelos consideram, usualmente, dois tipos de perdas: uma perda inicial e uma perda contínua. A perda inicial pode assumir algum relevo nos primeiros instantes de ocorrência da precipitação em consequência de uma maior capacidade inicial da bacia hidrográfica para interceptar, armazenar em depressões e para infiltrar a água. Uma vez satisfeita essa capacidade inicial, os modelos passam a considerar a perda contínua, que decresce, ao longo da duração do evento, por decréscimo da taxa de infiltração, e que cessando a precipitação se resume à evapotranspiração (Soil Conservation Service, 1986). Dependendo dos objectivos a que se destina a aplicação do modelo, pode não ser relevante a consideração de uma destas partes.

Como advém da classificação dos modelos hidrológicos considerada (Capítulo 3.3), um modelo de simulação contínua, por exemplo, destinado à simulação dos escoamentos diários, na presença ou não de precipitação, terá necessariamente de considerar as parcelas referentes à evapotranspiração e à infiltração.

Em modelos de eventos, como são os de análise de cheias, são consideradas as perdas iniciais, sendo particular destaque dado à infiltração, e desprezados os demais processos intervenientes.

Seguidamente apresentam-se dois dos modelos de eventos mais utilizados para a determinação da precipitação efectiva. Particular destaque é dado ao segundo modelo, uma vez ser o utilizado no presente trabalho para a simulação das perdas de precipitação.

### 3.4.6.1 Modelo de Perdas de Intensidade Constante

Trata-se de um modelo muito simples na abordagem à simulação das perdas de precipitação. Prevê que se disponha do hietograma da precipitação para dado evento e do respectivo hidrograma, correspondente ao escoamento directo. Assume que as perdas de precipitação ao longo do evento são constantes. Assim:

$$\begin{cases} p_e = p - f; p_t > f \\ p_e = 0; p_t < f \end{cases} \quad \text{Equação (3.7)}$$

em que  $p_t$  corresponde à precipitação total,  $f$  representa a perda constante de precipitação e  $p_e$  a precipitação efectiva.

Adicionalmente pode ser considerada uma perda inicial para representar a intercepção e o armazenamento em depressões do terreno. Esta não é de uso obrigatório caso se considere que a bacia hidrográfica se encontrava já em condições de saturação.

Este modelo inclui, na realidade, um parâmetro, a perda constante, e uma condição inicial, a perda inicial. A infiltração é, implicitamente, o processo que visa ser modelado.

Verifica-se, pelo exposto, que se trata de um modelo empírico onde a única forma de estimar o valor do parâmetro mencionado, bem como o valor da condição inicial, é a calibração. Resulta, portanto, do arbítrio de valores para a perda constante e perda inicial, que são sucessivamente iterados até que os volumes de água do hietograma tenham correspondência com os volumes do hidrograma do escoamento directo observado.

Não obstante as suas óbvias limitações é um modelo que numa análise simplista da bacia hidrográfica, dispondo de um conjunto de dados suficientemente extenso e de um método estatístico de ajuste robusto, pode produzir resultados aceitáveis, sendo ainda utilizado e incluído nos pacotes de *software* destinados a modelação hidrológica mais actuais. Na Tabela 3.4 apresentam-se valores publicados por Chow *et al.*, 1988, para as constantes de perda de acordo com a natureza do solo.

**Tabela 3.4** – Classificação de solos quanto à sua textura, de acordo com o *Soil Conservation Service* (SCS), e respectiva taxa de perda (Adaptado de Chow *et al.*, 1988).

Grupo Hidrológico	Classe de textura	Taxas infiltração (cm/h)
A	Solo arenoso / arenoso franco	0,80 – 1,1
B	Solo franco arenoso / franco	0,4 - 0,8
C	Solo franco siltoso / franco argiloso arenoso	0,1 -0,4
D	Solo franco argiloso / franco argiloso siltoso / argiloso arenoso / argiloso siltoso / argiloso	0 - 0,1

### 3.4.6.2 Modelo de Perdas do *Soil Conservation Service* (SCS)

Na ausência de dados relativos ao escoamento directo que permitam inferir as perdas de precipitação, situação mais usual em modelação, torna-se necessária a aplicação de outros modelos que permitam a estimativa dessas perdas. De entre estes modelos o que reúne um maior consenso quanto à sua aplicabilidade na análise de cheias é o modelo do *soil conservation service* (SCS).

O modelo do SCS admite que, na sequência de um acontecimento pluvioso intenso, 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 efectiva e o escoamento superficial potencial (Ponce, 1989).

A capacidade máxima de retenção de água na bacia é uma grandeza convencional entendida como a capacidade máxima de armazenamento de água na bacia hidrográfica quando no solo, nas depressões do terreno e nos obstáculos que interceptam a chuva fosse atingido um estado de intensa saturação que se pudesse admitir corresponder a uma taxa de infiltração a tender para zero. Nestas circunstâncias as intensidades da precipitação total e efectiva seriam iguais (Portela, 2006 a).

O escoamento superficial potencial é definido como sendo a precipitação deduzida das perdas iniciais que ocorrem até ao encharcamento da superfície. Assim obtém-se:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{(P - I_a)} \quad \text{Equação (3.8)}$$

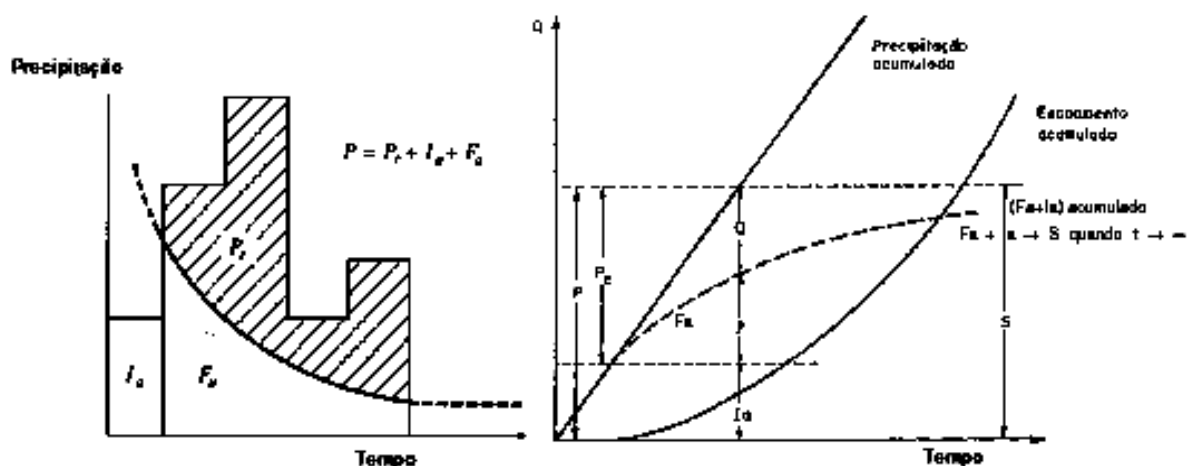
,sendo:

$P$  a precipitação;  $P_e$  a precipitação efectiva;  $F_a$  a altura de precipitação retida na bacia hidrográfica após o início do escoamento superficial (equivalente às perdas contínuas);  $S$  a retenção potencial máxima;  $I_a$  as perdas iniciais (armazenamento em depressões, interceptação, evapotranspiração e infiltração que antecedem o encharcamento da superfície);  $P - I_a$  o escoamento superficial potencial. Todas as grandezas se expressam em milímetros (mm).

Na Figura 3.12 estão graficamente representadas as variáveis e funções do modelo do SCS para determinação das perdas de precipitação.

De acordo com a anterior simbologia e por aplicação do princípio da continuidade resulta:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad \text{Equação (3.9)}$$



**Figura 3.12** – Representação das variáveis e funções do modelo do SCS para determinação das perdas de precipitação (Extraído de Portela *et al.*, 2000 a).

Resolvendo a equação 3.9 em ordem a  $F_a$  e introduzindo o resultado assim obtido na equação (3.8), obtém-se a equação do SCS para o escoamento superficial:

$$Q = P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \text{Equação (3.10)}$$

em que  $Q$  é o escoamento directo, expresso em milímetros (mm), que iguala a precipitação efectiva, igualmente expressa em milímetros (mm).

Com base em estudos experimentais em pequenas bacias hidrográficas, o SCS propôs que as perdas iniciais,  $I_a$ , fossem aproximadas por 20% da capacidade máxima de retenção de água na bacia hidrográfica, ou seja:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad \text{Equação (3.11)}$$

Assim, atendendo a esta ultima expressão e substituindo:

$$Q = P_e = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S}; P > 0,2 \cdot S \quad \text{Equação (3.12)}$$

Caso a condição imposta não se verifique, i.e.,  $P < 0,2 \cdot S$ , o escoamento directo será nulo ( $Q = P_e = 0$ ).

De acordo com Ponce, 1989, o valor de 20% sugerido pelo SCS pode estar, na realidade, compreendido entre 0 e 26%, tendo este intervalo sido objecto de diversos estudos na área e minuciosamente revista a sua aplicabilidade.

Em Portugal Continental, Correia, 1984 b, afirma que o valor médio de 0.2 proposto pelo SCS não se verifica inteiramente, conduzindo a precipitações efectivas muito baixas em consequência das elevadas perdas iniciais de precipitação. O mesmo autor propõe um método de cálculo iterativo. Portela, 2000, sugere, por experiência com algumas bacias hidrográficas portuguesas, que se inicie considerando este valor zero, como forma de reduzir as perdas totais, que reconheceram como excessivas para os casos de estudo.

O parâmetro  $S$ , retenção potencial máxima, foi relacionado com o tipo de solo e com as condições de utilização e de cobertura na bacia hidrográfica por meio do número de escoamento, *curve number* ( $CN$ ). Esta relação é fornecida pela equação (HEC, 2000 b):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Equação (3.13)}$$

Os principais factores que determinam o valor de  $CN$  são os tipos de solo, de coberto vegetal e de utilização do solo e as condições antecedentes de humidade.

Do ponto de vista hidrológico, e de acordo com o SCS, distinguem-se os seguintes quatro grupos de solos (Lencastre e Franco, 1984):

- Grupo A (baixo potencial de escoamento superficial) – solos com elevadas taxas de infiltração, mesmo quando completamente humedecidos. Incluem principalmente areias profundas, com drenagem boa ou excessiva.
- Grupo B (potencial de escoamento superficial abaixo da média) – solos com taxas de infiltração moderadas, quando completamente humedecidos. Incluem principalmente solos medianamente profundos, com textura moderadamente fina e moderadamente grosseira, e medianamente drenados.
- Grupo C (potencial de escoamento superficial acima da média) – solos com baixas taxas de infiltração, quando completamente humedecidos. Incluem principalmente solos com camadas impermeáveis subjacentes e solos com textura moderadamente fina.
- Grupo D (elevado potencial de escoamento superficial) – solos com taxas de infiltração muito baixas, quando completamente humedecidos. Incluem principalmente solos argilosos expansíveis, solos com o nível freático permanentemente próximo da superfície e solos com substratos impermeáveis a pouca profundidade.

Na Figura 3.13 é possível observar uma carta dos solos de Portugal Continental classificados, pelas suas características hidrológicas, de acordo com o critério referido. Esta carta foi alvo de digitalização e georreferenciação, permitindo a sua utilização em SIG. Assim por interpolação à referida carta, e a respectiva operação de geoprocessamento, é possível classificar os solos de uma qualquer bacia hidrográfica portuguesa, quanto às suas características hidrológicas.

As taxas de infiltração que, de acordo com o *United States Department of Agriculture* (USDA - *United States Department of Agriculture*, 1951), se atribuem aos anteriores grupos de solos são as seguintes:

Grupo A – superior a 0,76 cm/h

Grupo B – entre 0,38 e 0,76 cm/h

Grupo C – entre 0,13 e 0,38 cm/h

Grupo D – entre 0 e 0,13 cm/h

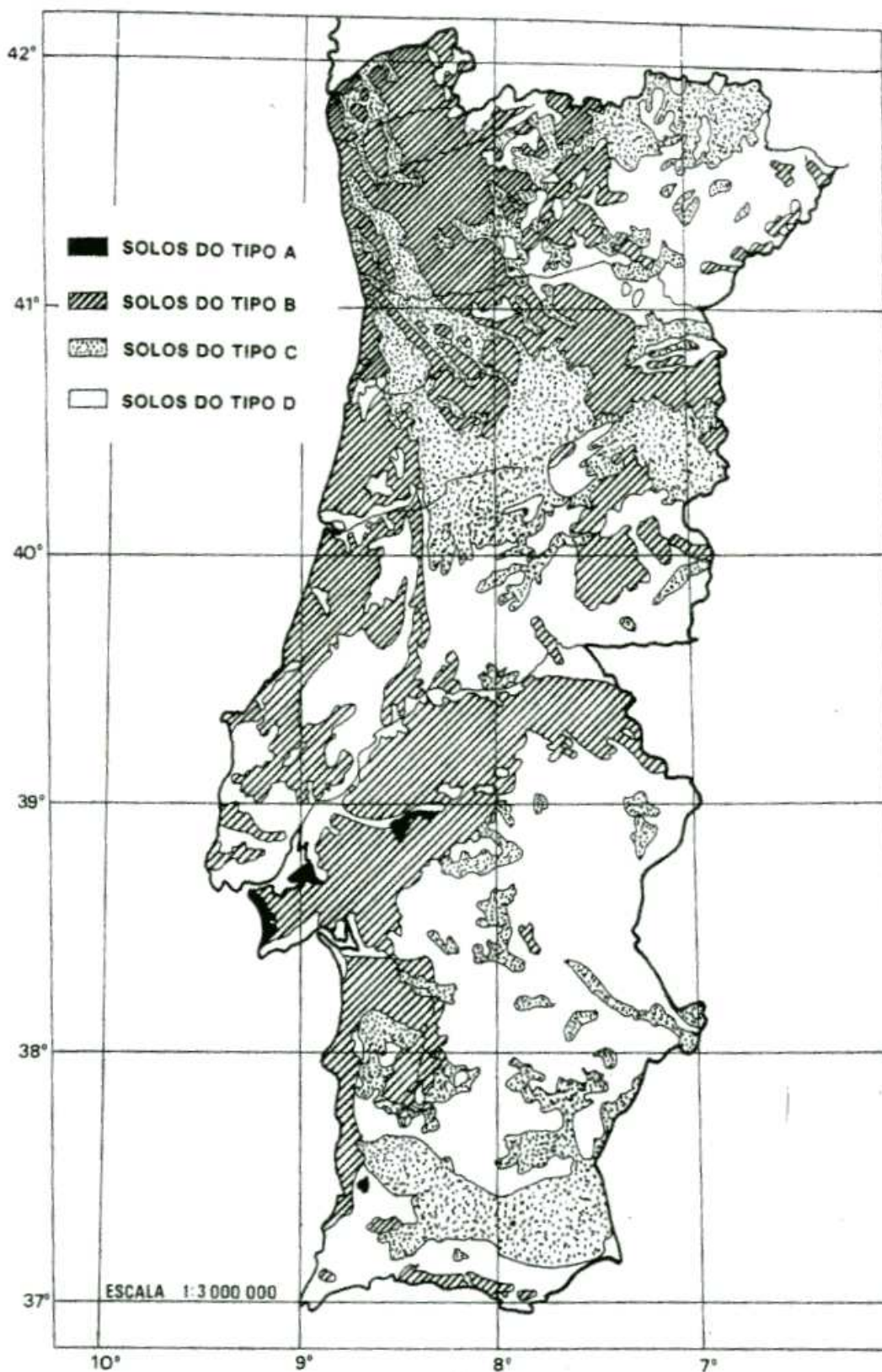
Na Tabela 3.5 indicam-se algumas propriedades hidrológicas de solos, identificando-se o grupo em que se inserem tais solos, de acordo com a classificação apresentada (Portela *et al.*, 2000 a).

**Tabela 3.5** – Propriedades hidrológicas dos solos consoante a respectiva textura  
(Extraído de Portela *et al.*, 2000 a).

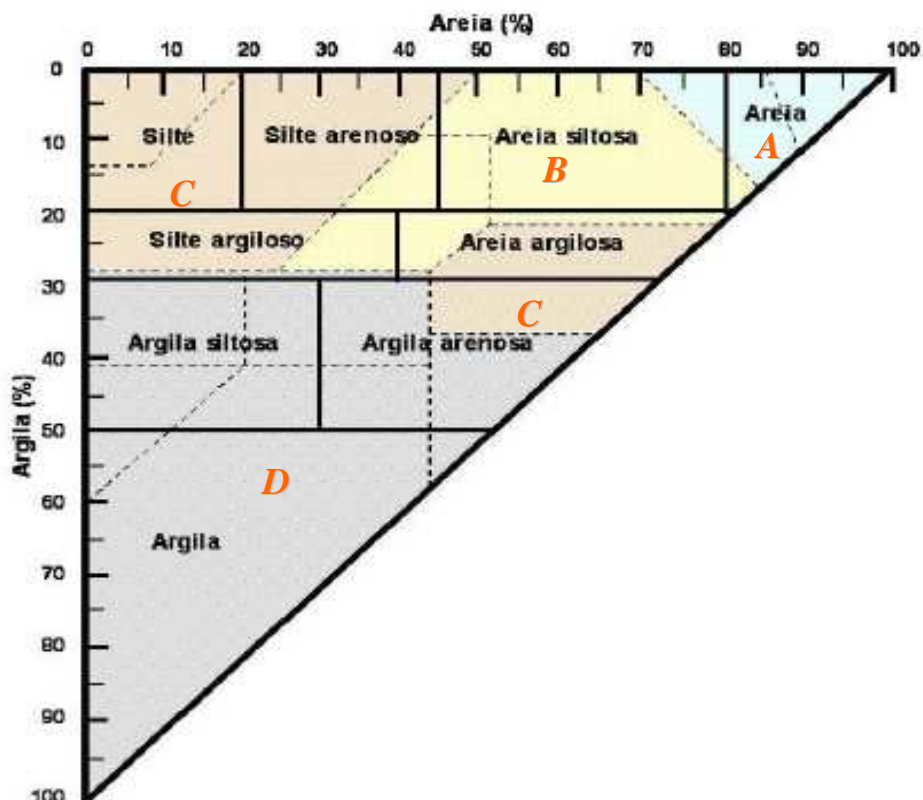
Classe de textura – designação		Capacidade efectiva de água (in/in)	Taxa mínima de infiltração (in/hr)	Grupo hidrológico
Inglês	Portuguesa			
<i>Sand</i>	Solo arenoso	0.35	8.27	A
<i>Loamy sand</i>	Solo arenoso franco	0.31	2.41	A
<i>Sandy loam</i>	Solo franco arenoso	0.25	1.02	B
<i>Loam</i>	Solo franco	0.19	0.52	B
<i>Silt loam</i>	Solo franco siltoso	0.17	0.27	C
<i>Sandy clay loam</i>	Solo franco argiloso arenoso	0.14	0.17	C
<i>Clay loam</i>	Solo franco argiloso	0.14	0.09	D
<i>Silty clay loam</i>	Solo franco argiloso siltoso	0.11	0.06	D
<i>Sandy clay</i>	Solo argiloso arenoso	0.09	0.05	D
<i>Silty clay</i>	Solo argiloso siltoso	0.09	0.04	D
<i>Clay</i>	Solo argiloso	0.08	0.02	D

As classes texturais de solo apresentadas na Tabela 3.5 decorrem da classificação proposta pelo USDA, baseada nas percentagens de areia, sílica e argila. Na Figura 3.14 estabelece-se a correspondência gráfica entre as classes texturais de solo e os grupos hidrológicos em que se inserem.

Relativamente aos valores do número de escoamento, *CN*, estes podem ser facilmente obtidos com base nas tabelas publicadas pelo próprio SCS, ou por publicações de autores nacionais, que as adaptaram ao contexto Nacional (Ponce, 1989). No presente documento são apresentadas tais tabelas no Anexo C.



**Figura 3.13** – Carta dos solos de Portugal Continental classificados pelas suas características hidrológicas (Adaptado de Lencastre e Franco, 1984).



**Figura 3.14** – Grupos hidrológicos correspondentes às classes de solo representadas na Tabela 3.5  
(Adaptado de Portela *et al.*, 2000 a).

As tabelas mencionadas (Anexo C) pressupõem normalmente condições antecedentes de humidade (*antecedent moisture conditions - AMC*) médias, AMCII, devendo os valores do número de escoamento que fornecem serem corrigidos para condições antecedentes de humidade diferentes, designadamente, mais secas (AMCI) ou mais húmidas (AMCIII).

De referir que, em Portugal Continental, as condições antecedentes de humidade em que geralmente ocorrem os eventos de precipitação extrema, se enquadram na situação AMCIII (Correia, 1984 b).

Os números de escoamento para tal situação obtêm-se dos respectivos valores para a situação AMCII pela expressão:

$$CN(AMCIII) = \frac{23 \cdot CN(AMCII)}{10 + 0.13CN(AMCII)} \quad \text{Equação (3.14)}$$

em que  $CN(AMCII)$  e  $CN(AMCIII)$  representam os números de escoamento para as condições AMCII e AMCIII, respectivamente.

Os valores do número de escoamento encontram-se, em alguns casos, disponíveis sob o formato de dados *raster*, sendo, uma vez mais, possível por meio de operações de geoprocessamento

obter os valores de *CN* directamente para a área de interesse. Este assunto será aprofundado no capítulo seguinte, onde se explanará a metodologia empregue ao caso de estudo.

Segundo Portela *et al.*, 2000 a, não obstante se reconhecer que o modelo de perdas do SCS conduz, em termos absolutos, a perdas de precipitação ligeiramente excessivas quando aplicado em Portugal Continental, admite-se que, em termos relativos, permita analisar comparativamente as perdas decorrentes de diferentes utilizações do solo de uma pequena bacia hidrográfica, como sejam as perdas decorrentes da intensificação da ocupação urbana da bacia.

Complementarmente, a consideração do número de escoamento, *CN*, permite introduzir informação decorrente de diferentes ocupações do solo num outro parâmetro hidráulico fundamental na análise de cheias, designadamente no tempo de concentração. Assim, como seria espectável, as diversas ocupações da bacia hidrográfica influenciam o tempo que a gota de água precipitada no ponto hidráulicamente mais afastado demora a alcançar a secção de estudo.

A progressiva impermeabilização da superfície de uma bacia hidrográfica, em consequência do aumento da área com ocupação urbana, pode levar a uma menor resistência ao escoamento e, conseqüentemente, uma concentração mais rápida do escoamento à superfície do terreno, com a inevitável diminuição do tempo de concentração. Esta diminuição torna precipitações de curta duração susceptíveis de serem causadoras de cheias, desde que tenham intensidade suficiente. A este efeito acresce uma diminuição das perdas de precipitação, por redução da infiltração, levando, portanto, a que a intensidade do evento gerador de uma dada cheia também se reduza.

O SCS fornece uma expressão para a determinação do tempo de concentração em função do número de escoamento:

$$t_c = \frac{100}{0,3048^{0,8}} \cdot \frac{L^{0,8} \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0,7}}{1900 \cdot S_m^{0,5}} \quad \text{Equação (3.15)}$$

em que  $t_c$  representa o tempo de concentração (expresso em minutos),  $L$  o comprimento da linha de água (expresso em metros),  $S_m$  diz respeito ao declive médio da bacia hidrográfica (expresso em percentagem) e  $CN$  o número de escoamento.

Ambos, comprimento da linha de água e declive médio, são dados de obtenção expedita em SIG.

### 3.4.7 Modelação do Escoamento Directo

Neste sub-capítulo descrevem-se os modelos que simulam os processos conducentes à geração do escoamento directo, tendo por base a precipitação efectiva na bacia hidrográfica.

Dois tipos de modelos permitem simular a transformação acima referida:

- Modelo do Hidrograma Unitário
- Modelo da Onda Cinemática

O modelo do hidrograma unitário é, nas suas mais variadas formas, um modelo empírico. Procura, assim, estabelecer uma relação causal entre a precipitação efectiva e o escoamento directo. As equações e parâmetros que o constituem têm um significado físico limitado, procurando-se, antes, uma optimização por calibração.

O modelo da onda cinemática é um modelo que procura, tanto quanto possível, representar mecanismos físicos que governam o movimento do excesso de precipitação (precipitação efectiva) sobre a superfície e em pequenos canais colectores da bacia hidrográfica. Trata-se, assim, de um modelo conceptual.

No âmbito do presente trabalho o modelo da onda cinemática afigura-se como mais adequado, uma vez que a sua parametrização permite um maior acompanhamento da realidade não linear que representa uma bacia hidrográfica e permite, simultaneamente, fazer face à ausência de dados registados de precipitação e de escoamento.

Procura-se fazer nos subcapítulos seguintes uma caracterização sumária dos princípios subjacentes ao hidrograma unitário, casos de aplicação e diferentes modelos de hidrograma unitário disponíveis. Elabora-se uma descrição mais detalhada do modelo da onda cinemática.

#### **3.4.7.1 Modelo do Hidrograma Unitário**

O hidrograma unitário de uma secção de um curso de água, para uma chuvada com uma dada duração, é o hidrograma que corresponde a uma precipitação útil unitária (1 mm, 1 cm ou 1 polegada) com intensidade constante no tempo e aproximadamente uniforme sobre toda a bacia hidrográfica.

O hidrograma unitário assenta em dois princípios:

- Princípio da proporcionalidade (Figura 3.15);
- Princípio da sobreposição (Figura 3.16).

O princípio da proporcionalidade prevê que se possa obter o hidrograma do escoamento directo numa dada secção da rede hidrográfica, provocado por uma precipitação útil de  $n$  unidades, multiplicando por  $n$  as ordenadas do respectivo hidrograma unitário.

O princípio da sobreposição, tendo em conta a proporcionalidade do hidrograma unitário, permite a obtenção do hidrograma do escoamento directo numa dada secção do curso de água pela sobreposição, com o devido desfasamento, dos hidrogramas que resultam de uma sucessão de vários acontecimentos de precipitação útil, cada um deles com igual duração.

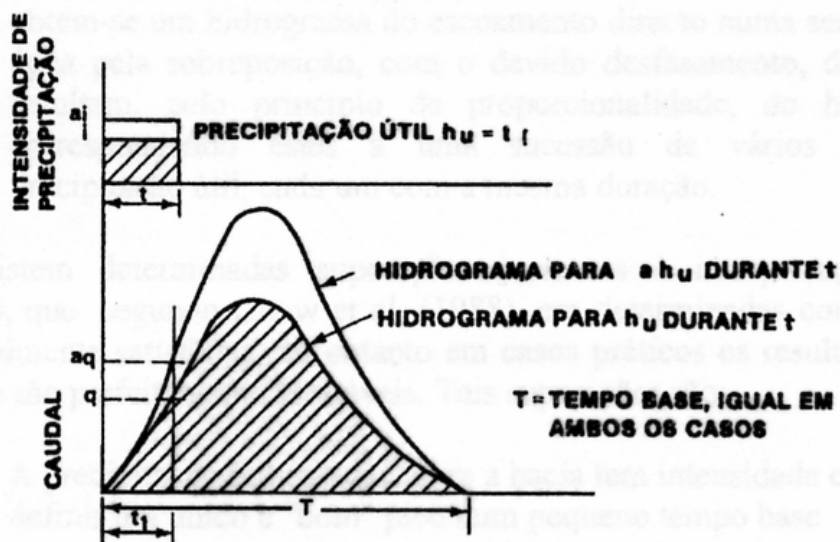


Figura 3.15 – Primeiro princípio básico do hidrograma unitário: Princípio da proporcionalidade (Extraído de Lencastre e Franco, 1984).

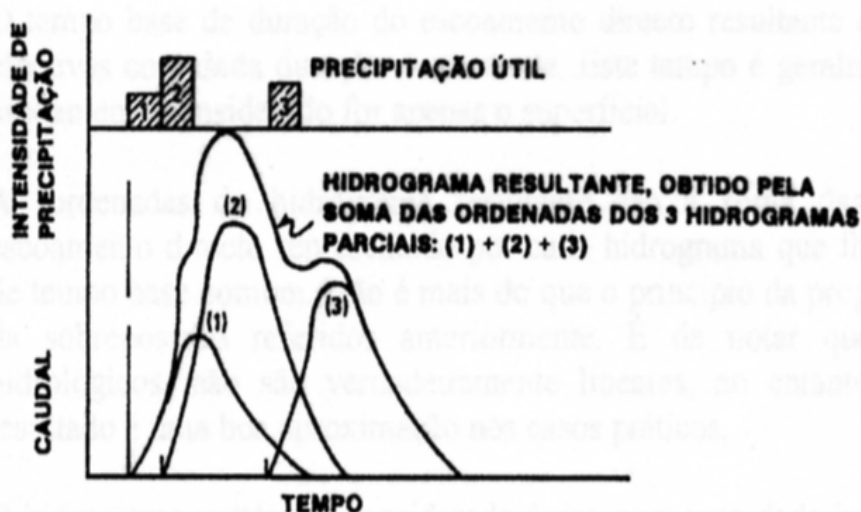


Figura 3.16 – Segundo princípio básico do hidrograma unitário: Princípio da sobreposição (Extraído de Lencastre e Franco, 1984).

Algumas das suposições inerentes à interpretação do hidrograma unitário, segundo Chow *et al.*, 1988, em determinadas condições naturais não são totalmente satisfeitas. Tais suposições são:

- A precipitação útil que cai sobre a bacia tem uma intensidade constante, de modo a que se possa definir um único, e inequívoco, pico para um pequeno tempo base.
- A mesma precipitação tem uma distribuição uniforme por toda a bacia. Tal consideração só é possível admitindo tratar-se de uma pequena bacia hidrográfica.
- O tempo base de duração do escoamento directo resultante de precipitações efectivas com igual duração é constante.
- O hidrograma unitário é considerado único para uma determinada bacia e invariável em relação ao tempo.

A determinação do hidrograma do escoamento directo originado por uma chuvada de determinada duração requer, por vezes, a conversão do hidrograma unitário disponível definido para essa duração, num outro relativo a uma duração diferente.

O hidrograma unitário corresponde, assim, a uma resposta da bacia hidrográfica à precipitação efectiva unitária com uma determinada duração. De referir que a definição deste tem por base uma intensidade da precipitação útil constante no tempo e uniforme sobre a bacia. Se estas condições (entre as citadas anteriormente) não forem satisfeitas o hidrograma será afectado pela distribuição temporal e espacial da respectiva chuvada.

Quando se pretende obter um hidrograma unitário correspondente a uma precipitação útil de determinada duração, com base no hidrograma correspondente a uma precipitação útil observada de duração diferente, utiliza-se o método do hidrograma em S. Este resulta de uma abstracção, onde se considera uma chuvada de intensidade constante e duração infinita sobre a bacia hidrográfica, podendo, assim, ser obtido pela soma de hidrogramas unitários (princípio da sobreposição) cada um com duração igual à duração da precipitação útil observada e desfasados da duração da precipitação, do hidrograma precedente (Figura 3.17) (Paulo, 1998).

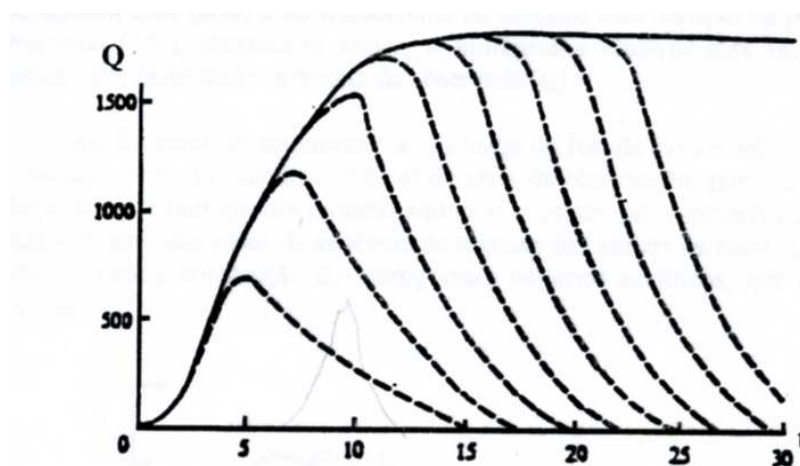


Figura 3.17 – Hidrograma em S (Extraído de Paulo, 1998)

A forma de determinação do hidrograma unitário afluída anteriormente pressupõe registos de caudais com um número razoável de anos de observação e como tal a sua aplicação a diversos casos para os quais estes dados não se encontrem disponíveis torna-se difícil. Quando se pretende determinar o hidrograma originado por uma dada precipitação útil, numa dada secção de um curso de água, onde não existam dados hidrométricos, recorre-se à construção de hidrogramas unitários sintéticos.

Hidrogramas designados de paramétricos, por meio de uma ou mais equações, cada uma das quais com o seu conjunto de parâmetros, permitem a obtenção das ordenadas do hidrograma unitário. Por exemplo, aproximando a forma do hidrograma unitário com a forma de um triângulo, as ordenadas podem ser descritas especificando as seguintes características:

- Magnitude do pico do hidrograma unitário
- Tempo até à ocorrência do pico do hidrograma unitário

O volume do hidrograma unitário é conhecido – será uma unidade de precipitação multiplicada pela área da bacia hidrográfica ( $1 \text{ mm} = 1 \text{ l/m}^2$ ;  $1 \text{ l/m}^2 \times n \text{ m}^2 = n \text{ l}$ ). O conhecimento deste volume estabelece (graficamente) o tempo de base do hidrograma unitário. Com os valores do pico, tempo até que este se atinja e tempo base, todas as ordenadas referentes à curva ascendente e descendente do hidrograma unitário podem ser determinadas por processos do tipo em S ou similares, eventualmente, mesmo, por recurso a métodos informáticos. Outros hidrogramas unitários paramétricos são mais complexos, tendo, no entanto, o mesmo princípio subjacente (HEC, 2000 b).

Os hidrogramas sintéticos relacionam características mensuráveis da bacia hidrográfica com o estabelecimento do valor dos parâmetros envolvidos nos hidrogramas paramétricos. Ao utilizar esta relação, torna-se possível estimar tais valores para qualquer bacia e sobre diferentes condições

Uma vez que a utilização desta forma de modelação do escoamento directo não será objecto de utilização no presente estudo, apresenta-se, de seguida, o conjunto de hidrogramas sintéticos actualmente mais utilizado em modelação hidrológica, tecendo-se breves comentários acerca das suas particularidades. Estes são:

- Hidrograma Unitário de Snyder;
- Hidrograma Unitário do *Soil Conservation Service*;
- Hidrograma Unitário de Clark;
- Hidrograma Unitário de Clark Modificado.

De uma forma sumária, Chow *et al.*, 1988, sugerem que os hidrogramas unitários sintéticos podem ser agrupados em três categorias. Assim:

- Os que relacionam as características da bacia hidrográfica com características do hidrograma unitário, sendo o hidrograma de Snyder um exemplo;
- Os que são adimensionais, sendo o hidrograma unitário do *Soil Conservation Service* um exemplo;
- Os que são quasi-conceptuais, baseando-se nas características da bacia bem como na sua capacidade de armazenamento. É o caso do hidrograma unitário de Clark e sua posterior modificação para aplicação a modelos hidrológicos distribuídos.

#### 3.4.7.2 Modelo da Onda Cinemática

Embora o modelo do hidrograma unitário seja frequentemente aplicado, e com sucesso, em estudos de modelação hidrológica, torna-se difícil associar propriedades físicas de uma bacia hidrográfica aos parâmetros requeridos ao desenvolvimento desse hidrograma. Quando a total ausência de dados relativos à bacia em estudo acresce a este facto, nomeadamente de caudais

observados, esta lacuna torna-se ainda mais evidente, já que uma extensa calibração deixa de ser possível.

A rápida urbanização das bacias hidrográficas que envolvem áreas metropolitanas levou ao desenvolvimento de modelos capazes de responder a essas mesmas alterações, de uma forma expedita e sem a necessidade da sua redefinição ou calibração exaustiva. Torna-se, neste contexto, igualmente desejável que o modelo, e quem o gere, seja capaz de reproduzir características complexas relativas à geração de escoamento, antes a estar limitado a respostas lineares como as contempladas no modelo do hidrograma unitário.

O modelo da Onda Cinemática, como anteriormente referido, é um modelo conceptual que procura atender às necessidades enunciadas. Este modelo é ainda pouco utilizado em Portugal, embora, nas suas variadas formas, o seja a nível internacional, sendo portanto alvo de uma exposição mais detalhada ao longo do presente sub-capítulo.

As principais particularidades deste modelo prendem-se com:

1. Embora simples na sua formulação base é possível a sua adaptação às diferentes realidades que compõem uma bacia hidrográfica, mesmo que em permanente alteração;
2. Para propósitos de modelação do escoamento não permanente sobre a superfície de uma bacia hidrográfica, imaginar-se-ia um modelo com grandes requisitos em termos de parâmetros que se ajustassem às complexidades de tal movimento. O modelo da Onda Cinemática relaciona as características de uma bacia hidrográfica e do seu escoamento com dois parâmetros,  $\alpha$  e  $m$ .
3. A sua solução recorre a métodos numéricos que aproximam a resposta ao comportamento dos fluidos na bacia hidrográfica. Necessariamente, algumas simplificações matemáticas têm de ser introduzidas dada a complexidade de um sistema natural, ou semi-natural, de drenagem como o é uma bacia hidrográfica. O modelo da onda cinemática provou ser bastante fiável e preciso para pequenas bacias (30 km<sup>2</sup>), tanto no que respeita à simulação do escoamento à sua superfície, como do escoamento já em canal (Maidment, 1993). Não obstante, é hoje aplicado a todo o tipo de dimensões de bacias hidrográficas.

Muitos são os fenómenos naturais cujo comportamento exhibe características de uma onda. Os fenómenos de escoamento, dependendo da natureza das partículas que os compõem, podem ser divididos em escoamentos de partículas discretas e em escoamentos de partículas contínuas. Exemplo desta última categoria são o escoamento à superfície, o escoamento de cheia, o escoamento de base, o degelo, o movimento de glaciares, infiltração, evaporação, transporte de solutos, permuta iónica e o transporte cromatográfico (Singh, 2001)

Desde o seu desenvolvimento por Lighthill e Whitham, 1955, a teoria da onda cinemática encontrou na hidrologia um vasto campo de aplicação, tendo sido aplicada à modelação de

escoamento directo, movimentação de água em solos, escoamento em macroporos, problemas de erosão e transporte de sedimentos, transporte de solutos, sedimentação, entre outros.

Sendo a Cinemática definida como o estudo do movimento, excluindo as influencias da massa e força, por contraste com a Dinâmica, onde estas influencias são incluídas. As ondas de cheia podem ser identificadas como dois fenómenos de onda: a onda dinâmica e a onda cinemática. Embora estes dois tipos de onda estejam presentes num instante inicial, aquando da ocorrência de um evento de cheia, as características das bacias hidrográficas levam a que, geralmente, as últimas sejam dominantes (Singh, 2004).

Quando a pressão e inércia são relevantes, o movimento é governado por ondas dinâmicas. Quando estas duas forças não são importantes para o movimento da onda, o escoamento é dominado por ondas cinemáticas. Esta ultima condição de escoamento, em que a componente do peso (força exercida na direcção do eixo do canal devido ao peso do fluido escoando para jusante em resultado da acção da gravidade) é aproximadamente equiparada pelas forças de resistência devidas à fricção do leito, é geralmente expressa pela equação de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S_o^{1/2} \cdot A \quad \text{Equação de Manning (3.16)}$$

onde,  $Q$  representa o valor do escoamento, expresso em  $m^3/s$ ,  $R$  representa o raio hidráulico, e  $n$  o coeficiente de rugosidade de Manning, expressos em  $m^{2/3}$  e  $m^{-1/3}s$ , respectivamente. O raio hidráulico é uma grandeza linear característica do escoamento, definida pelo quociente da área molhada pelo perímetro molhado da secção do escoamento.  $S_o$  representa o declive da superfície, expresso em  $m/m$ , e  $A$  a área da secção em análise, expresso em  $m^2$ .

Escoamentos desta natureza (predominantemente cinemáticos) não sofrem aceleração significativa, permanecendo uniformes, e não sendo assim perceptível a formação de uma onda a um observador externo aquando da passagem da onda de cheia. Este observador eventualmente descreveria o fenómeno como um aumento uniforme do nível de água, seguido de diminuição, ao longo de um intervalo de tempo relativamente longo, dependendo este período da área da bacia específica em análise (HEC, 1993). Os escoamentos cinemáticos são geralmente classificados como sendo gradualmente variados, i.e., o vector velocidade varia, para uma dada secção em estudo, no tempo e no espaço de uma forma gradual.

As ondas dinâmicas atingem valores de velocidade maiores e atenuam-se mais rapidamente. Apesar de qualquer perturbação no escoamento enviar um sinal para jusante à velocidade de pequenas ondas gravíticas, este sinal será demasiado fraco para que seja detectável a uma distância considerável nessa mesma direcção. Assim, uma alteração significativa do escoamento será transmitida a uma velocidade muito menor, podendo esta ser aproximada pela velocidade da onda cinemática. Neste contexto, a onda cinemática representa as alterações das características da descarga, velocidade e elevação do nível de água com o tempo, durante o evento de cheia, em

qualquer ponto da bacia hidrográfica. Seja o escoamento ainda superficial, ou constitua já um escoamento em canal aberto.

A velocidade das pequenas ondas gravíticas que ocorrem em canais abertos rasos é muitas vezes designada por celeridade. A razão entre a velocidade do escoamento e a celeridade constitui o número de Froude (Equação (3.17)). O número de Froude quantifica a razão entre as forças de inércia e a força da gravidade.

$$F = \frac{U}{\sqrt{g \cdot y}} \quad \text{Equação (3.17)}$$

onde  $F$  representa o número de Froude,  $y$  representa a altura média do escoamento, expresso em m,  $U$  é o valor da velocidade média do escoamento, expresso em m/s, e  $g$  representa a aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ).

Escoamentos com um número de Froude superiores a um são classificados como supercríticos ou rápidos, sendo as ondas superficiais incapazes de se deslocarem para montante dado que a velocidade de escoamento é maior que a celeridade da mesma onda (Chow *et al.*, 1988). De facto, segundo Lighthill & Whitham, 1955, para valores do número de Froude inferiores a dois, verifica-se um decaimento exponencial em relação ao tempo das ondas dinâmicas. Este facto traduz-se fisicamente pela não visualização de uma onda aquando do evento de cheia, como referido, mas unicamente de uma subida do nível de água, seguida pela respectiva descida.

A mecânica do escoamento em regime variável e em canal aberto pode ser expressa em termos matemáticos pelas equações desenvolvidas em 1870 por St. Venant. Tratam-se de equações diferenciais derivadas dos princípios básicos da conservação de massa e momento.

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = q_l + I_{pe} \quad \text{Equação da continuidade (3.18)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial y}{\partial x} = g \cdot (S_o - S_t) - q_l \cdot \frac{(u - v)}{y} \quad \text{Equação da conservação da quantidade de movimento (3.19)}$$

onde:

$g$  = aceleração da gravidade ( $\text{ms}^2$ )

$y$  = altura do escoamento (m)

$q$  = caudal por unidade comprimento de canal ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ )

$x$  = distância medida na direcção de jusante (m)

$t$  = tempo (s)

$u$  = componente do eixo dos  $xx$  do vector velocidade média

$I_{pe}$  = intensidade da precipitação efectiva ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ )

$S_o$  = declive do leito (m/m)

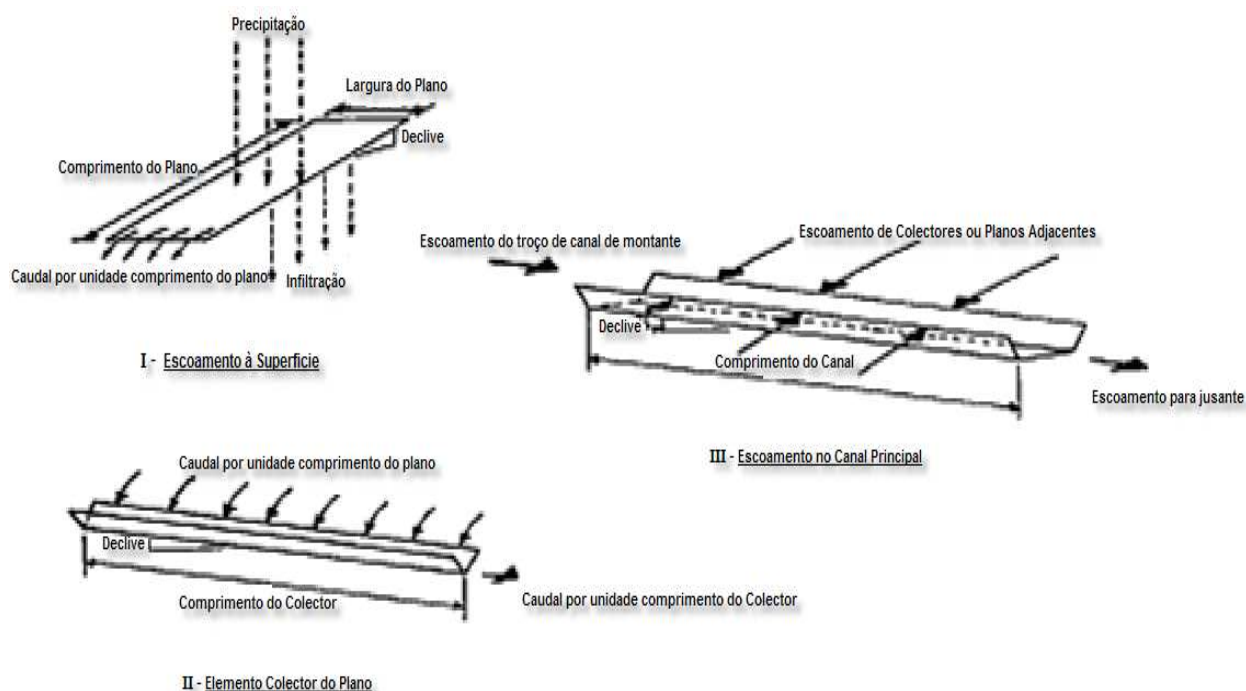
$S_t$  = atrito, como definido pela equação de Manning

$q_l$  = caudal lateral por unidade de comprimento de canal, relativo à área drenante ( $m^3/s/m^2$ )

$v$  = componente do eixo dos xx do vector velocidade média do escoamento lateral (valor geralmente desprezável)

A aplicação do modelo da onda cinemática a uma bacia hidrográfica envolve a simulação da sua natural complexidade tendo por base um conjunto de elementos simples. Estes são geralmente os planos onde se processa o escoamento sobre o terreno, os pequenos colectores onde se vai processando a entrada lateral e uniforme da água escoada sobre o terreno e o canal principal, correspondendo este a uma verdadeira porção da linha de água (Figura 3.18). Uma combinação adequada destes elementos provou ser representativa do comportamento de uma bacia hidrográfica (HEC, 1993).

Uma aplicação bem sucedida desta abordagem começa pela descrição do escoamento sobre os referidos elementos planares idealizados, tendo definidas algumas condições de fronteira. Estas condições de fronteira dizem respeito às condições em que se processa o escoamento e são definidas pelo modelador. Repetindo esta caracterização para os restantes elementos enumerados, torna-se possível estabelecer a combinação de elementos representativa da bacia hidrográfica e assim descrever a sua resposta face a um evento de precipitação. A Figura 3.19 sintetiza a relação entre os três diferentes tipos de elementos.



**Figura 3.18** – Elementos usados no processo de cálculo do modelo da onda cinemática  
(Adaptado de HEC, 1993)

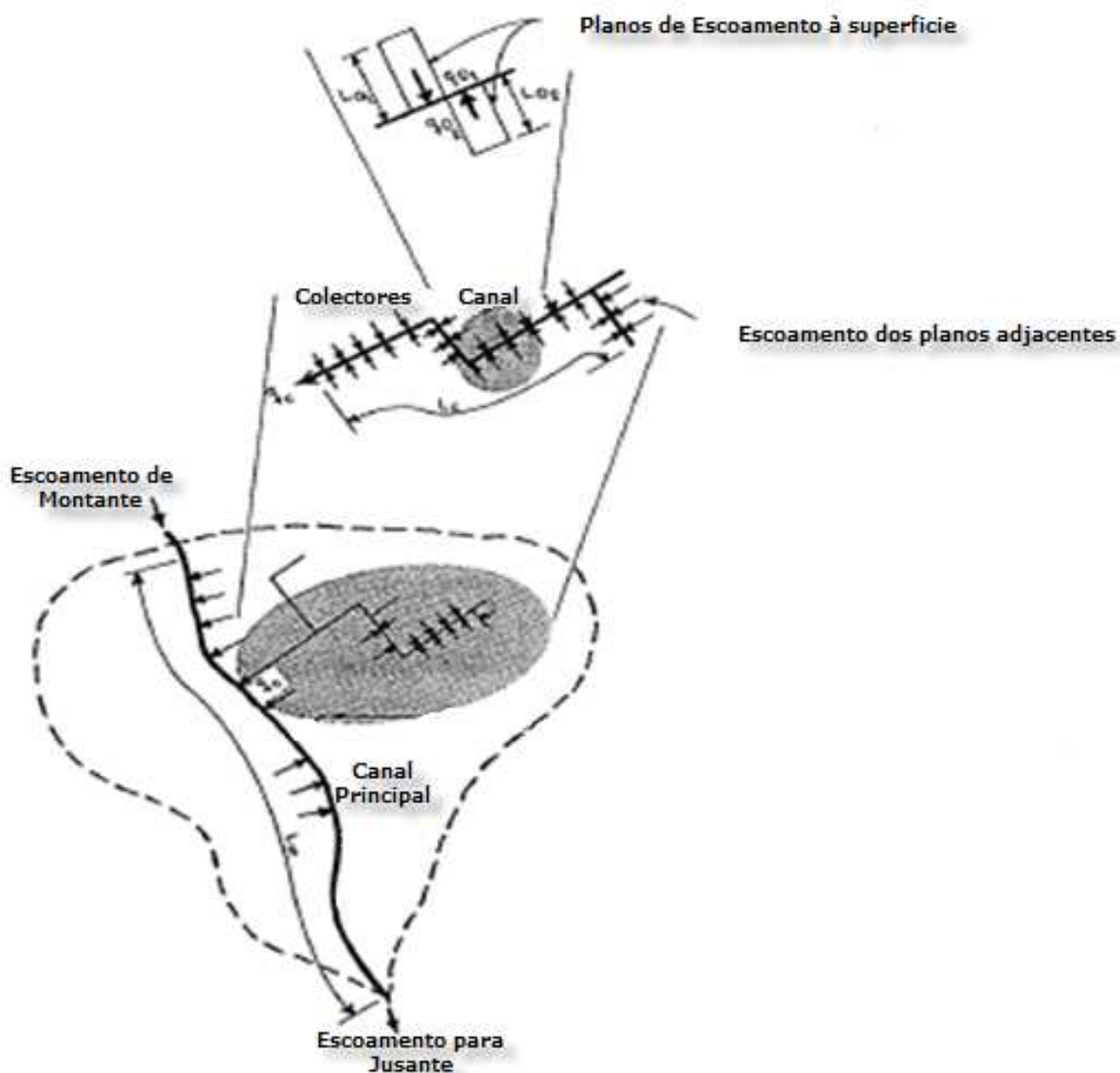
Note-se que o escoamento superficial é tratado separadamente do escoamento em canal dada a pequena altura de água no primeiro caso. Assim, a forma das equações que regem o movimento da água à superfície difere da forma geralmente aplicada ao movimento em canal. Os valores de

escoamento para os diferentes elementos são calculados separadamente e depois combinados para que se preserve a continuidade do escoamento entre eles (Singh, 2004).

Recordando que as ondas cinemáticas ocorrem quando os termos dinâmicos da equação da conservação da quantidade de movimento se tornam negligenciáveis, a assunção de que o declive do leito iguala o atrito do mesmo torna-se válida. Nestas condições a descarga pode ser descrita como função da altura do escoamento, para qualquer ponto no espaço ou no tempo. Assim, como resultado da simplificação da equação da conservação da quantidade de movimento de St. Venant, obtém-se a equação geral do modelo da onda cinemática:

$$Q = \alpha \cdot Y^m \quad \text{Equação (3.20)}$$

em que  $Q$  representa a descarga em  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\alpha$  e  $m$  são parâmetros característicos do modelo, estando directamente relacionados com as características da bacia e do escoamento.



**Figura 3.19** – Relação entre os elementos representativos do escoamento numa bacia hidrográfica de acordo com o modelo da onda cinemática (Adaptado de HEC, 1993).

De acordo com Singh, 2004, a componente dinâmica envolvida pode ser considerada como suficientemente atenuada se:

$$k = \frac{S_o \cdot L}{y \cdot F^2} > 10 \quad \text{Equação (3.21)}$$

em que  $F$  representa o número de Froude,  $y$  representa a altura média do escoamento (m),  $S_o$  corresponde à inclinação do leito (%),  $L$  o comprimento do plano (m) e  $k$  é o número de escoamento cinemático adimensional.

Uma representação matemática rigorosa do escoamento entre os diferentes elementos resultaria numa necessidade exagerada de detalhe espacial e temporal e, como tal, num sistema de equações simultâneas de difícil processamento (HEC, 1993). Deste modo, são necessariamente introduzidas algumas simplificações às Equações (3.18) e (3.19). A forma da onda cinemática das equações de St. Venant providencia uma descrição simplificada do sistema físico em termos de superfícies e canais com propriedades homogéneas (Equação (3.20)). A importância deste conceito de escoamento superficial reside na distribuição de água sobre uma área razoavelmente vasta e a profundidades mínimas, até atingir um canal, efémero que este possa ser. O conjunto destes pequenos canais escoam, por sua vez, para o canal principal da rede de drenagem da bacia hidrográfica. As suas diferentes formulações matemáticas são seguidamente apresentadas.

Resolvendo a equação de Manning (Equação (3.16)) admitindo o raio hidráulico e a secção,  $R$  e  $A$ , como sendo simplesmente  $(y_o x l) / l$  e  $y_o x l$ , dada a reduzida altura do escoamento e a elevada extensão dos planos, resulta a Equação (3.22), onde  $q_o$  representa o escoamento do plano ( $m^3/s$ ) por unidade de comprimento deste (m),  $S_o$  o declive da superfície (m/m),  $N$  a rugosidade do plano, constante do Anexo A, e  $y_o$  a profundidade média do escoamento para o mesmo (m). Esta equação constitui uma reformulação da equação geral do modelo da onda cinemática para o escoamento sobre a superfície (Equação (3.23)), sendo  $\alpha_o = N S_o^{1/2}$  e  $m_o = 5/3$ .

$$q_o = \frac{\sqrt{S_o}}{N} \cdot y_o^{5/3} \quad \text{Equação (3.22)}$$

$$q_o = \alpha_o \cdot y_o^{m_o} \quad \text{Equação (3.23)}$$

Uma vez que permanecem duas incógnitas nesta equação (Equação (3.23)), torna-se necessária a introdução de uma enunciação da equação da continuidade (Equação (3.18)) que estabeleça uma relação com a precipitação efectiva (valor conhecido), assim:

$$\frac{\partial y_o}{\partial t} + \frac{\partial q_o}{\partial x} = I_{Pe} \quad \text{Equação (3.24)}$$

onde:

$q_0$  - escoamento do plano por unidade de comprimento deste ( $m^3/s/m$ );

$y_0$  - corresponde à profundidade média do escoamento no plano;

$I_{pe}$  = intensidade da precipitação efectiva ( $m^3/s/m^2$ );

$x$  = comprimento da superfície em estudo (m);

$t$  = tempo (s).

O sistema de Equações (3.23) e (3.24) constitui a formulação matemática do modelo da onda cinemática para o escoamento à superfície do terreno. Substituindo a Equação (3.23) na Equação (3.24) resulta a Equação (3.25).

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} + \alpha_o m_o y_o^{(m_o-1)} \cdot \frac{\partial y_0}{\partial x} = I_{pe} \quad \text{Equação (3.25)}$$

Esta pode ser solucionada por forma a que se obtenha um valor de  $y_0$  em determinado ponto do espaço e num dado instante, e para uma determinada precipitação útil. Substituindo o valor de  $y_0$  obtido na Equação (3.22), é aproximado o valor da descarga,  $q_0$ , do respectivo plano.

Para o sistema de colectores e linha de água em si, o uso de formas trapezoidais ou circulares verifica-se ser representativo da rede de canais que constitui uma bacia hidrográfica. Os escoamentos que entram nos colectores e canais podem provir de secções de montante ou de superfícies laterais (planos) adjacentes. Este sistema de canais é bem descrito pelo seu declive, comprimento, forma e área das secções transversais e pelo valor da rugosidade de Manning,  $n$ , estando estes últimos valores tabelados no Anexo B de acordo com Chow *et al.*, 1988.

As equações da onda cinemática que governam o escoamento em colectores e em canais são:

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{\partial Q_c}{\partial x} = q_0 \quad \text{Equação (3.26)}$$

$$Q_c = \alpha_c \cdot A_c^{m_c} \quad \text{Equação (3.27)}$$

onde:

$A_c$  - área da secção em estudo ( $m^2$ );

$Q_c$  - descarga (incluindo a que possa advir de montante) ( $m^3/s$ );

$q_0$  - escoamento lateral proveniente dos planos adjacentes por unidade de comprimento do canal ( $m^3/s/m$ );

$t$  - tempo (s);

$x$  - distância ao longo do talvegue (m);

$\alpha_c, m_c$  - parâmetros da onda cinemática para uma determinada forma de secção transversal, declive e rugosidade.

Em zonas urbanas existem, fundamentalmente, dois tipos de superfícies: permeáveis e impermeáveis. A mecânica do escoamento sobre os dois tipos de superfícies é similar, contudo os declives, comprimento do escoamento (distância que uma gota de água que cai num plano percorre até atingir um primeiro colector/canal), rugosidades e precipitação efectiva vão diferir substancialmente. A percentagem da área que cada um deste tipo de superfícies cobre na respectiva bacia hidrográfica é estipulada pelo modelador, permitindo, assim, levar este dado em linha de conta quando se desenrolam alterações na bacia hidrográfica. O modelo desenvolve escoamento, com base na precipitação efectiva, para ambas as superfícies. Após o movimento de água se processar sobre a superfície de acordo com as suas devidas diferenças, tem início a entrada desta uniformemente ao longo do comprimento do sistema de colectores (Figura 3.18). Este sistema é na realidade o conjunto de regatos, canais, sarjetas, sumidouros, rede de drenagem pluvial e outros. Uma vez nestes colectores (naturais ou artificiais) o escoamento move-se por eles, recolhendo adicionalmente mais escoamento lateral dos sucessivos planos adjacentes. Finalmente o escoamento do conjunto de colectores atinge a rede fluvial principal na qual pode ser processado como em canal aberto. A Figura 3.20 resume o exposto, procurando dar uma tradução física do conceito do modelo da onda cinemática quando aplicado a uma bacia hidrográfica urbana, onde a sua componente natural terá, necessariamente, de ser modelada a par da sua componente antropogénica.

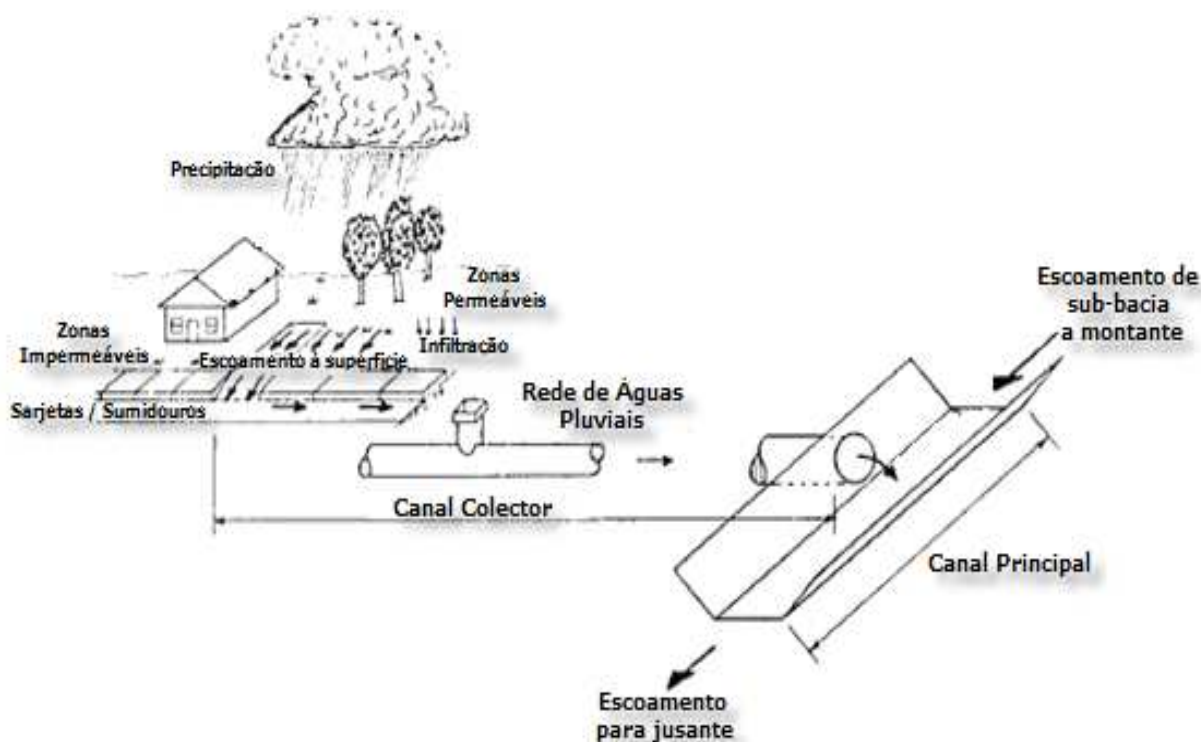


Figura 3.20 – Padrão de drenagem urbano típico (adaptado de HEC, 1993)

Aquando da aplicação do modelo da onda cinemática ao caso de estudo serão feitas considerações mais aprofundadas no que respeita à parameterização e métodos numéricos empregues no solucionar das equações apresentadas.

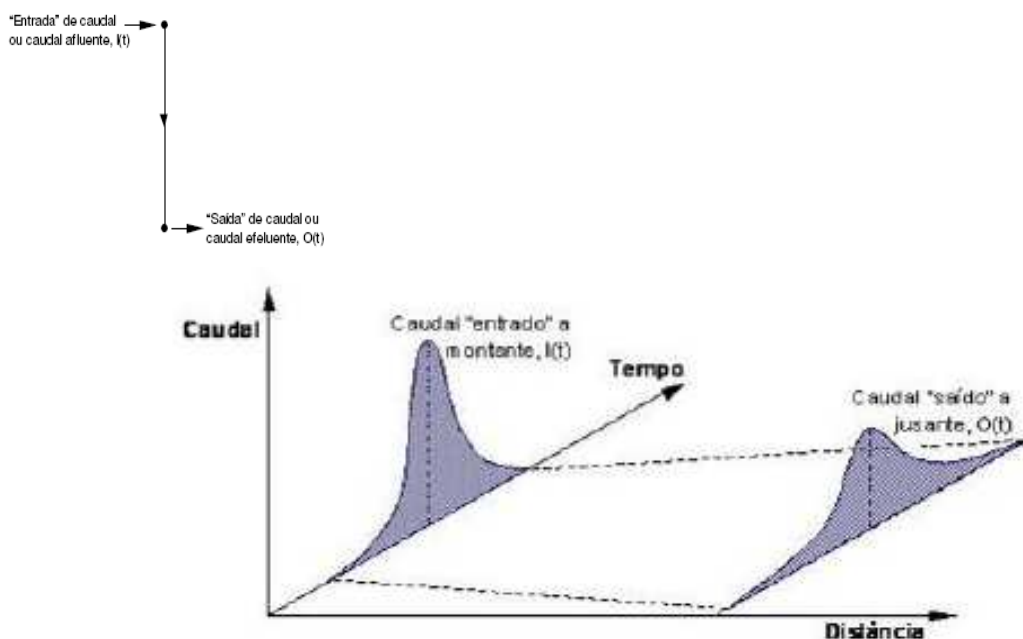
### 3.4.8 Propagação de Hidrogramas de Cheia em Trechos de Canal

Descreve-se neste capítulo o conjunto de modelos capazes de simularem um hidrograma de jusante, dado um hidrograma de montante como condição fronteira.

Como exposto no capítulo 3.4.7.2 o modelo da onda cinemática insere-se neste conjunto de modelos, uma vez que contempla uma formulação destinada exclusivamente à simulação do escoamento em canal aberto (Equações (3.26) e (3.27)). Não obstante, nenhum outro dos modelos de propagação de um hidrograma permite, paralelamente, sob diferente formulação, simular o comportamento da precipitação sobre a superfície de uma bacia hidrográfica.

Os modelos de propagação mais utilizados constam da seguinte lista:

- Modelo do Tempo de Resposta (*Lag*)
- Modelo de Puls
- Modelo da Onda Cinemática
- Modelo de Muskingum
- Modelo de Muskingum – Cunge



**Figura 3.21** – Representação esquemática de um modelo de propagação (Extraído de Portela, 2006 a).

De acordo com Portela, 2006 a, este conjunto de modelos pode ser classificado consoante consideram em cada instante que:

- a superfície livre é horizontal – caso do modelo Puls aplicado ao amortecimento de ondas de cheia em albufeiras;

- em consequência da propagação da onda de cheia, a superfície livre não é horizontal, apresentando um certo declive médio – modelo de Muskingum;
- o sistema ao longo do qual ocorre a propagação é constituído por sucessivos reservatórios lineares, ligados por trechos rectos de canal, por sua vez caracterizados por uma função de resposta do tipo unitário (impulso), sendo a relação entre os caudais afluente e efluente definida por recurso a um integral de convolução.

Os modelos de Muskingum e de Muskingum-Cunge são, de entre o conjunto referido, os com aplicação mais generalizada à propagação de ondas de cheia em canais.

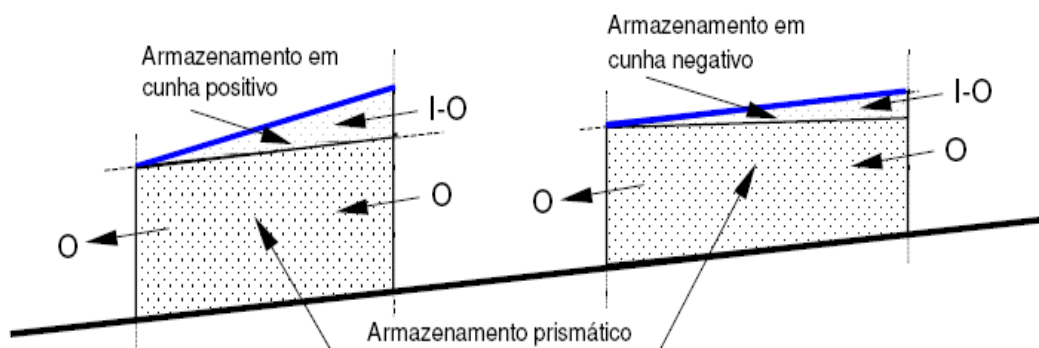
O modelo de Muskingum recorre à equação da continuidade expressa sob a forma da equação de armazenamento, Equação (3.28), e considera que o armazenamento no trecho de canal resulta da soma de dois armazenamentos, um prismático e outro dito em cunha (Figura 3.22).

$$\frac{\partial S}{\partial t} = I - O \Leftrightarrow \partial S = I \partial t - O \partial t \quad \text{Equação (3.28)}$$

onde:

- $t$  – tempo (s);
- $I$  – caudal afluente ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- $O$  – caudal efluente ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- $S$  – armazenamento ( $\text{m}^3$ ).

O armazenamento prismático é o que corresponderia à configuração da superfície livre em regime permanente e o armazenamento em cunha ao volume armazenado entre a anterior configuração e a configuração da superfície livre durante a ocorrência da cheia. Na fase de aumento das cotas da superfície livre por aumento do caudal de cheia o armazenamento em cunha é positivo, adicionando-se ao armazenamento prismático, e na fase de diminuição das cotas de superfície livre após a passagem do caudal de ponta de cheia, negativo, subtraindo-se ao armazenamento prismático.



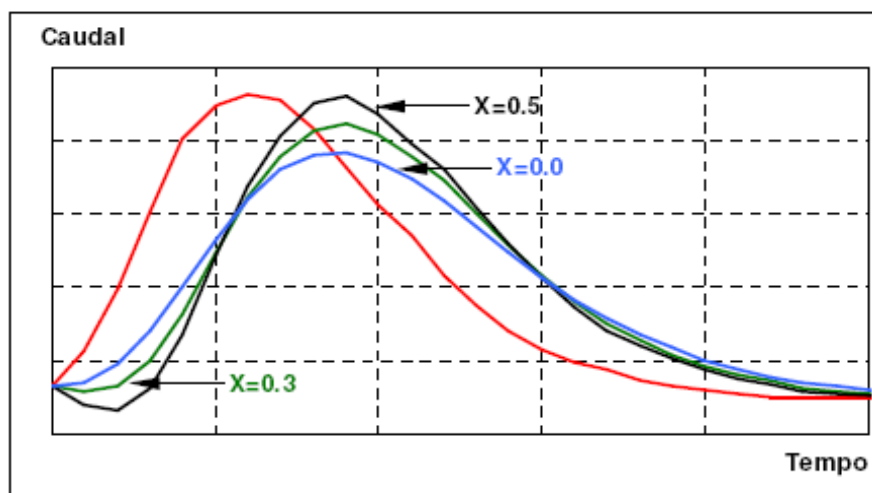
**Figura 3.22** – Modelo de Muskingum. Armazenamento prismático e em cunha  
(extraída de Portela, 2006 a)

Em cada trecho de canal a que é aplicado o método, o armazenamento prismático é dado pelo produto do caudal efluente do trecho pelo tempo de percurso no trecho,  $k$ . O armazenamento em cunha é dado por uma diferença ponderada entre os caudais afluentes na secção de montante do trecho e efluente na de jusante, diferença também multiplicada pelo tempo de percurso no trecho de modo a obter-se um volume, i.e.:

$$S = kO + kx \cdot (I - O) = k \cdot [xI + (1 - x) \cdot O] \quad \text{Equação (3.29)}$$

em que  $x$  é o factor de ponderação.

Se o armazenamento no trecho de canal for essencialmente controlado por condições de jusante, dependendo, assim, do caudal efluente, ter-se-á  $x=0$ . Nestas condições,  $S=kO$ , relação que define um reservatório linear. Se  $x=0.5$ , os caudais afluentes e efluentes tem igual peso e a propagação da onda de cheia ocorre sem atenuação, ou seja, a onda sofre essencialmente uma translação ao propagar-se no trecho de canal (Figura 3.23).



**Figura 3.23** – Modelo de Muskingum. Efeito do parâmetro  $x$  na atenuação da onda de cheia ao propagar-se num trecho de canal (adaptada de HEC, 2000 b).

O parâmetro  $x$  introduz, então, o efeito do amortecimento da onda durante a sua propagação no trecho de canal. Tal amortecimento traduz-se na redução do caudal de ponta do hidrograma efluente no extremo de jusante do trecho relativamente ao caudal de ponta do hidrograma afluente no extremo de montante com consequente aumento do tempo de base daquele hidrograma relativamente ao tempo de base deste último hidrograma.

O parâmetro  $k$  pode ser entendido como o tempo de percurso da onda de cheia ao longo do trecho de canal, tendo em conta a translação de tal onda.

Embora popular e de fácil utilização, o modelo de Muskingum inclui parâmetros que não são fisicamente baseados e, como tal, unicamente estimáveis por calibração. O modelo de Muskingum – Cunge, uma extensão do anterior modelo, ultrapassa estas limitações.

A seguinte equação rege, então, o modelo de Muskingum – Cunge (Boroughs e Zagona, 2001):

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_0 Q_j^{n+1} + C_1 Q_j^n + C_2 Q_{j+1}^n \quad \text{Equação (3.30)}$$

onde  $Q$  é o caudal na secção  $j$ , ou  $j+1$ , no instante  $n$ , ou  $n+1$ , e os coeficientes  $C$  são dados por:

$$C_0 = \frac{\Delta t/K - 2x}{2 \cdot (1-x) + \Delta t/K} \quad \text{Equação (3.31)}$$

$$C_1 = \frac{\Delta t/K + 2x}{2 \cdot (1-x) + \Delta t/K} \quad \text{Equação (3.32)}$$

$$C_2 = \frac{2 \cdot (1-x) - \Delta t/K}{2 \cdot (1-x) + \Delta t/K} \quad \text{Equação (3.33)}$$

sendo:

$$k = \frac{\Delta x}{c} \quad \text{Equação (3.34)}$$

; e:

$$x = 1/2 \cdot \left(1 - \frac{q_o}{ic\Delta x}\right) \quad \text{Equação (3.35)}$$

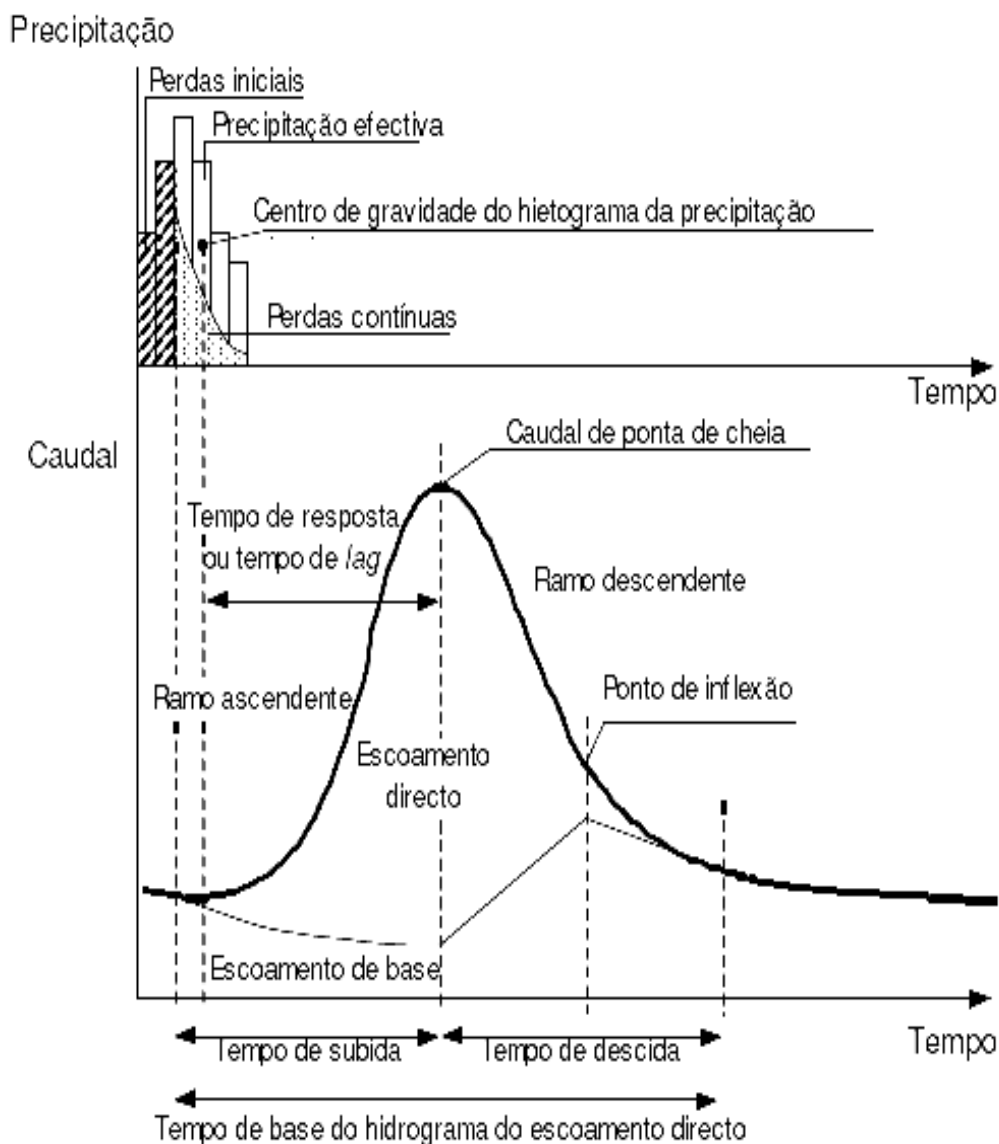
em que  $q_o$  é um caudal de referência por unidade de largura,  $c$ , a celeridade da onda cinemática e  $i$ , o declive do fundo do canal;  $k$ , representa o tempo que a onda de cheia demora a percorrer um trecho com comprimento  $\Delta x$  propagando-se com a celeridade  $c$ . A equação referente ao parâmetro  $x$  permite uma avaliação prévia do seu valor com base em características do canal. Esta última expressão pode ser reformulada:

$$x = 1/2 \cdot \left(1 - \frac{Q}{Bic\Delta x}\right) \quad \text{Equação (3.36)}$$

onde  $Q$  representa o caudal e  $B$  a largura da água à superfície do canal .

### 3.4.9 Resumo das Componentes do Hidrograma de Cheia e do correspondente Hietograma da Precipitação Total

Na Figura 3.24 resumem-se as componentes do hidrograma de cheia e do hietograma da precipitação que, directa ou indirectamente, decorrem da aplicação das noções e dos modelos apresentados nos capítulos anteriores. Tal figura pressupõe que a precipitação, não obstante poder variar no tempo, é uniforme sobre a bacia hidrográfica.



**Figura 3.24** – Componentes do hidrograma de cheia e do correspondente hietograma da precipitação (extraído de Quintela, 1996).

## **Capítulo 4**

### Os SIG e a Modelação Hidrológica

## 4.1 Introdução

No presente capítulo procura-se caracterizar o estado actual dos conhecimentos relativos à utilização de Sistemas de Informação Geográfica na modelação hidrológica.

Os SIG têm sido os grandes impulsionadores no desenvolvimento dos estudos na área da gestão dos recursos hídricos. Em tal gestão são necessárias várias simulações do comportamento da bacia hidrográfica em estudo para determinação, por exemplo, dos parâmetros fisiográficos, hidrológicos ou dos caudais de cheia.

A modelação hidrológica com base em SIG pode considerar-se como uma das áreas de grande potencial em matéria de exploração dos SIG no domínio da hidrologia. Segundo Maidment e Djokic, 2000, os modelos hidrológicos baseados em Sistemas de Informação Geográfica poderão ser melhorados desenvolvendo a sua análise em termos espaciais. Esta corresponde, de facto, à linha de desenvolvimento seguida nos últimos anos, tendo o uso dos SIG vindo a permitir uma maior integração de dados espaciais de diversas proveniências.

De acordo com os mesmos autores, Maidment e Djokic, 2000, podem considerar-se como mais significativos os seguintes níveis de associação dos SIG à modelação hidrológica:

- a determinação de parâmetros hidrológicos
- a ligação dos SIG a modelos hidrológicos já existentes
- a modelação hidrológica no interior do próprio SIG

A determinação de parâmetros hidrológicos nos SIG serve, geralmente, como forma de recolha de dados de entrada aos respectivos modelos, designadamente os que são baseados na análise de modelos digitais do terreno, representação numérica geograficamente referenciada do relevo de uma determinada região. Esta análise é levada a cabo pelo utilizador, recorrendo às diversas operações espaciais mencionadas no capítulo 2 para manipulação da informação digital georreferenciada.

No segundo tipo de associação, os SIG são utilizados para o fornecimento informaticamente programado de dados que vão alimentar os modelos hidrológicos, ou para visualização dos resultados das simulações realizadas. Este tipo de associação diverge da anteriormente apresentada pois o grau de interdependência modelo hidrológico/SIG é já maior, sendo a determinação de parâmetros feita de uma forma automática e inserida numa estrutura de ficheiro digital característica do próprio SIG, que por sua vez é directamente, ou indirectamente, utilizada pelo *software* de modelação hidrológica. O inverso é igualmente válido, i.e., os dados finais provenientes da modelação hidrológica são passíveis de ser incorporados, de volta, no SIG, permitindo a sua interpretação espacial com uma maior aproximação da realidade.

Os SIG actualmente incluem ferramentas capazes de processar informação específica que servirá de entrada no modelo hidrológico. É exemplo, o conjunto de ferramentas (designadas por

extensões) capaz de gerar a rede de drenagem e a bacia hidrográfica, tendo por base o modelo digital do terreno. Este tema será retomado ao longo do actual capítulo.

No terceiro nível de associação, os próprios modelos hidrológicos são incorporados no SIG utilizando para o efeito as linguagens de programação próprias destes sistemas. Tal como referido no capítulo 2, a principal limitação operacional a este nível prende-se com a dificuldade de incluir uma dimensão temporal no ambiente dos SIG. Não obstante, surgem actualmente exemplos de módulos destinados à modelação hidráulica incluídos, por defeito, nos SIG comerciais. Caso a que não é alheio um maior desenvolvimento das respectivas linguagens de programação. Os autores Ferdinand e Maidment, 1999, afirmam que os SIG se têm tornado cada vez mais flexíveis, suportando uma variada gama de dados e de linguagens sofisticadas, progressivamente mais adaptadas às necessidades do modelador.

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

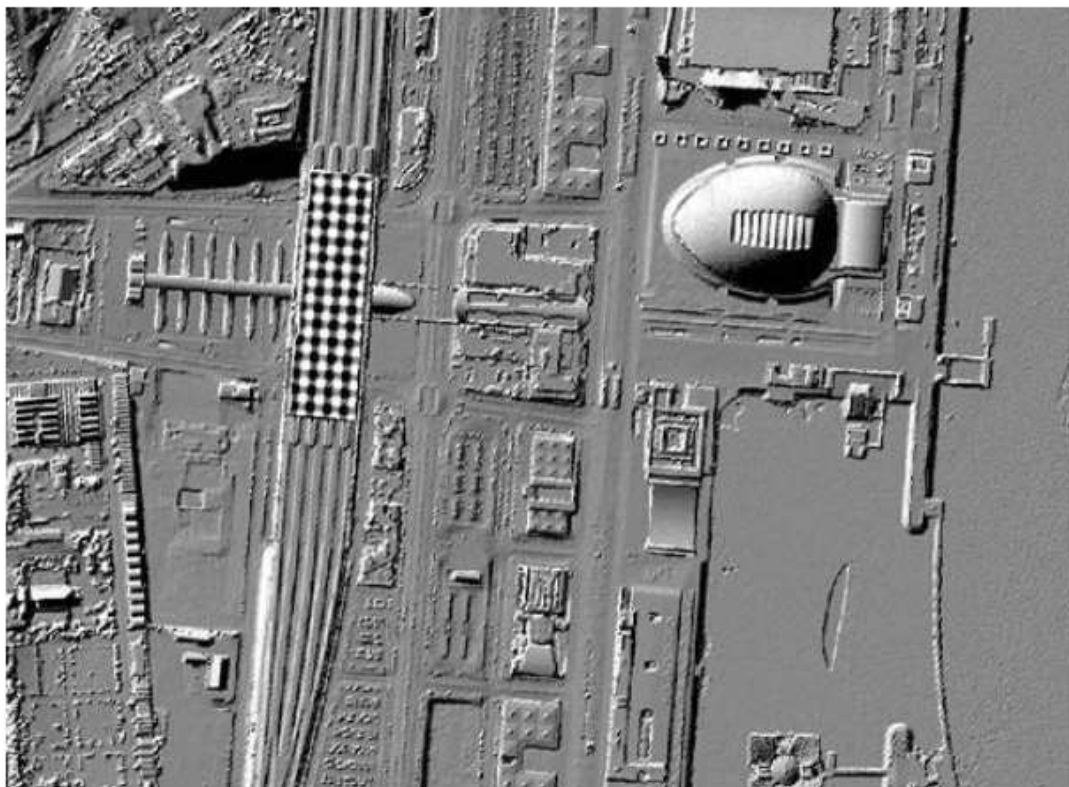
No âmbito do presente trabalho merece especial destaque a construção de modelos digitais do terreno e respectivos algoritmos de extracção da rede hidrográfica e de delimitação de bacia hidrográfica, assim como a obtenção de parâmetros hidrológicos tendo por base cartas temáticas digitais.

## 4.2 Modelos Digitais do Terreno

Embora a modelação numérica do terreno não possa ser considerada como resultante do desenvolvimento dos SIG, a grande maioria dos SIG dispõe de módulos especificamente orientados para a geração de tais modelos, tendo por base informação altimétrica disponível e posterior manipulação destes para a geração automática de temas derivados, como declives ou pontos de visibilidade, entre outros (Henriques, 1996).

Por modelo digital do terreno designa-se 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 (Matos, 2001). Na Figura 4.1 é apresentado um exemplo de um MDT.

A crescente disponibilidade de cartografia altimétrica em formatos digitais, em diversas escalas, acrescida de informação proveniente de satélites, disponibilizada via Internet, torna acessível ao utilizador a produção em SIG de modelos digitais para a região de interesse. São já algumas as entidades nacionais, Instituto Geográfico do Exército (IGEOE), Instituto Geográfico Português (IGP), que à semelhança das suas congéneres internacionais, disponibilizam, entre os seus produtos, modelos digitais do terreno (MDT) a escalas com interesse do ponto de vista da modelação hidrológica.



**Figura 4.1** – Exemplo de um modelo digital do terreno (extraído de Matos, 2001).

Uma das vantagens, mais imediatas, que advém da exploração dos modelos digitais do terreno no domínio da hidrologia está associada com a possibilidade de gerar redes hidrográficas por processos automáticos. Estas são, muitas das vezes, mais extensas e detalhadas que as que resultam dos processos convencionais de levantamento e representação, já que estes não consideram um grande número de linhas de água de carácter intermitente ou efémero. Este conjunto de linhas de água desempenha por vezes um papel preponderante no processo de escoamento superficial.

Os MDT são, geralmente, estruturados segundo uma das seguintes formas:

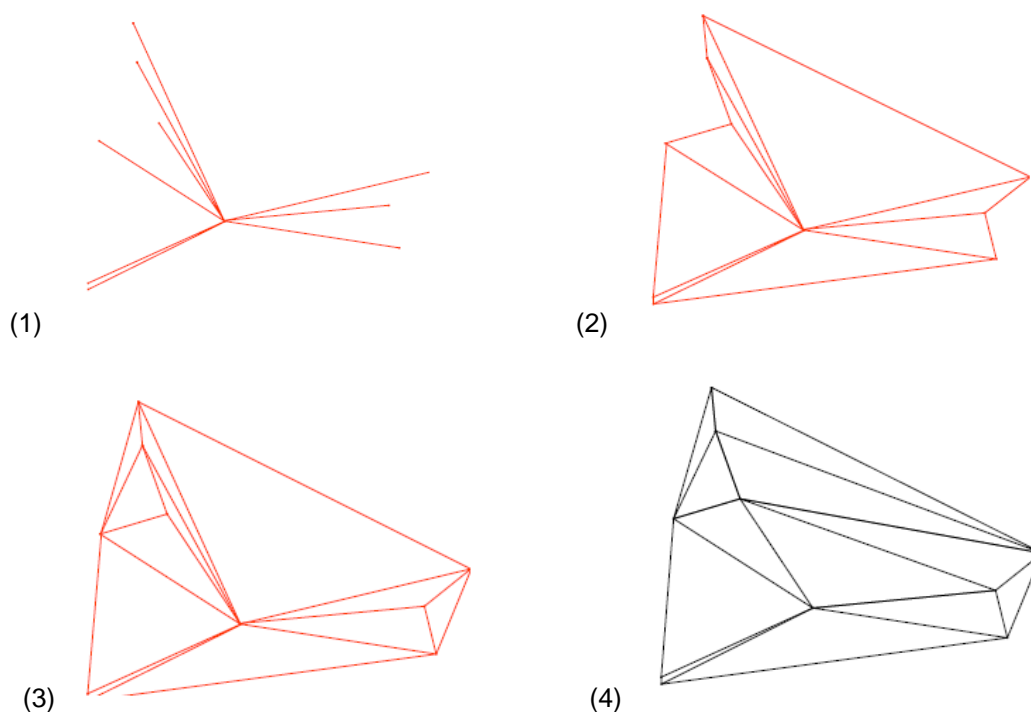
- Quadrícula (*raster*)
- Rede de triângulos irregulares (TIN)

A estrutura de dados vulgarmente adoptada nos MDT é a da quadrícula, que tem como principal aliciente a grande simplicidade com que os modelos são processados, apesar da dificuldade de representação de áreas complexas, em que ocorrem alterações bruscas de altitude, situações em que a simulação da realidade se torna mais grosseira, podendo só parcialmente ser compensada com o estabelecimento de quadrículas de dimensões reduzidas.

Não obstante, a forma actualmente mais utilizada passa pela geração do MDT em estrutura TIN e sua posterior conversão para estrutura em quadrícula. Assegura-se, assim, uma maior representatividade do terreno sem prejuízo da sua capacidade de processamento.

A estrutura em rede de triângulos irregulares (TIN), em que os vértices dos triângulos são pontos cotados, torna-se mais eficiente e flexível para a modelação do terreno. Os triângulos são gerados recorrendo à triangulação pelo método do varrimento radial ou pela triangulação de Delaunay. Estes procedimentos são resumidamente apresentados:

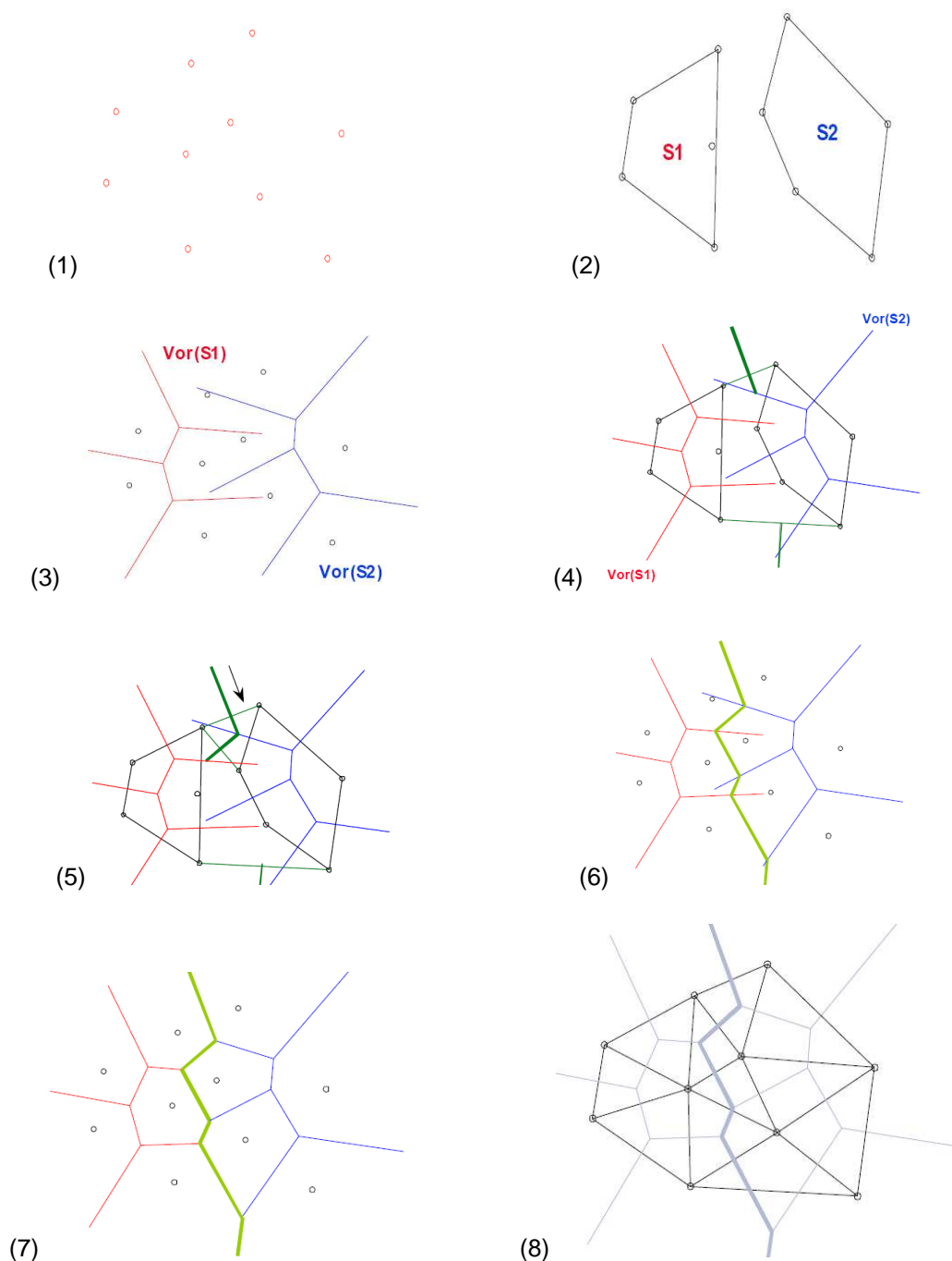
- Triangulação pelo método do varrimento radial – de acordo com a representação esquemática da Figura 4.2, o procedimento consiste da união do centro geométrico a todos os restantes pontos altimétricos (1), seguido da união em sequência desses mesmos pontos (2). A última operação é já uma triangulação, embora não convexa. Em (3) é representada a referida triangulação convexa. Por ultimo tem lugar um processo iterativo de triângulos, onde a aresta comum de cada dois triângulos adjacentes deve ter comprimento inferior à distância entre vértices opostos. O resultado de tal iteração está representado em (4).



**Figura 4.2** – Representação esquemática da triangulação pelo método do varrimento radial (Adaptado de Matos, 2001).

- Triangulação de Delaunay – esta triangulação é o grafo dual de um diagrama de Voronoi, ou polígono de Thiessen, consistindo este na partição do espaço em regiões para as quais pontos contidos no seu interior se encontram mais próximos do seu ponto central do que de qualquer outro. Este é na prática definido pela união de pontos adjacentes, por meio de segmentos de recta, e o traçar de normais ao centro destes, definindo-se assim polígonos nas suas intercepções. Na Figura 4.3 encontra-se uma representação esquemática da construção do diagrama de Voronoi composto. Ao conjunto de pontos altimétricos (1) iniciais são desenhados os respectivos invólucros convexos (2). Supondo já existentes os diagramas de Voronoi para cada um dos conjuntos em separado (3), são unidos os dois invólucros convexos de forma a constituírem um único invólucro convexo e tem início o

desenho da cadeia de junção na perpendicular a um desses segmentos (4), prosseguindo esta até tocar num dos raios de um dos diagramas. O segmento de junção passa para o ponto seguinte do invólucro convexo associado ao raio em que tocou e prossegue na perpendicular a este até tocar num novo raio (e assim sucessivamente) (5). Em (6) é apresentada a cadeia de junção completa que, utilizada para cortar os raios infinitos dos diagramas de Voronoi simples, permite obter o diagrama de Voronoi composto (7). Finalmente em (8) é apresentada a triangulação de Delaunay, tendo por base o diagrama composto de Voronoi, i.e., o seu grafo dual.



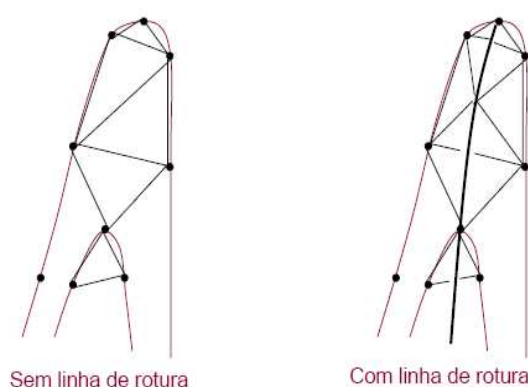
**Figura 4.3** – Representação esquemática da construção de um diagrama de Voronoi e respectiva triangulação de Delaunay (Adaptado de Matos, 2001).

Os métodos de triangulação utilizam unicamente a posição dos pontos como critério para o estabelecimento das ligações. Procuram os triângulos tão pequenos quanto possível por forma a que uma linha de interpolação entre dois pontos atravessasse uma região do espaço que tem um desses pontos como ponto mais próximo (Paulo, 1998).

Estes critérios nem sempre são suficientes para garantir uma boa aproximação à forma do terreno e a adição de informação extra pode ser necessária, através do recurso a linhas de rotura (*breaklines*). Uma linha de rotura é tridimensional e a sua projecção no plano não pode ser atravessada pelas arestas da triangulação. Na Figura 4.4 é representada uma linha de rotura.

Uma interpolação baseada estritamente na distribuição geométrica dos pontos altimétricos pode ter resultados distintos caso estes não estejam colocados de modo a forçarem a triangulação correcta.

Linhas de água tridimensionais podem ser utilizadas como linhas de rotura. No caso de MDT elaborados a partir de curvas de nível, esse procedimento evita a ocorrência de socacos planos no fundo dos vales.



**Figura 4.4** – Representação da utilização de linhas de ruptura na geração de um MDT (adaptado de Matos, 2001).

O modelo de dados de uma TIN está, em SIG, associado a três ficheiros distintos, dos quais o primeiro identifica os vértices e regista as correspondentes coordenadas no terreno, o segundo contém as relações topológicas entre os vértices dos triângulos através de ponteiros que identificam as ligações de cada vértice com cada um dos vértices vizinhos, e o terceiro identifica os triângulos irregulares gerados para a direita de cada segmento de recta que une dois vértices. É possível aumentar a densidade dos pontos cotados em áreas de relevo muito irregular, mantendo em áreas menos irregulares um menor número de pontos, reduzindo-se, assim, o volume de informação necessária para modelar áreas complexas (Matos, 2001).

A representatividade dos modelos digitais do terreno é avaliada considerando, por um lado, o nível de aproximação conseguido entre as altitudes obtidas no modelo e os correspondentes valores reais e, por outro lado, no caso dos sistemas *raster*, também a dimensão da quadrícula. Estão

definidas algumas abordagens de modo a avaliar de uma forma consistente a qualidade de um MDT, sendo estas a análise de qualidade interna e a análise de qualidade externa (Band, 1986).

A análise de qualidade interna de um MDT é o tipo de análise que pode ser feita unicamente com base na informação existente no modelo e no conhecimento sobre a natureza do terreno, sem necessidade de comparação com modelos de dados de referência. Esta divide-se em dois tipos de operações: análise de estrutura e análise de consistência, incidindo estas operações sobre os dados de base que serviram para a construção do modelo ou sobre o próprio modelo, respectivamente. Os procedimentos envolvidos dizem respeito à verificação da horizontalidade das curvas de nível, verificação dos valores de altitude atribuídos às curvas, verificação da não existência de intersecções entre curvas de nível, verificação de existência de hiatos na representação de curvas de nível e verificação das coordenadas de origem da matriz de cotas, na análise de estrutura. A análise interna de consistência pressupõe a existência de conhecimento *a priori* sobre a zona modelada e sobre a natureza do relevo e do modo de representação, sendo realizadas operações de verificação de sequência de curvas de nível e averiguação da possibilidade da altitude associada a um ponto cotado não ser correcta (Matos, 2001).

A análise de qualidade externa de um MDT antevê a existência de um conjunto de dados de referência, que pode ser um outro MDT do mesmo terreno, um conjunto de pontos cotados ou resultados da execução de operações sobre um modelo de referência. Este género de análise pode ser realizada por confrontação directa entre modelos ou por confrontação dos resultados da utilização de um modelo com resultados análogos obtidos a partir do MDT de referência.

A comparação directa de altitudes pode ser feita recorrendo à subtracção entre matrizes de cotas de zonas correspondentes ou entre altitudes de referência para um conjunto de pontos e a altitude obtida a partir do modelo, permitindo a determinação dos seguintes parâmetros (Matos, 2001):

- discrepância média na altitude;
- média do valor absoluto das discrepâncias;
- desvio padrão;
- discrepância máxima;
- discrepância mínima.

A comparação de resultados indica a adequação do modelo ao fim a que se destina. A diversidade de análises deste tipo é bastante vasta, mencionando-se apenas algumas:

- comparação de resultados de modelos hidrológicos;
- comparação de linhas de água;
- comparação de delimitações de zonas de cheia.

Os MDT podem ser utilizados para diferentes finalidades, nomeadamente:

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

No domínio da hidrologia, a exploração dos MDT é particularmente útil para o delineamento automático de redes hidrográficas e respectiva delimitação de bacias hidrográficas. Esta é a operação hidrológica mais elaborada no que respeita ao processamento do MDT, envolvendo a aplicação de diversos algoritmos e suscitando algum debate. Este tema tem sido objecto de inúmeros estudos e aperfeiçoamentos nas últimas décadas.

### 4.3 Modelos Digitais do Terreno e Modelação Hidrológica

O delineamento automático de redes hidrográficas e respectiva delimitação de bacias hidrográficas era tradicionalmente um conjunto de tarefas resolvido manualmente com base na informação existente em cartas topográficas (Paulo, 1998).

Tipicamente, a rede hidrográfica é retirada dessas mesmas cartas e os limites da bacia e sub-bacias que a constituem são traçados com base na detecção visual das linhas de cumeada, implícitas nas características altimétricas, e com base nas linhas de água aí representadas. É, pelo referido, um processo moroso e com algum grau de subjectividade, além do referido em 4.1, onde se verifica que nem todas as linhas de água relevantes ao processo de escoamento superficial surgem representadas na cartografia convencional.

A introdução progressiva de técnicas automáticas na produção de cartografia referente à individualização de bacias hidrográficas e respectivos cursos de água popularizou, desde há alguns anos, os modelos digitais de terreno, actualmente explorados em inúmeras aplicações através de algoritmos que vêm sendo adoptados pelos próprios fabricantes de SIG. A geração automática a partir do MDT, embora expedita e rigorosa, está sujeita a algumas dificuldades e limitações. Os principais problemas associados ao processo resultam do facto de serem necessários cálculos baseados na altitude das células, ou pontos, recorrendo aos operadores de vizinhança (capítulo 2) para o cálculo de

vários parâmetros, bem como da necessidade de assegurar a conectividade entre os canais identificados com base no modelo.

Entre os algoritmos de extracção de parâmetros hidrológicos do MDT, destacam-se os que foram desenvolvidos para modelos *raster* e que recorrem a operadores de vizinhança para o cálculo automático dos declives ou das exposições do terreno, operadores que se encontram disponíveis na generalidade dos SIG comerciais.

Segundo Henriques, 1996, estas metodologias podem ser incorporadas em dois grandes grupos:

- metodologias que se baseiam na comparação das altitudes de cada ponto com as dos respectivos pontos adjacentes (análise local) de forma a detectar as concavidades e as convexidades do terreno;
- metodologias que têm em consideração o escoamento resultante da ocorrência de precipitação uniforme sobre a bacia, nomeadamente as que utilizam o conceito de área mínima de drenagem.

Ainda segundo Hipólito e Simões, 2001, alguns dos inconvenientes relativos ao uso de estruturas *raster* prendem-se com:

- dificuldades associadas à representação de descontinuidades do terreno;
- a imposição arbitrária das localizações dos cursos de água em pontos da quadrícula que não correspondem necessariamente às localizações dos mesmos;
- subjectividade inerente à imposição dum limiar de área mínima de drenagem geradora de escoamento.

Quando se pretende caracterizar os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica por recurso aos SIG, algumas considerações sobre os procedimentos a realizar nos modelos digitais de terreno devem ser feitas. Assim, os seguintes pontos devem ser levados em linha de conta:

1. Considerações sobre a escala cartográfica;
2. Considerações sobre área mínima de drenagem;
3. Resolução do MDT;
4. Algoritmos de individualização das bacias hidrográficas e respectivos cursos de água;
5. Zonas de Depressão Altimétrica no MDT.

Qualquer dos itens supramencionados pode condicionar o resultado obtido pelos modelos aquando da simulação. Como tal, estes são seguidamente detalhados.

### 4.3.1 Considerações sobre Escala Cartográfica

A escala influencia o conteúdo dos mapas, determinando a mais pequena área que neles pode ser desenhada e reconhecida. Assim, a escala condiciona, por exemplo, o grau de detalhe da rede hidrográfica. Atendendo a isto, os resultados obtidos pelos algoritmos de extracção da rede de drenagem, processados sobre um MDT com determinada escala e resolução, podem não ser congruentes com levantamentos de campo com uma maior escala.

Quanto maior for a escala de um mapa, maior pormenor este apresenta. Ao invés, quanto menor for a escala num mapa maior é a área cartográfica representada, diminuído conseqüentemente o detalhe perceptível no mesmo.

Dadas estas considerações, é possível afirmar que a escala da cartografia original determina, desde logo, a capacidade de pormenorização do modelo digital do terreno e assim dos dados obteníveis deste.

Pela natureza específica dos processos hidrológicos a escolha da escala de trabalho é uma questão que se coloca previamente ao início do estudo. Deste modo, a dimensão da bacia hidrográfica em estudo condiciona, *a priori*, essa escolha. Bacias hidrográficas de pequenas dimensões implicam escalas de trabalho bastante grandes, e vice-versa, atendendo às particularidades e relevância das parcelas do escoamento a quantificar. Por exemplo, numa pequena bacia os escoamentos intermédio e de base não são tão relevantes quanto o são num bacia de maiores dimensões.

### 4.3.2 Considerações sobre Área Mínima de Drenagem

Associado à questão da escala surge o conceito da área mínima de drenagem capaz de gerar escoamento em canal. Visto pela óptica do modelo da onda cinemática, quando cessa o escoamento unicamente sobre a superfície e tem início, também, o escoamento em canal, por reduzidas dimensões que este tenha.

A aplicação deste conceito ao MDT merece algumas considerações: quanto maior o limiar de área que é necessário ultrapassar para que se gere escoamento em canal, e logo para que se considere essa quadrícula para onde ele escoar como parte integrante da rede de drenagem, menor é o número de cursos de água gerados. Este limiar é definido pelo modelador e, segundo Grayson, 1992, este equivale a uma área elementar representativa sem a qual não seria possível modelar a bacia. A definição da dimensão desta área crítica depende da resposta pretendida do modelo precipitação/escoamento e de alguns parâmetros da bacia hidrográfica, como por exemplo, o seu tamanho e a sua forma.

De acordo com Grayson *et al.*, 1992, a quantificação dos efeitos da escolha de uma área limiar na estimação dos parâmetros morfométricos é tão significativa que estudos hidrológicos em que estes

intervenham sem uma referência à área limiar utilizada na extracção da rede de drenagem devem ser questionados.

Ainda segundo estes autores, não existe um critério objectivo para o traçado da rede de drenagem, sendo a melhor referência o cruzamento de dados com a cartografia tradicional, baseada em trabalhos de campo. Não obstante, e como mencionado em capítulos anteriores, este juízo deve ser cuidadoso pois alguns dos canais efémeros não representados em cartografia convencional assumem em modelação um papel preponderante no afluir do escoamento à linha de água principal.

### 4.3.3 Resolução do MDT

A resolução do modelo digital de terreno diz respeito à dimensão da quadrícula. Uma resolução elevada implica uma quadrícula (*pixel*) de dimensões reduzidas e, como tal, o respectivo MDT com um elevado grau de detalhe. A escolha de uma resolução desta natureza apresenta como desvantagens a redundância de dados, se por exemplo a área de estudo for plana, e a geração de ficheiros digitais de elevado volume, tornado a sua manipulação mais morosa. Por outro lado, uma resolução mais reduzida pode comprometer a representatividade do MDT, diluindo a natural variabilidade de uma bacia hidrográfica. É imperativo que se encontre um compromisso entre a escala de dados digitais disponíveis e a resolução da quadrícula do modelo digital do terreno.

Garbrecht e Martz, 1993, avaliaram o efeito da adopção de diferentes dimensões de quadrícula no MDT e conseqüentes variações na configuração da rede de drenagem. Estes autores concluíram que a área da quadrícula de um MDT deve ter menos de 5% da área média que drena directamente para cada segmento que constitui a rede de drenagem, assegurando, assim, uma precisão de aproximadamente 10% na rede de drenagem gerada. Por essa razão, aconselham que a dimensão da quadrícula deva ser cerca de 5% do quociente entre a área de cada elemento da quadrícula e a área média que esco directamente para o respectivo elemento da rede de drenagem (área mínima de drenagem). Referem, ainda, que em cursos de água de traçado sinuoso ou em pequenas bacias a dimensão da quadrícula deva ser tal que permita a representação dessas mesmas características, uma vez que os estudos mostraram ser significativa a dependência dos resultados obtidos mesmo para valores inferiores aos referidos 5%.

### 4.3.4 Algoritmos de Individualização das Bacias Hidrográficas e Respective Cursos de Água

O delineamento automático das redes de drenagem de uma bacia hidrográfica é, como se disse, uma operação complexa que, para além dos cálculos baseados nas altitudes das células ou dos pontos que constituem a vizinhança de cada célula ou ponto, tem de assegurar também a conectividade entre as linhas de água identificadas (Henriques, 1996). Os algoritmos desenvolvidos para esta finalidade foram sendo objecto de sucessivas reformulações.

Tal como referido em 4.1 existem fundamentalmente duas abordagens para delinear a rede de drenagem e a respectiva bacia hidrográfica num MDT de formato *raster*. Assim, inserida nas metodologias que se baseiam na comparação das altitudes de cada ponto com as dos respectivos pontos adjacentes, Peucker e Douglas, 1975, propõem um algoritmo que assinala o ponto de altitude mais elevada dos quatro pontos contíguos a qualquer ponto da matriz do modelo numérico do terreno segundo duas direcções ortogonais. Ao fazer uma janela de 2 por 2 percorrer toda a matriz, os pontos que não foram assinalados são classificados como potencialmente pertencentes a cursos de água. De seguida, é aplicado um procedimento baseado na análise comparativa de cada ponto com os respectivos vizinhos para o estabelecimento das ligações entre os pontos identificados como pertencendo a cursos de água e as linhas de cumeada.

Este algoritmo apresenta como principal inconveniente o facto de gerar depressões isoladas onde se concentra o escoamento, bem como linhas de água interrompidas que estão longe de poderem ser consideradas como susceptíveis de representar a realidade (Henriques, 1996).

Band, 1986, propôs um método de identificação da rede de drenagem sobre um MDT, baseado no anterior, marcando os nós de montante e de jusante em cada segmento da linha de água a partir de cada nó de jusante, sabendo que esta drena ao longo da linha de maior declive, até encontrar outra linha de água. Este processo repete-se até estar toda a rede de drenagem identificada (Paulo, 1998).

De modo a colmatar as deficiências deste tipo de abordagem, O'Callaghan e Mark, 1984, introduzem uma metodologia que tem em consideração o escoamento. O algoritmo proposto pressupõe a definição de uma área mínima de drenagem, conforme o conceito definido em 4.3.2, sendo este, mediante algumas particularizações, o modelo de referência na actualidade.

O modelo de O'Callaghan & Mark, 1984, usualmente designado por modelo do D8 (*Deterministic Eight Point*), identifica, inicialmente, as direcções de drenagem para todos os pontos da matriz do terreno (MDT), correspondentes ao maior declive das oito direcções possíveis que ligam cada ponto aos seus oito pontos contíguos, considerando o varrimento do MDT por uma janela móvel de 3 linhas por 3 colunas centradas em cada ponto da matriz.

Uma vez determinadas as direcções de escoamento, e seu registo em respectiva matriz de dados (*raster*), é calculada uma matriz correspondente ao valor do escoamento acumulado para cada elemento desta, supondo uma precipitação uniforme em toda a bacia hidrográfica. Por um processo iterativo em que, a cada iteração, tal elemento drena para o vizinho de cota mais baixa, de acordo com a matriz das direcções de drenagem, é possível obter a matriz do escoamento acumulado em que a cada quadrícula fica associado o total do escoamento drenado para esse elemento, i.e., a respectiva sub-bacia drenante (Maidment e Djokic, 2000).

Estabelecido, pelo modelador, o valor mínimo de área de drenagem para que se possa definir o escoamento em canal (ver 4.3.2), a matriz de escoamento acumulado é percorrida por um operador (janela móvel de 3 linhas por 3 colunas centradas em cada ponto) que vai identificar como pertencente

a linhas de água todos os pontos da matriz de escoamento acumulado cujo valor desta exceda o valor definido pelo modelador para a área mínima de drenagem. Os diversos pontos definidos como integrantes de linhas de água e as suas respectivas direcções de escoamento definem a rede de drenagem, ainda em formato *raster*. A representação do modelo D8 para delineamento da rede de drenagem encontra-se esquematizada na Figura 4.5.

32	64	128
16	*	1
8	4	2

a) Codificação das direcções do escoamento

78	72	69	71	58
74	67	56	49	46
69	53	44	37	38
64	58	55	22	31
68	61	47	21	16

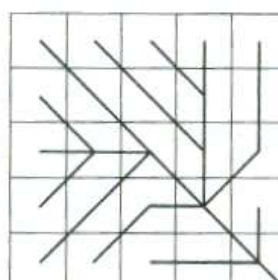
b) Representação esquemática de um MDT

2	2	2	4	4
2	2	2	4	4
1	1	2	4	8
128	128	1	2	4
128	128	1	1	4

c) Representação esquemática da grelha das direcções de escoamento

0	0	0	0	0
0	1	1	2	1
0	3	8	5	2
0	1	1	20	0
0	0	0	1	24

d) Representação esquemática da grelha do escoamento acumulado



e) Representação esquemática da rede de drenagem (formato *raster*)

**Figura 4.5** – Representação esquemática do modelo D8 para delineamento da rede de drenagem (Adaptado de Maidment e Djokic, 2000).

Ambas, rede de drenagem e bacia hidrográfica, são convertidas, de forma automática, por operações espaciais (capítulo 2), em elementos vectoriais individualizados e com o respectivo identificador de toponímia registado na base de dados associada.

A aplicação deste modelo requer, contudo, a eliminação prévia das depressões altimétricas presentes no MDT.

#### 4.3.5 Zonas de Depressão Altimétrica no MDT

As zonas de depressão no modelo digital do terreno correspondem a quadrículas cuja cota altimétrica é mais baixa que a dos respectivos vizinhos, não existindo assim um declive favorável à sua drenagem. Previsivelmente, estes serão pontos de acumulação de precipitação, eliminando parte do escoamento e, deste modo, enviesando significativamente os resultados esperados da simulação.

O problema do tratamento das depressões do MDT é complexo, uma vez que estas podem resultar de erros ocorridos durante o processo de geração do próprio MDT ou corresponder a verdadeiras concavidades do terreno. Nesta situação assume particular relevância a inspecção visual por levantamento de campo, ou na sua impossibilidade a análise contrastada da cartografia digital disponível com levantamentos ortofotométricos da bacia hidrográfica em estudo.

Existem duas abordagens possíveis para a remoção destes pontos de acumulação:

- Eliminação das depressões previamente à aplicação dos métodos de geração da rede de drenagem e respectiva bacia hidrográfica.
- Eliminação dos pontos de acumulação após o delineamento da rede de drenagem.

Relativamente à primeira abordagem, o objectivo pode ser conseguido por imposição do aumento das altitudes das áreas afectadas. Basta para tal elevar a cota das células que constituem a depressão à mais baixa das oito quadrículas vizinhas quando o respectivo operador percorre o local côncavo, restando deste modo uma área plana. Procedimentos similares optam pela inversão do sentido do escoamento ao identificar a depressão no MDT.

Garbrecht e Martz, 1993, referem que no método proposto por O'Callaghan & Mark (1984), onde aplicam um filtro para previamente nivelar o MDT, são geradas redes de drenagem com percursos anómalos. Não obstante, este método manuseia bem os pontos de acumulação simples. Estes autores concluem que o aplanar prévio do modelo digital do terreno (equivalente a DEM – *digital elevation model*) reduz a informação nele contida e pode gerar uma representação não fidedigna dos cursos de água contidos na bacia hidrográfica.

De acordo com Henriques, 1996, a segunda abordagem é bem tipificada pelo modelo desenvolvido por Chorowicz, onde se preconiza um método baseado no preenchimento das depressões por elevação da área depressionada, com a diferença fundamental a residir na circunstância de não ser exigida a sua eliminação prévia, permitindo que muitas se constituam como integrantes da rede de drenagem.

No entanto, embora *a posteriori*, ou seja após identificação da potencial rede de drenagem, somente depressões isoladas e de dimensões inferiores a um determinado limiar não são eliminadas. As que interfiram com a definição dos percursos de drenagem, por necessidade da sua individualização, são elevadas.

#### **4.4 Determinação de Parâmetros de Caracterização dos Modelos Hidrológicos por Recurso a Informação Digital Georreferenciada**

Como ressalta do capítulo 3, os modelos hidrológicos carecem de um conjunto de parâmetros que lhes servem de *input*. Quando estes modelos são conceptuais, i.e., fisicamente baseados, o recurso aos SIG torna-se uma ferramenta privilegiada à sua obtenção.

Os SIG, ao proporcionarem o cruzamento de dados temáticos de diferentes origens e a correspondente geração automatizada de informação de síntese, através das operações mencionadas no capítulo 2, contribuem significativamente para uma acrescida aproximação dos modelos hidrológicos à realidade.

A derivação automática de parâmetros hidrológicos com base em cartas temáticas digitais constitui uma das áreas de aplicação corrente dos SIG quando estes são ligados a modelos hidrológicos. Ao longo do capítulo 5 tornar-se-á evidente o conjunto de parâmetros que, com base na mais diversa informação digital, pode ser obtido por recurso aos SIG. Nessa fase do presente trabalho procurar-se-á fazer uma sistematização da informação digital georreferenciada disponível, respectivas operações de processamento, bem como evidenciar a sua relevância à composição do modelo hidrológico em causa.

## **Capítulo 5**

Aplicação ao Estudo da Bacia Hidrográfica da Ribeira de  
Valadares

## 5.1 Introdução

O trabalho prático desta dissertação tem como estrutura de base a elaboração teórica anteriormente referida, onde se abordaram os temas necessários à sua compreensão e execução. Para tal estudo escolheu-se a área da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares.

A Ribeira de Valadares é um pequeno curso de água perene e costeiro, inserido na malha urbana periférica do Concelho de Vila Nova de Gaia. O seu estudo hidrológico apresenta, à semelhança de cursos de água de idêntica natureza, a particularidade da total ausência de registos relativos a valores de escoamento e de precipitação, tornando o recurso a modelos hidrológicos conceptuais e a respectiva parametrização por recurso a SIG indispensáveis na obtenção de modelos de bacia hidrográfica que permitam uma adequada simulação do seu comportamento em face de um evento de precipitação. Não obstante, a obtenção de dados de campo que permitam a calibração apresenta-se como uma etapa fundamental do presente trabalho.

O mencionado curso de água apresenta ainda como ponto pertinente ao seu estudo hidrológico o facto de a área urbana em questão se encontrar em franca expansão e as modificações introduzidas no revestimento e na ocupação e uso do solo potenciarem não só a intensidade das cheias (pela redução das perdas por intercepção/retenção e favorecimento da impermeabilização da bacia) como reduzem significativamente a capacidade de vazão da rede hidrográfica (pelos obstáculos nos leitos de cheia e agravamento dos fenómenos de erosão do solo). Estes factores funcionando de forma sinérgica tornam a definição de valores de ponta de cheia e respectivos tempos de ocorrência em importantes objectivos de planeamento.

Estas considerações tornam-se mais prementes atendendo a que se trata, necessariamente, de uma bacia hidrográfica de área bastante reduzida e, como tal, apresenta um baixo tempo de concentração. Assim, a possibilidade de ocorrência de cheias repentinas (*flash floods*) é ainda acrescida, sendo a sua capacidade de previsão em tempo real algo de desejável. A geração de um modelo de bacia hidrográfica representativo e dinâmico o suficiente para acompanhar as alterações registadas ao longo do tempo constitui o primeiro passo na produção de tal sistema de alerta (Portela, 2000).

O desenvolvimento de tal modelo pode estabelecer, igualmente, a base de decisão a processos de ordenamento do uso do solo e à consideração de medidas estruturais. De referir, ainda, que sendo uma bacia hidrográfica costeira a caracterização sedimentológica deverá igualmente assumir, pela sua relevância na dinâmica da linha de costa, relevo. Apesar desta nota, essa análise não será objecto do actual estudo.

Pretende-se nesta parte prática do trabalho, por recurso a várias das operações em SIG explanadas anteriormente e por recurso a *software* hidrológico específico, gerar modelos do terreno compreensíveis hidrológicamente, individualizar as diferentes partes integrantes do modelo hidrológico e sua respectiva parametrização.

No presente capítulo descreve-se a área de estudo, a metodologia empregue e o *software* utilizado no desenvolvimento de um modelo de hidrológico da bacia da Ribeira de Valadares.

## 5.2 Sistemas de Informação Geográfica Utilizados

O *software* SIG utilizado para a integração e processamento da informação que visou criar o modelo hidrológico, e a sua respectiva parametrização, foi o ArcInfo 9.1 e o Arcview 3.2, ambos os produtos foram desenvolvidos pela empresa norte-americana ESRI (*Environmental System Research Institute, Inc*), diferindo apenas na sua versão. O programa informático ArcInfo 9.1 é actualmente um dos SIG mais utilizados por empresas e instituições académicas de todo o mundo, sendo considerado líder no seu segmento de mercado. Estão disponíveis versões para as mais diversas plataformas computacionais e sistemas operativos, variando de estações de trabalho a computadores pessoais.

O ArcInfo 9.1 oferece recursos para a criação de bases de dados cartográficas, permitindo a captura, manipulação, análise e apresentação de dados espaciais. Oferece várias opções de estruturas de dados (*vectorial, raster*) e possui diversas funções de conversão destas, permitindo ainda a sobreposição de mapas, a análise espacial e a gestão de bases de dados não gráficos. Este SIG comercial conta ainda com diversos módulos (*extensões*), de entre os quais se destaca a *3D analyst*, onde muito do trabalho de geração do MDT foi feito. Estas extensões são desenvolvidas numa linguagem de programação actual, sendo esta *Visual Basic*.

O *software* Arcview 3.2 apresenta funcionalidades reduzidas quando comparado com o seu mencionado sucessor. Não obstante, trata-se de um programa de fácil manipulação e utilizadores com maior experiência poderão encontrar ferramentas que permitem solucionar problemas ligados à geoanálise, sendo este o caso da extensão utilizada no processamento do MDT gerado.

Os mapas criados utilizando este *software* apresentam-se com qualidade actual, podendo ainda ser ligados a gráficos, desenhos, fotografias, tabelas e outros tipos de arquivos. Além destes atributos, o Arcview 3.2 permite ao utilizador, através de linguagem *Avenue*, a programação orientada a objectos adicionados ao programa, bem como desenvolver novas ferramentas, interfaces e aplicações. A extensão supramencionada insere-se nesta linha de desenvolvimento (HEC, 2000 a)

Além das diferentes capacidades funcionais das referidas versões, as diferenças operacionais prendem-se também com a forma de armazenamento e organização de dados. Na sua versão 3.2 o sistema de gestão de dados é algo limitado, não interferindo, contudo, nas diferentes transposições de informação realizadas entre os programas informáticos em referência.

## 5.3 Descrição da Área de Estudo

Pela sua importância no auxílio à caracterização dos modelos empregues e interpretação dos dados produzidos pelos mesmos, e por constituir parte integrante da metodologia empregue na análise de uma bacia hidrográfica por recurso a SIG, opta-se por uma prévia caracterização da bacia da Ribeira de Valadares quanto aos seguintes temas:

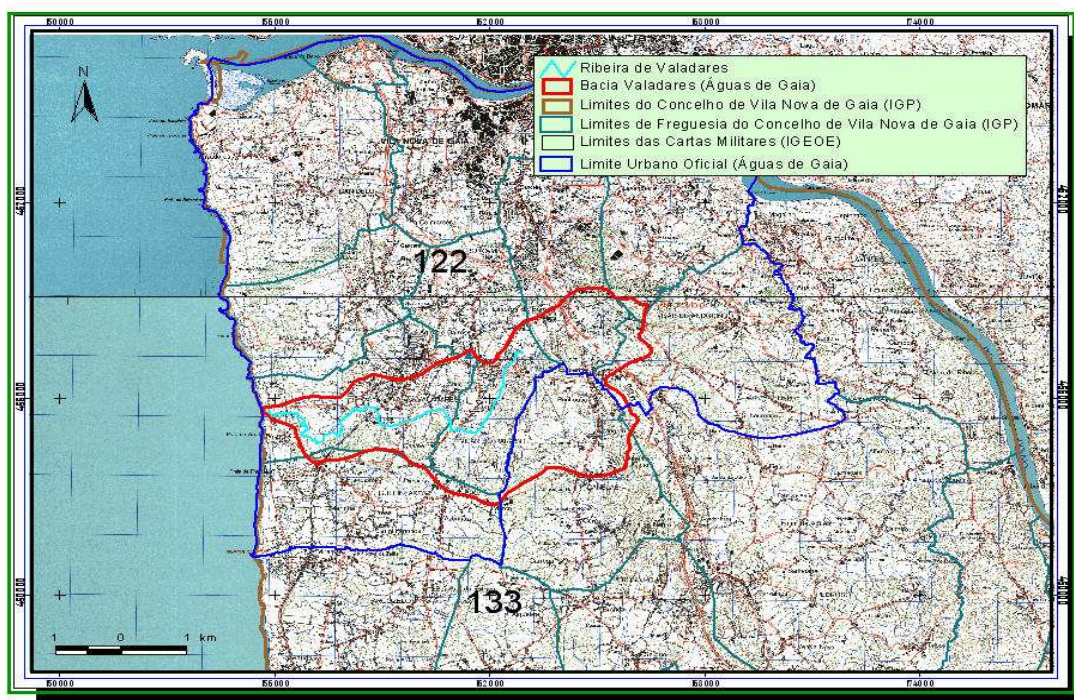
1. Localização geográfica da bacia hidrográfica;
2. Geologia do local onde se insere tal bacia;
3. Classificação do tipo de solos, de um ponto de vista hidrológico;
4. Ocupação do solo da bacia hidrográfica;
5. Caracterização demográfica e industrial da área em estudo;
6. Caracterização do clima da bacia hidrográfica.

A caracterização do relevo da bacia e a elaboração do perfil longitudinal da linha de água é deixada para alíneas posteriores onde se salienta a sua obtenção expedita por recurso ao seu respectivo MDT, ficando assim definida, em conjunto com os pontos supramencionados, a fisiografia da bacia da Ribeira de Valadares.

Salienta-se que nesta primeira abordagem será utilizado como delimitante da área da bacia hidrográfica o polígono (informação cartográfica digital em formato vectorial) disponibilizado pela empresa Municipal Águas de Gaia. A respectiva rede de drenagem e delimitação de sub-bacias serão alvo de posterior definição, aquando da geração do MDT e respectivo processamento.

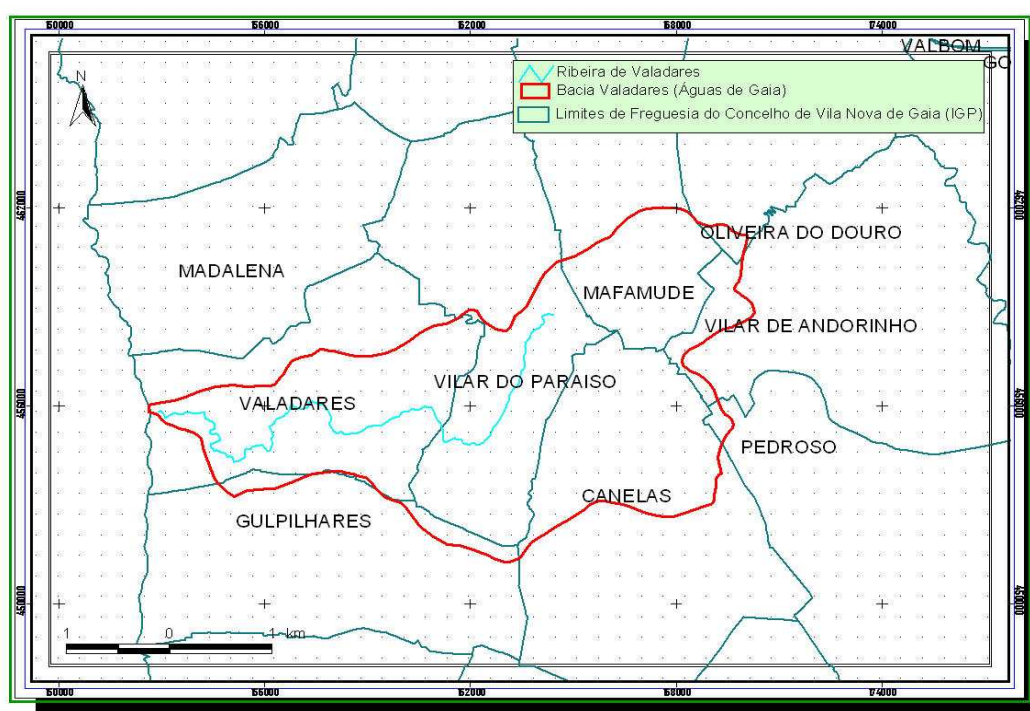
### 5.3.1 Localização

De acordo com a cartografia digital gentilmente disponibilizada pela empresa Águas de Gaia, a informação *raster* constante das Cartas Militares ocupadas pela referida bacia (nº 122 e 133), informação esta adquirida ao Instituto Geográfico do Exército (IGEOE), à escala 1:25 000, e limites administrativos em formato vectorial disponibilizados gratuitamente pelo Instituto Geográfico Português (IGP) no seu portal de *Internet*, a Ribeira de Valadares, que surge cartografada no seu ponto mais de montante próximo da localidade de Guardal, Freguesia de Vilar do Paraíso do Concelho de Vila Nova de Gaia, desenvolve-se ao longo de cerca de 6,9 km, indo afluír à zona costeira Sul do Concelho (Figura 5.1). De acordo com o polígono delimitante da bacia hidrográfica, a sua área é de 10,65 km<sup>2</sup>. Estes dados foram obtidos por recurso a operadores espaciais, dentro do SIG, de cálculo de comprimentos e áreas.



**Figura 5.1** – Representação da delimitação da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares e dos limites administrativos do Concelho de Vila Nova de Gaia (Fonte: Águas de Gaia, IGEOE e IGP).

No *datum* Lisboa, projecção de Gauss-Kruger, a bacia hidrográfica de Valadares encontra-se compreendida entre as coordenadas [155 88,46; 458 100,95] e [161 872,09; 459010,57]. Na Figura 5.2 é possível visualizar a Ribeira de Valadares, respectiva bacia, e a sua localização, quer geográfica, quer administrativa.



**Figura 5.2** – Cartograma representativo da delimitação administrativa, ao nível da Freguesia, da bacia de Valadares, Concelho de Vila Nova de Gaia (Fonte: Águas de Gaia e IGP).

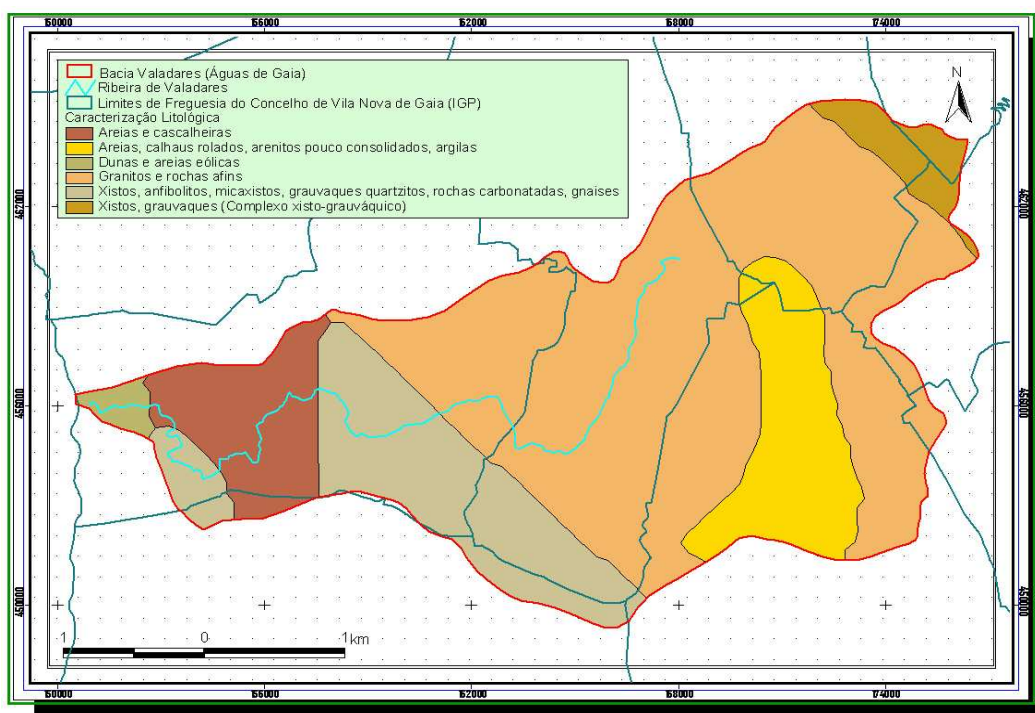
Como é possível constatar da Figura 5.2 a bacia hidrográfica da ribeira de Valadares encontra a sua área distribuída pelas freguesias de Valadares, Gulpilhares, Vilar do Paraíso, Canelas, Pedroso, Vilar de Andorinho, Oliveira do Douro e Mafamude, constando as respectivas áreas de intercepção da Tabela 5.1.

**Tabela 5.1** – Valor das áreas de intercepção da bacia de Valadares com as Freguesias do Concelho de VNG e respectivas fracções percentuais da sua área total.

Freguesia	Área (km <sup>2</sup> )	Fracção da área total (%)
Oliveira do Douro	0,09	0,8
Mafamude	1,49	14,0
Vilar do Paraíso	2,56	24,0
Vilar de Andorinho	0,42	4,0
Valadares	3,09	29,0
Canelas	2,61	24,5
Pedroso	0,06	0,6
Gulpilhares	0,32	3,0
<b>Total</b>	<b>10,65</b>	<b>100,0</b>

### 5.3.2 Geologia

Tendo por base a Carta Litológica digital e georreferenciada do território nacional, disponibilizada gratuitamente pelo Instituto do Ambiente no seu portal de *Internet* e recorrendo a uma operação de sobreposição no SIG é possível obter uma caracterização da geologia da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares. Assim, a Figura 5.3 representa as formações geológicas que ocorrem na referida bacia.



**Figura 5.3** – Cartograma representativo da litologia da bacia de Valadares  
(Fonte: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente).

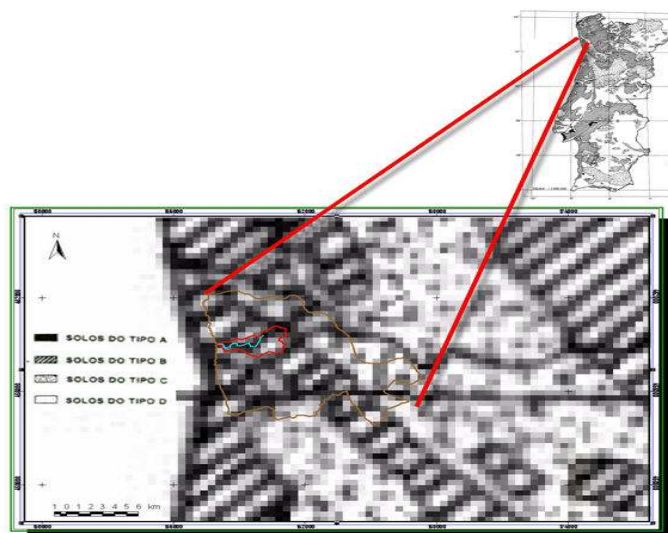
É possível verificar, pela análise da Figura 5.3 e Tabela 5.2, existir uma predominância nas zonas de montante de formações graníticas, indiciando esta uma possível relevância do escoamento intermédio para estas zonas, bem como valores de infiltração profunda (percolação) baixos. Inversamente, a ocorrência de zonas predominantemente arenosas, no sector de jusante, que no seu conjunto representam cerca de 20% da área total da bacia, indicam, potencialmente, valores de infiltração elevados. A restante fracção, composta genericamente por xistos, entende-se apresentar um comportamento hidrológico similar ao das formações graníticas, embora não tão pronunciado, i.e., com menores valores de infiltração.

**Tabela 5.2** – Valores das áreas de cada uma das classes litológicas compreendidas na bacia de Valadares e respectivas fracções percentuais da sua área total.

Designação Litológica	Área (km <sup>2</sup> )	Fracção da área total (%)
Granitos e rochas afins	6,13	57,6
Xistos, grauvaques (Complexo xisto-grauváquico)	0,36	3,4
Dunas e areias eólicas	0,12	1,2
Areias e cascalheiras	0,95	8,9
Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas	1,23	11,6
Xistos, anfibolitos, micaxistos, grauvaques quartzitos, rochas carbonatadas, gnaises	1,84	17,3
Total	10,65	100

### 5.3.3 Tipo Hidrológico de Solos

Por georreferenciação da Figura 3.13, carta dos solos de Portugal Continental classificados pelas suas características hidrológicas, e respectiva sobreposição pelo polígono da bacia da Ribeira de Valadares, representada na Figura 5.4, é possível constatar que os solos se classificam como do tipo B, ou seja, solos com taxas de infiltração moderadas quando completamente humedecidos. Incluem principalmente solos medianamente profundos, com textura moderadamente fina a moderadamente grosseira, bem como medianamente drenados. As suas taxas de infiltração rodam os valores de 0,38 a 0,76 cm/h e a sua textura oscila entre solo franco, a solo franco arenoso.

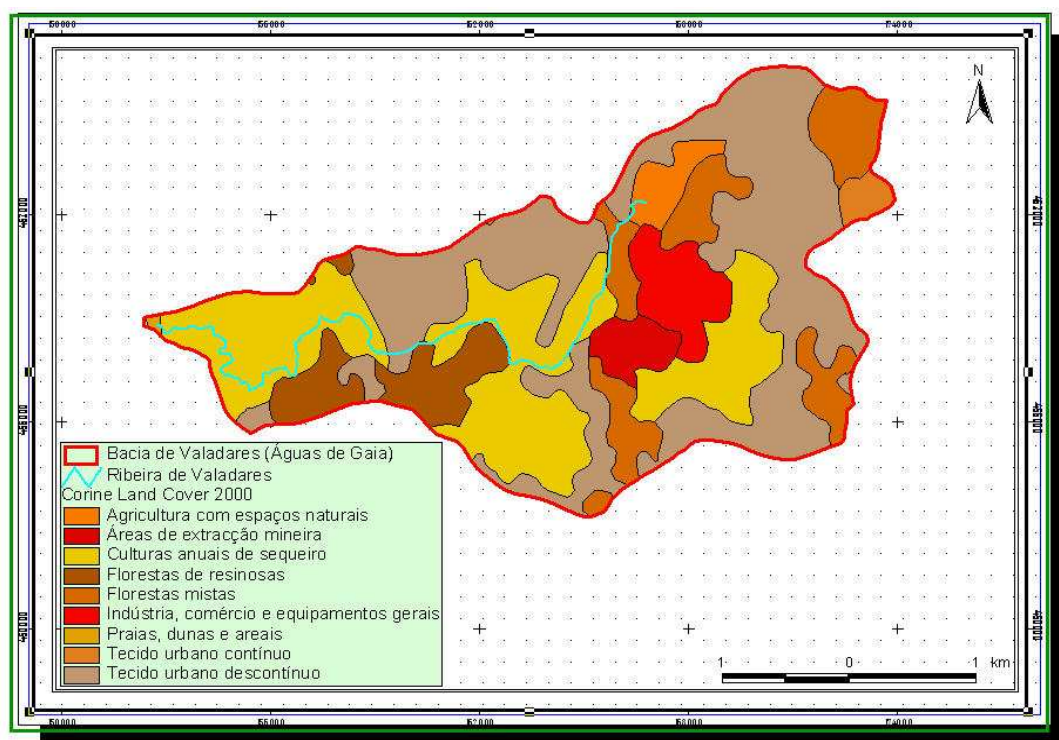


**Figura 5.4** – Representação do tipo Hidrológico de solos da bacia de Valadares  
(Fonte: Lencastre e Franco, 1984).

### 5.3.4 Ocupação do Solo e Coberto Vegetal

Utilizando a Carta de Ocupação de Solos (*Corine Land Cover 2000*) disponível, mediante pedido formal, no portal do Instituto do ambiente, e recorrendo uma vez mais a uma operação de sobreposição, foi possível produzir o cartograma de ocupação do solo da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares constante da Figura 5.5.

Por análise espacial do cartograma representado na Figura 5.5 resulta a Tabela 5.3, onde figuram os valores de área, e respectiva fracção, de cada uma das suas classes de uso do solo. Da análise das fracções de área é possível concluir que as culturas anuais de sequeiro constituem o principal revestimento vegetal da bacia (30%). Uma fracção significativa da bacia insere-se na malha urbana, cerca de 47% e uma pequena porção possui um revestimento vegetal perene, cerca de 19%, equivalendo este a bosquetes de resinosas e algumas folhosas, possivelmente de exploração.



**Figura 5.5** – Cartograma representativo da ocupação do solo da bacia de Valadares  
(Fonte: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente)

Do ponto de vista hidrológico os valores expressos tem bastante significado. Cerca de metade da área da bacia encontra-se edificada, conduzindo este valor a elevadas áreas de impermeabilização. Da fracção correspondente ao revestimento vegetal, a maior parcela (30%) diz respeito a culturas que nos meses mais húmidos não apresenta crescimento vegetativo. A conjugação destes dois factores remete as perdas de precipitação a um plano secundário, esperando-se, como tal, um acréscimo dos valores de escoamento. Somente 19% da área da bacia se antevê interceptar, de facto, a precipitação em meses húmidos.

O modelo de bacia a gerar deve reflectir as condições referidas e preferencialmente limitar a heterogeneidade da bacia através de uma correcta definição das suas sub-bacias.

**Tabela 5.3** – Valores das áreas de cada uma das classes de ocupação do solo compreendidas na bacia de Valadares e respectivas fracções percentuais da sua área total.

Ocupação do Solo	Área (km <sup>2</sup> )	Fracção da área total (%)
Tecido urbano contínuo	0,13	1,2
Tecido urbano descontínuo	4,20	39,4
Indústria, comércio e equipamentos gerais	0,52	4,9
Áreas de extracção mineira	0,27	2,5
Agricultura com espaços naturais	0,25	2,4
Florestas de resinosas	0,76	7,1
Florestas mistas	1,28	12,0
Culturas anuais de sequeiro	3,22	30,2
Praias, dunas e areais	0,01	0,1
Total	10,64	100

### 5.3.5 Demografia e Ocupação Industrial

Recorrendo, uma vez mais, a operações de sobreposição, realizadas no SIG, e tendo por base o polígono delimitante da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares e a Base Geográfica de Referenciação de Informação (BGRI), adquirida ao Instituto Nacional de Estatística (INE), é possível obter uma imagem da demografia daquela bacia.

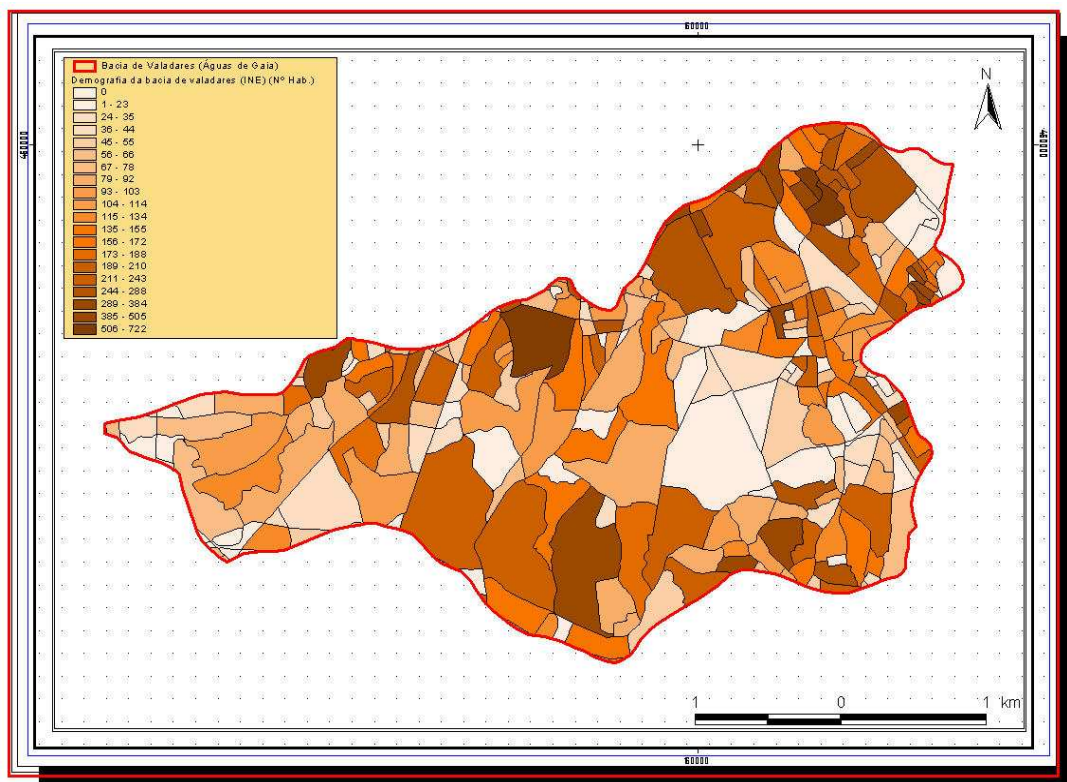
A BGRI constitui um instrumento de apoio ao trabalho estatístico, sendo um sistema de referenciação geográfica apoiado em cartografia topográfica sob a forma analógica, resultado da divisão da área de todas as freguesias do país em pequenas áreas homogéneas de construção rigorosamente apoiada e delimitada numa cartografia de base constituída por secções estatísticas e subsecções estatísticas.

A Secção Estatística é uma área contínua de uma única *Freguesia* com cerca de 300 alojamentos destinados à habitação;

Uma Subsecção Estatística é a mais pequena área homogénea de construção ou não, existente dentro da secção estatística, correspondendo ao quarteirão nas áreas urbanas, e ao lugar ou parte do lugar nas áreas rurais.

Na caracterização demográfica de uma determinada região interessa considerar o valor de população residente associado, na respectiva base de dados, a cada uma dessas Subsecções.

Na Figura 5.6 é apresentada a distribuição da população residente na bacia de Valadares por subsecção estatística, com base nos dados obtidos a partir da BGRI.



**Figura 5.6** – Cartograma representativo da distribuição da população por subsecção estatística para a bacia de Valadares (Fonte: Instituto Nacional de Estatística).

A forma de obter o valor populacional nas subsecções que por imposição do polígono da bacia ficam só parcialmente representadas passa pelo cálculo prévio da densidade populacional nessas mesmas subsecções. Assim, após o referido corte basta o recálculo da sua área e respectiva multiplicação pelo valor anteriormente adquirido para a densidade, obtendo-se, assim, um valor de população para a porção da subsecção de interesse.

A população, assim determinada, para a bacia da Ribeira de Valadares é de 28 387 habitantes. De acordo com dados constantes do portal da empresa Águas de Gaia o Concelho de Vila Nova de Gaia, em particular na sua área metropolitana, apresenta uma taxa de atendimento de saneamento próxima da plenitude. Deste modo, assume-se neste trabalho que a descarga de águas residuais domésticas na linha de água é nula. Simultaneamente, em virtude de este Concelho possuir um sistema separativo, o destino das suas águas pluviais, de acordo com a pendente do terreno a que essa rede necessariamente obedece, insere-se na forma prevista de modelação do escoamento superficial.

A título complementar apresenta-se a localização das principais indústrias presentes na bacia hidrográfica. A Informação utilizada consta do levantamento georreferenciado levado a cabo pelo Instituto do Ambiente e disponibilizado no seu portal de *Internet*. Refere-se que, à semelhança do considerado para as águas residuais domésticas, não se entende a Ribeira de Valadares como destino final das águas residuais industriais.

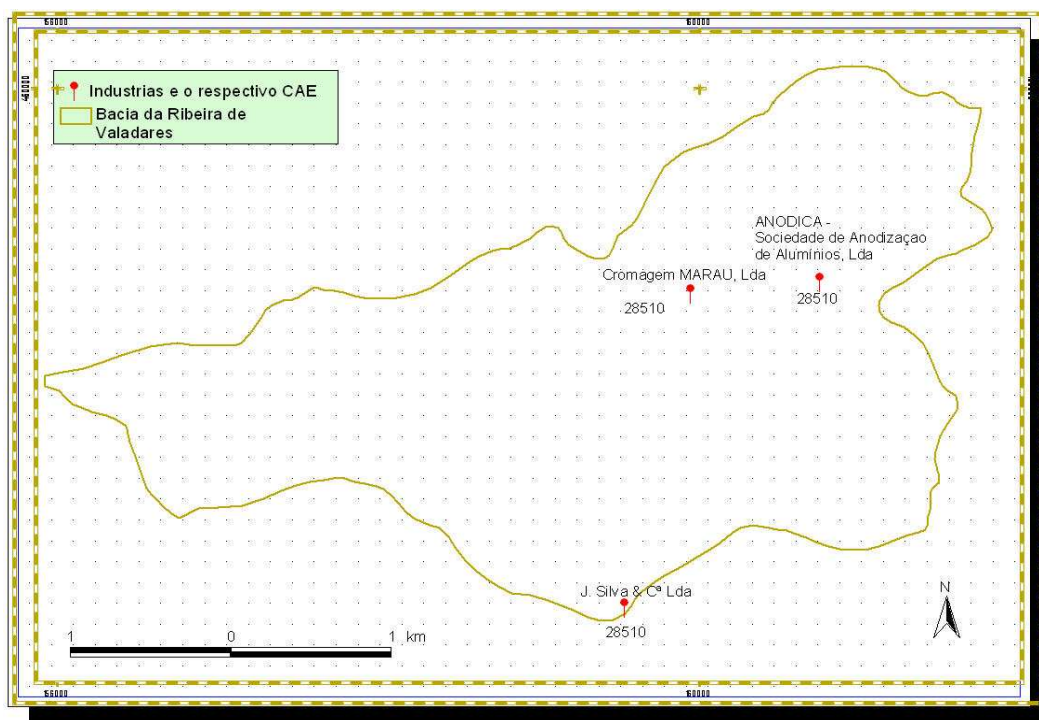


Figura 5.7 – Cartograma representativo da ocupação industrial da bacia de Valadares (dados: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente).

### 5.3.6 Clima

Quanto à sua caracterização climática a bacia de Valadares no que respeita à evapotranspiração real média anual, temperatura média anual para o período de 1931 a 1960, e precipitação total para o período de 1931 a 1960, apresenta valores de 600 a 700 mm, 12,5 ° a 15 °C e de 1000 a 1200 mm, respectivamente.

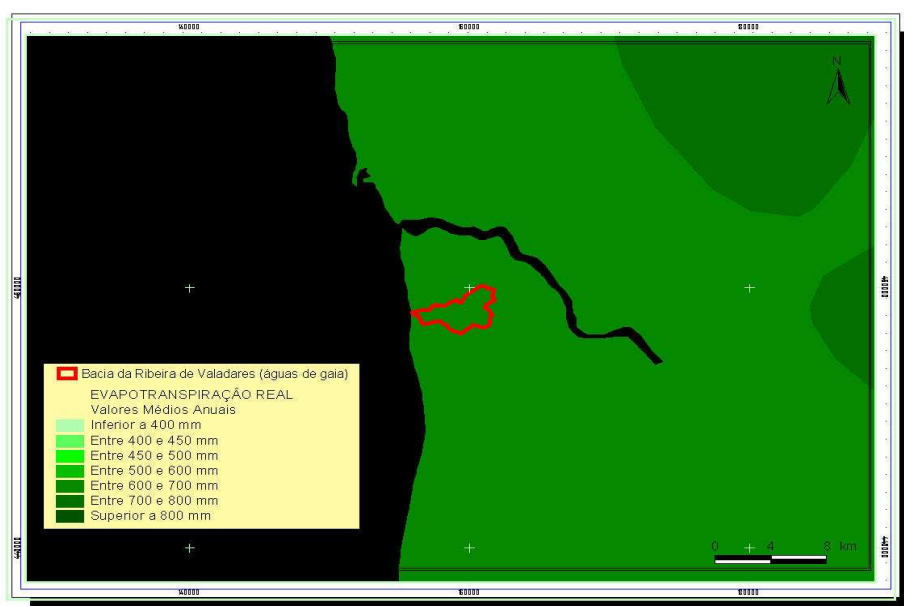
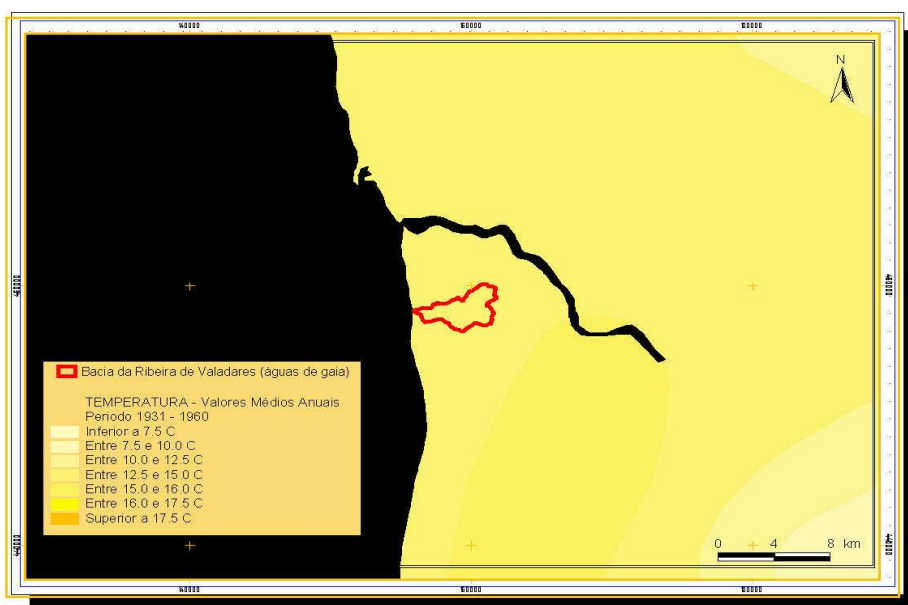
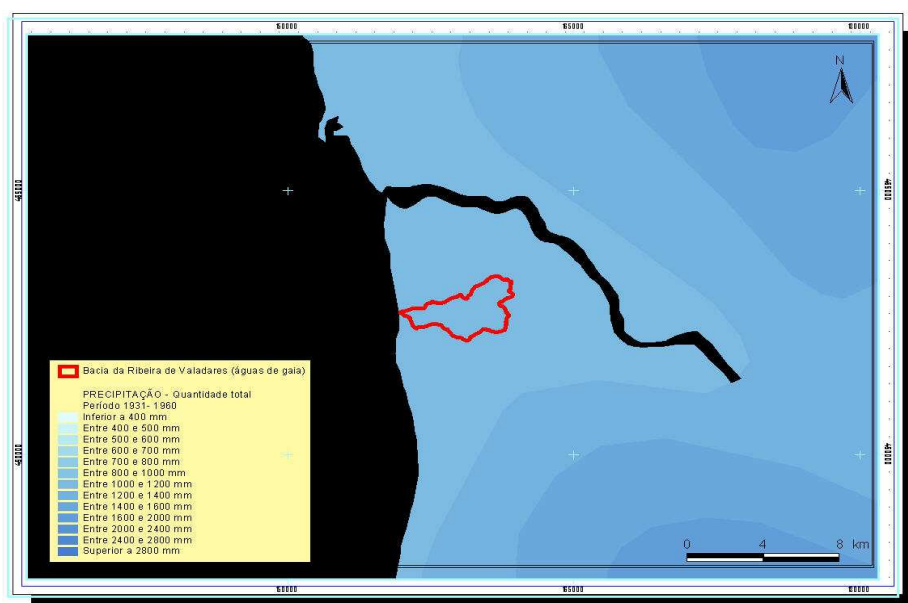


Figura 5.8 – Cartograma representativo da evapotranspiração real média anual na Bacia da Ribeira de Valadares (dados: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente).

Os valores apresentados decorrem de uma operação de sobreposição no SIG e partem da informação disponibilizada gratuitamente no Atlas do Ambiente Digital do Instituto do Ambiente. Os cartogramas que permitiram a sua obtenção encontram-se representados nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10.



**Figura 5.9** – Cartograma representativo da temperatura média anual para o período de 1931 a 1960, para a Bacia da Ribeira de Valadares (dados: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente).



**Figura 5.10** – Cartograma representativo da precipitação total para o período de 1931 a 1960, para a Bacia da Ribeira de Valadares (dados: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente).

### 5.3.7 Resumo

Procurou-se ao longo das anteriores alíneas caracterizar por recurso ao SIG e a informação em formato digital, georreferenciada e, de um modo geral, facilmente acessível, a bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares. Esta caracterização salienta muitos dos pontos a atender aquando da geração

do modelo hidrológico e sem esta a sua construção e interpretação seria certamente menos objectiva. Assim, foram tecidas considerações que balizarão a construção e a interpretação do modelo:

- a parametrização do modelo de escoamento base, quando, por exemplo, se atendeu à constituição geológica da bacia;
- a caracterização do modelo de perdas, quando, por exemplo, se analisou a constituição geológica, pedológica, e do coberto vegetal;
- o estabelecimento do modelo de escoamento directo, por exemplo, ao quantificar a percentagem de área impermeabilizada ou estabelecer a população compreendida na bacia.

A caracterização do relevo da bacia hidrográfica, componente fundamental da análise fisiográfica, será abordada no capítulo em que se debate a elaboração do modelo digital do terreno. Pretende-se, deste modo, fazer esta análise por recurso ao SIG e ao MDT, ao contrário de uma análise mais convencional onde se recorre ao tratamento manual da cartografia e a um conjunto de fórmulas empíricas.

Na Tabela 5.4 encontra-se sistematizada a informação digital a que se recorreu na elaboração do corrente capítulo. A generalidade desta informação encontra-se disponibilizada de forma gratuita nos respectivos domínios de Internet.

**Tabela 5.4** – Representação sistemática da informação digital utilizada na caracterização da Bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares.

Instituição	Informação Utilizada	Domínio	Portal na Internet
Instituto do Ambiente	Carta de Ocupação de Solos	Corine Land Cover 2000	<a href="http://www.apambiente.pt/">http://www.apambiente.pt/</a>
	Carta Litológica	Atlas do Ambiente Digital	
	Evapotranspiração Real		
	Precipitação Total Temperatura Média Anual		
Instituto Geográfico Português	Carta Administrativa Oficial de Portugal	Informação Cadastral	<a href="http://www.igeo.pt/produtos/cadastro/caop/">http://www.igeo.pt/produtos/cadastro/caop/</a>
Instituto Geográfico do Exército	Cartas Digitais de Portugal Continental em Formato <i>raster</i>	Informação Cartográfica Digital	<a href="http://www.igeoe.pt/">http://www.igeoe.pt/</a>

## 5.4 Elaboração do Modelo Digital do Terreno

Seguidamente à caracterização feita foi necessário desenvolver uma metodologia que permita a geração do modelo hidrológico. O primeiro passo conducente a este objectivo passa pela elaboração do MDT.

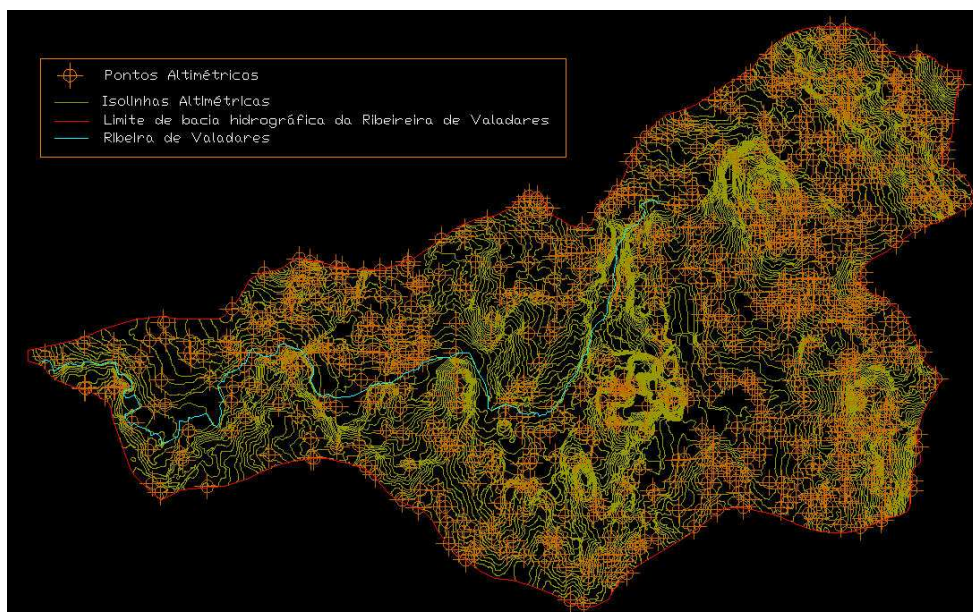
Antes da escolha da cartografia digital a utilizar, houve que considerar qual a escala mais adequada ao objecto em estudo.

Como referido anteriormente, quanto maior for a escala do mapa maiores serão as possibilidades de fazer realçar as diferenciações e, pelo contrário, quanto menor for a escala, maior será o grau de generalização visto que aumenta a dimensão da área cartográfica mínima no terreno.

É, assim, necessário analisar qual a escala da carta a trabalhar quando se pretende calcular automaticamente a rede de drenagem e alguns parâmetros fisiográficos. Uma vez que é a partir dos elementos gráficos digitalizados que tal cálculo é executado, pode esta situação assumir contornos bastante preocupantes, pois além da falta de rigor devida à deficiente representação deve-se ter em conta a possibilidade de gerar dados incorrectos dentro do próprio sistema com base no processo de cálculo.

A hierarquização dos cursos de água reflecte o grau de ramificação ou bifurcação dentro de uma bacia hidrográfica, sendo esta também bastante influenciada pela escala do mapa. Por vezes acontece que alguns tributários não surgem no mapa à escala que se está a trabalhar, quando na realidade existem.

Assim, e atendendo a que a bacia da Ribeira de Valadares apresenta uma área bastante reduzida, a utilização de cartografia de âmbito mais genérico, de que são exemplo as cartas militares, à mencionada escala de 1:25 000, não preenche os requisitos da tarefa a realizar. Utilizou-se, pelas razões apontadas, cartografia altimétrica digital à escala de 1:2 000, gentilmente cedida pela empresa Águas de Gaia. Esta cartografia foi gerada por levantamento topográfico e sua posterior digitalização, os dados encontram-se originalmente em formato CAD, tendo sido exportados para o SIG onde se deu o seu processamento de acordo com alguns dos pressupostos referidos no capítulo 4. Na Figura 5.11 apresenta-se a referida cartografia altimétrica ainda em formato de dados CAD para a bacia hidrográfica em estudo. Foi assumido que o polígono delimitante da bacia hidrográfica, bem como a respectiva linha de água, obtidos por levantamento topográfico, correspondem de facto ao limite natural de drenagem, uma vez que o seu processo de produção é bastante fidedigno.



**Figura 5.11** – Cartografia altimétrica, em formato de dados CAD, balizada à bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares (Fonte: Águas de Gaia).

Após a aquisição da informação digital da área de estudo foi necessário gerar o respectivo modelo digital do terreno. Optou-se pelo formato TIN para inicialmente representar o terreno, sendo este mais capaz de reflectir a heterogeneidade natural do mesmo, embora a análise posterior se tenha processado sobre informação em formato de dados *raster*. A conversão entre estes formatos é uma operação, actualmente, acessível a qualquer SIG comercial.

O software utilizado para a construção do MDT foi o Arcinfo 9.1, recorrendo a uma das suas extensões – *3D analyst*. Este é um módulo específico para a construção e manipulação de modelos digitais do terreno.

A partir da informação altimétrica representada na Figura 5.11, que se salienta possuir a cota  $z$ , i.e., trata-se de informação tridimensional, e recorrendo à linha de água, manualmente atribuída da cota altimétrica, como *breakline* (capítulo 4), foi gerado o MDT no formato TIN.

Os triângulos são formados pela triangulação de Delaunay, sendo os respectivos triângulos considerados como localmente óptimos quando não existir nenhum ponto da triangulação no interior do círculo circunscrito a cada triângulo. O algoritmo utilizado na extensão *3D analyst* constrói directamente a rede de triângulos sem a prévia definição dos polígonos de Voronoi (Thiessen). Os triângulos são testados para um tamanho mínimo passando um círculo através dos três vértices de cada um deles. Se existir algum ponto no seu interior, tem lugar nova triangulação e novo teste. O processo prossegue até o mínimo tamanho ser obtido para cada triângulo da rede.

Na Figura 5.12 é apresentada uma perspectiva tridimensional da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares utilizando o modelo digital do terreno na sua forma de rede de triângulos irregular.

Prosseguiu-se o trabalho com a construção da malha regular (*raster*) correspondente à estrutura TIN criada. Utilizou-se para o efeito o mesmo *software*, ou seja, a extensão *3D analyst* do SIG ArcInfo 9.1, em particular a operação: *convert TIN to raster*.

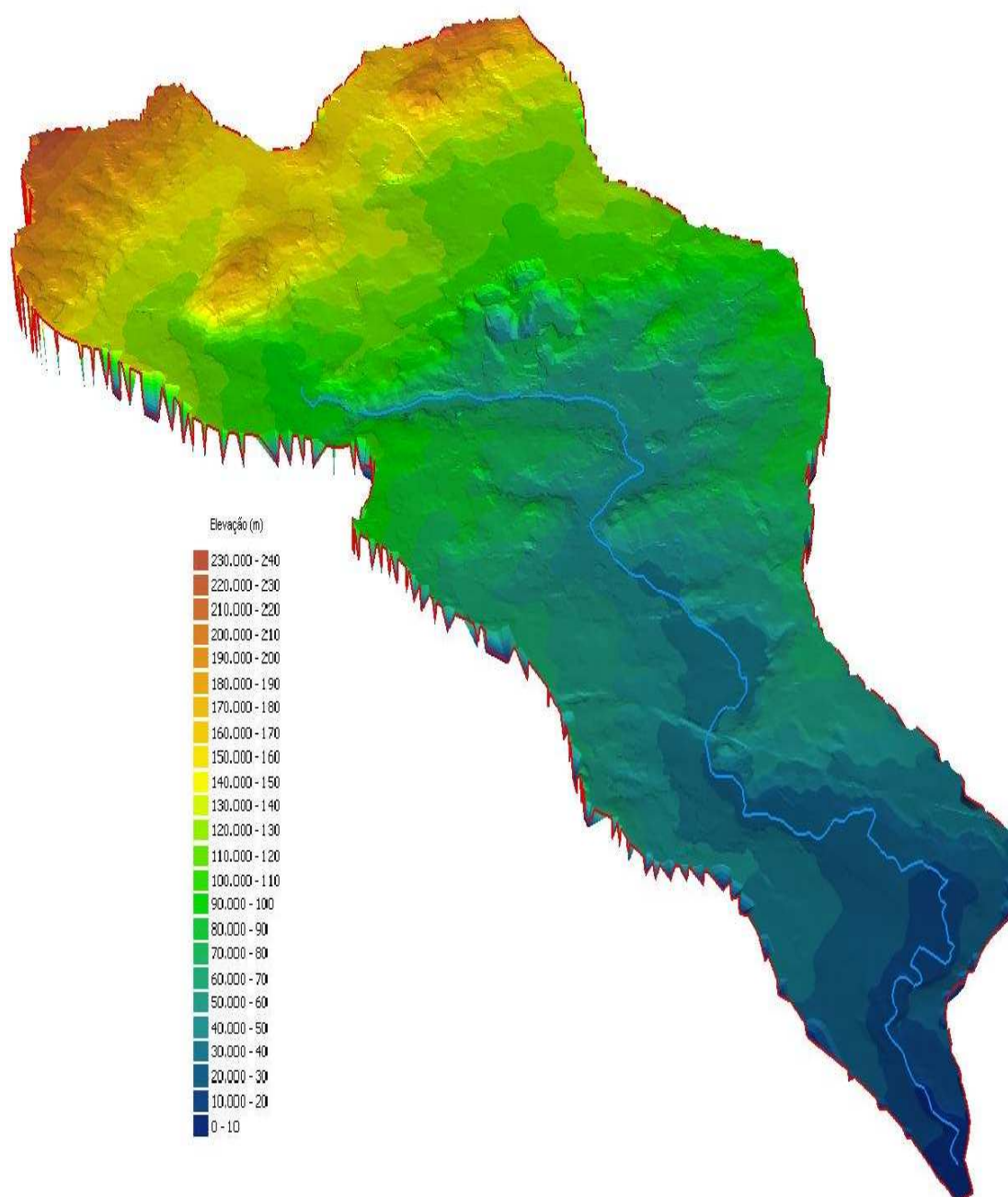
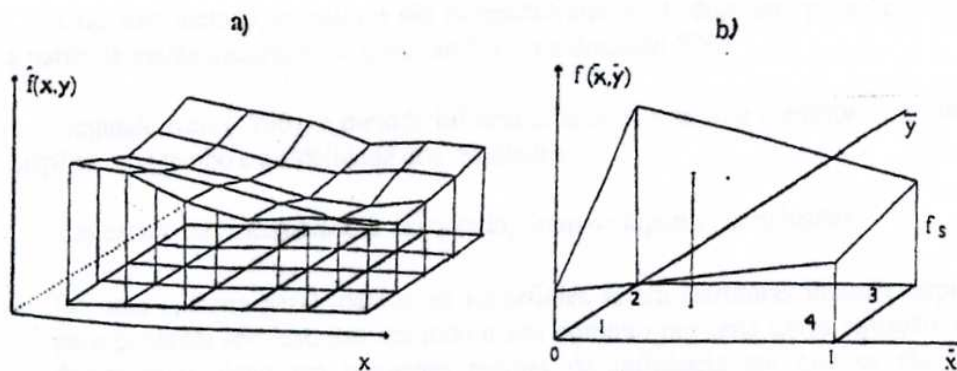


Figura 5.12 – Representação tridimensional do modelo TIN da Ribeira de Valadares

A transformação de cartografia na forma TIN na sua correspondente forma *raster*, é, para o efeito deste trabalho, alcançada pelo método de interpolação bilinear (Figura 5.13). Este recorre a um polinómio do tipo  $h = aMP + bM + cP + d$ , onde são calculados os valores da grelha de *output*, a partir dos valores dos quatro cantos mais próximos dos *pixels*, considerando uma distância ponderada àquele ponto (Granado, 1996).



**Figura 5.13** – Representação gráfica do processo de interpolação bilinear ao MDT. a) Obtenção da grelha; b) Interpolação num *pixel* da grelha, nas direcções  $x$  e  $y$  (extraído de Granado, 1996).

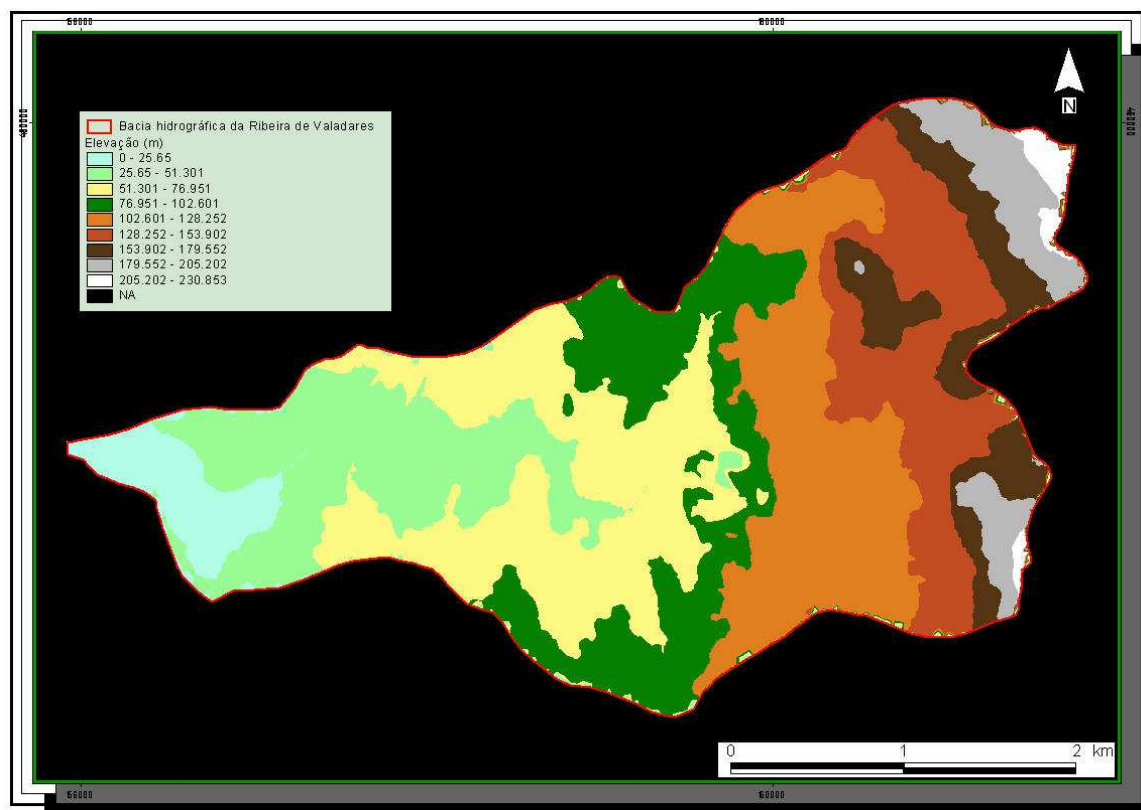
Com este método, os valores são estimados através de duas interpolações lineares a partir da malha quadrada, na direcção  $XX$  e na direcção  $YY$ . De acordo com Granado, 1996, este método constitui o melhor compromisso entre dispêndio de tempo e fidelidade dos resultados.

A qualidade da interpolação depende da precisão, i.e., número e distribuição dos pontos conhecidos no cálculo, e da adequação da função matemática ao terreno em estudo. De uma maneira geral, devido às superfícies serem estruturas demasiado complexas para que possam ser descritas em todo o seu domínio por uma única equação, opta-se por dividir o plano em pequenas regiões.

Atendendo às breves considerações teóricas elaboradas, apresenta-se na Figura 5.14 a grelha (*raster*) resultante da interpolação bilinear da estrutura TIN anteriormente apresentada.

Na construção do MDT na sua forma *raster* usou-se uma resolução de 1 m para as células, obtendo-se 3628 linhas e 5897 colunas para a área em estudo. A escolha duma resolução tão reduzida advém de, ao contrário do que acontece no modelo TIN, existir uma distribuição uniforme da altitude no interior de cada célula. Assim, quanto maior o tamanho do *pixel* ou a variação da altitude, menor será a precisão proporcionada pelo modelo, podendo os algoritmos de pesquisa apresentar algumas dificuldades em encontrar variabilidade suficiente entre células, de forma a gerar os valores para os diferentes parâmetros que sobre o MDT são calculados.

Admite-se que o modelo *raster* gerado, embora corresponda a dados digitais de elevado volume, com uma inerente morosidade dos processos de cálculo, tenha a resolução adequada à dimensão e relevo da bacia hidrográfica em estudo. Pode constatar-se da análise da Figura 5.14 que a variação altimétrica na porção terminal da bacia é pequena, ou seja, esta apresenta uma secção terminal bastante plana, algo de espectável tratando-se de uma bacia hidrográfica costeira. Salienta-se, que a opção por uma resolução desta natureza é aplicável, uma vez que a cartografia de partida apresenta uma escala suficientemente elevada para que a informação altimétrica contida na grelha não seja redundante.



**Figura 5.14** – Representação do modelo digital do terreno da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares na sua forma *raster*.

De referir, ainda, que inicialmente se produziu um MDT, na sua versão TIN, unicamente com as curvas de nível e os pontos cotados, verificando-se, desde logo, que este era menos consistente na modelação da linha de água. Utilizando a linha de água (ainda que simplista) disponibilizada pela empresa Águas de Gaia, e atribuindo a esta valores altimétricos de acordo com a zona em que se insere cartograficamente, foi possível obter alguma representatividade no MDT do curso de água principal da bacia, como é razoavelmente perceptível na perspectiva tridimensional representada na Figura 5.12.

#### 5.4.1 Caracterização do Relevo

Tal como referido na alínea 5.3 recorrer-se-á ao MDT gerado para realizar a caracterização do relevo da bacia da Ribeira de Valadares, assumindo este destaque no condicionamento de algumas das características do escoamento superficial.

A caracterização efectuada aborda dois pontos:

- Construção da carta e curva hipsométrica
- Elaboração da carta de declives

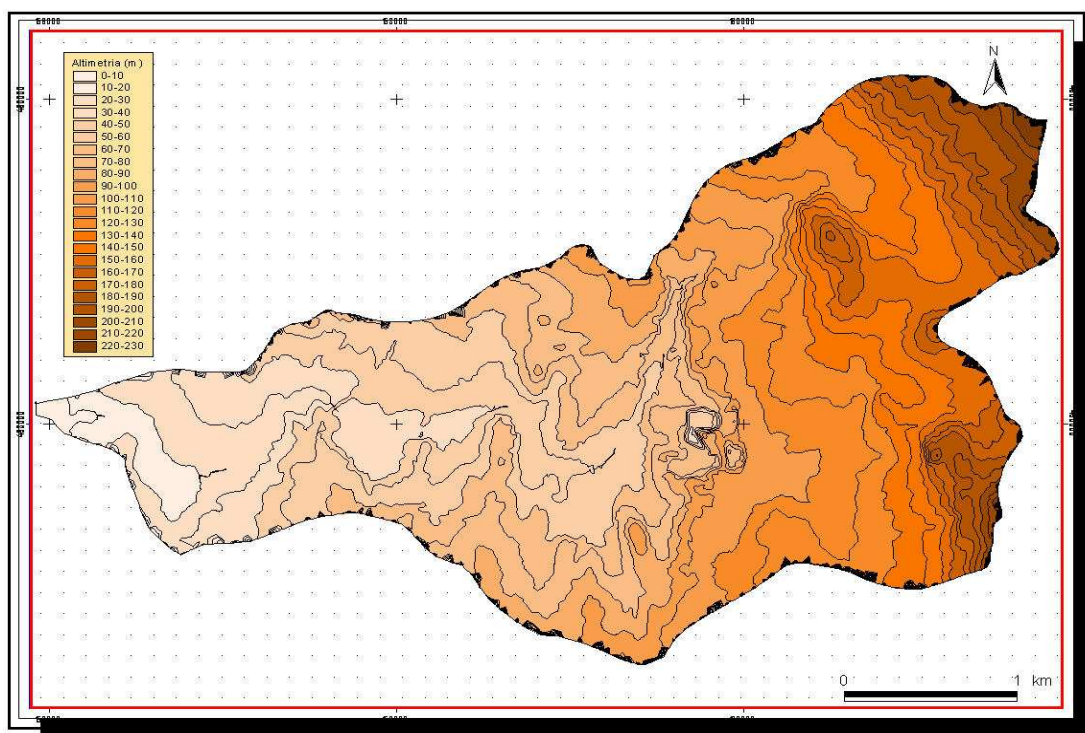


Figura 5.15 – Carta hipsométrica da bacia de Valadares.

A curva hipsométrica é uma forma de representação gráfica do relevo de uma bacia, relacionando a variação da área da bacia com a altitude. Esta variação é, normalmente representada graficamente pela percentagem de área existente acima de uma dada altitude. Na sua elaboração por recurso ao MDT começou-se por reclassificar a grelha apresentada na Figura 5.14, de modo a que os intervalos altimétricos distem de 10 m, e posteriormente à sua vectorização. Desta forma a cada intervalo altimétrico de 10 m corresponde um polígono com um valor de área mensurável. A carta hipsométrica resultante destas operações encontra-se representada na Figura 5.15.

Tendo por base a carta hipsométrica e por cálculo das áreas referentes a cada classe hipsométrica foram obtidos os valores expressos na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5** – Valores das áreas referentes a cada classe hipsométrica, seu valor de área acumulada e respectivas fracções percentuais da área total.

Altitude (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (%)
0-10	0,05	0,5	0,05	0,5
10-20	0,24	2,3	0,29	2,8
20-30	0,50	4,7	0,79	7,4
30-40	0,63	6,0	1,42	13,4
40-50	0,69	6,4	2,11	19,8
50-60	1,00	9,4	3,11	29,2
60-70	0,81	7,6	3,92	36,8
70-80	0,76	7,2	4,68	44,0
80-90	0,61	5,7	5,29	49,7

Altitude (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (%)
90-100	0,51	4,8	5,80	54,4
100-110	0,70	6,6	6,50	61,0
110-120	0,71	6,6	7,21	67,7
120-130	0,71	6,7	7,92	74,3
130-140	0,54	5,1	8,46	79,5
140-150	0,53	5,0	8,99	84,4
150-160	0,51	4,8	9,50	89,2
160-170	0,28	2,7	9,79	91,9
170-180	0,23	2,2	10,02	94,1
180-190	0,22	2,1	10,24	96,2
190-200	0,22	2,0	10,46	98,2
200-210	0,13	1,2	10,59	99,4
210-220	0,04	0,3	10,62	99,8
220-230	0,02	0,2	10,65	100,0

Os dados apresentados na tabela anterior são representados na sua forma gráfica na Figura 5.16.

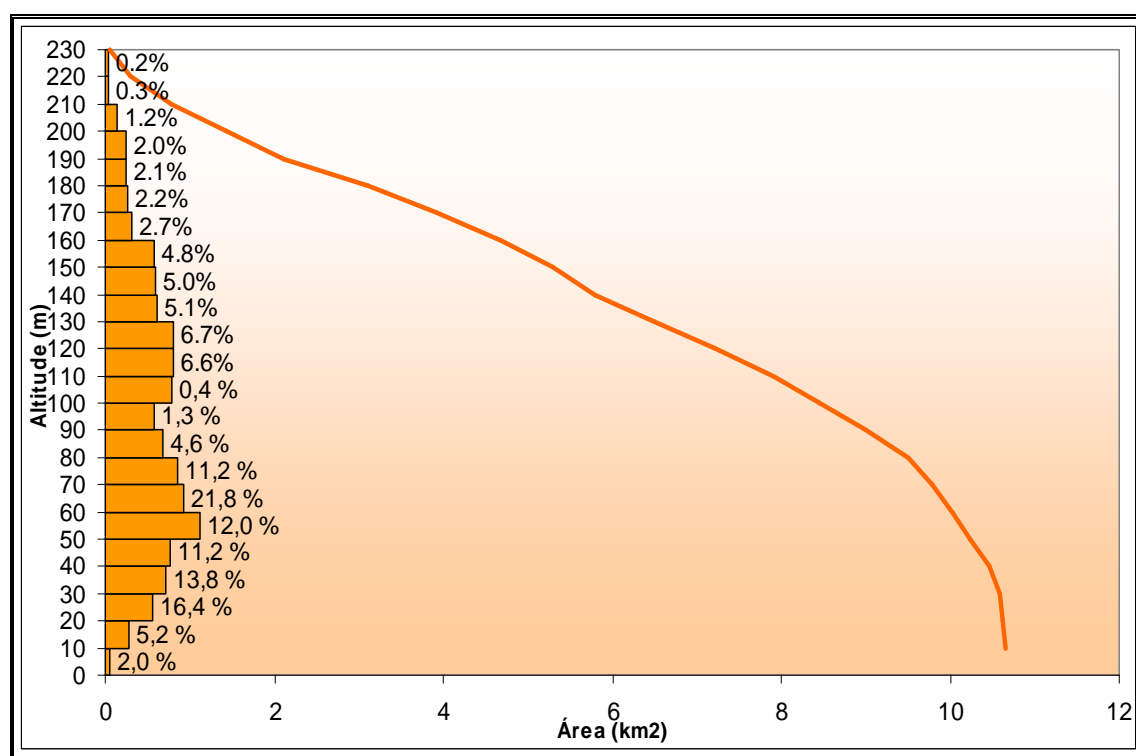
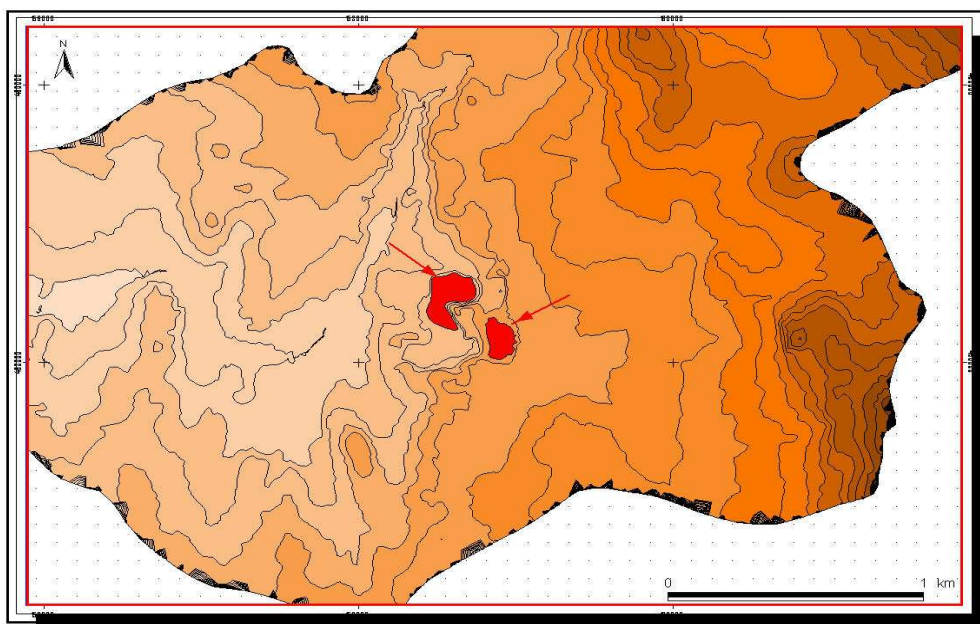


Figura 5.16 – Curva hipsométrica da bacia de Valadares.

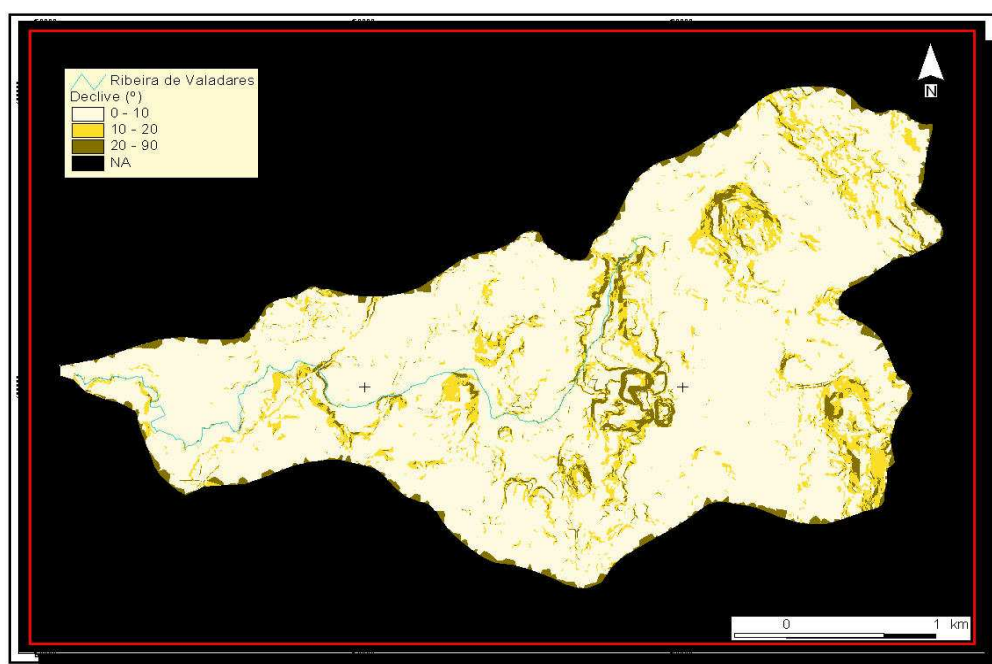
Da análise das Figuras 5.15, 5.16 e da Tabela 5.5 é possível concluir que grande parte da área da bacia da Ribeira de Valadares (80%) se encontra abaixo da cota altimétrica 140. É, igualmente, possível constatar a existência de duas zonas do terreno que correspondem a depressões, totalizando estas um valor de 0,044 km<sup>2</sup>. Na Figura 5.17 particularizam-se essas duas áreas. Aquando da

elaboração do modelo hidrológico, o volume disponível para armazenamento de precipitação destas deve, idealmente, ser tido em consideração.



**Figura 5.17** – Representação de duas possíveis zonas de acumulação de precipitação na bacia de Valadares.

A informação obtida é ainda mais útil se complementada com a carta de declives. O seu processo de cálculo executa o quociente entre a diferença de altitudes e a distância entre o centro de cada célula e o seu vizinho mais próximo, à semelhança do método D8 para delimitação de bacias hidrográficas (capítulo 4). O resultado, expresso como a medida de um ângulo, em graus, apresenta-se na Figura 5.18.



**Figura 5.18** – Carta de declives da bacia de Valadares.

A carta de declives permite verificar que dominam valores ligeiros a moderados ( $0-10^\circ$ ), sobretudo no terço final da bacia, sendo esta área, provavelmente, mais facilmente inundável. Mais para montante e em algumas zonas do centro verifica-se a existência de algumas áreas com declives acentuados ( $10-20^\circ$ ) e mesmo muito acentuados ( $> 20^\circ$ ).

A carta da Figura 5.18 parece confirmar as duas zonas anteriormente definidas como efectivamente depressões, uma vez que os valores de declividade nas suas imediações são de facto acentuados. As duas observações em conjunto (carta hipsométrica e carta de declives) são concordantes, restando, aquando da elaboração do modelo hidrológico, a sua confirmação nos ortofotomapas da bacia da Ribeira de Valadares, igualmente disponibilizados pela empresa Águas de Gaia.

De fora da caracterização do relevo da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, ficou a elaboração do perfil longitudinal da linha de água. Optou-se por fazer essa descrição aquando da geração automática da rede de drenagem sendo, então, possível a descrição não só da linha de água principal como dos seus tributários, mesmo sendo estes de carácter efémero.

## 5.5 Delineamento de Sub-Bacias Hidrográficas e Rede de Drenagem

Um dos aspectos mais importantes na análise de cheias é a determinação exacta de onde, dada a entrada de água na bacia hidrográfica, esta irá escoar em canal, incluindo a direcção geral do escoamento e a sua magnitude. Este conhecimento providencia a base de previsão do escoamento de cheia e identificação de zonas inundáveis. Como foi destacado anteriormente, este tipo de informação depende das características do terreno, em particular da sua elevação e declive. Tal informação foi adquirida por recurso ao MDT.

No corrente subcapítulo pretende-se delinear a rede de drenagem da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares por processamento do MDT elaborado de acordo com os algoritmos apresentados no capítulo 4. O grau de detalhe que se procura obter pode eventualmente não ter uma tradução real. Não obstante, o reconhecimento pormenorizado desta rede apresenta-se como uma mais valia do ponto de vista da modelação hidrológica, já que na ocorrência dum evento de precipitação muitos dos pequenos vales que não apresentam um escoamento permanente, vão, nessa situação, ser fundamentais no encaminhamento da água, sendo, deste modo, mais exequível a sua tradução num modelo físico.

Concomitantemente, à rede de drenagem gerada corresponderão unidades hidrológicas diferenciadas dentro da bacia hidrográfica, designadas de sub-bacias. Estas resultam da identificação das áreas drenantes para cada segmento da referida rede. Em simultâneo, procurar-se-á que as sub-bacias delimitadas correspondam a zonas homogéneas em concordância com a caracterização produzida ao longo de 5.3. Assim e idealmente, estas subunidades teriam características de uso do solo, geológicas e de tipo de solos idênticas, tornando a parametrização dos respectivos modelos hidrológicos fiel à realidade.

Finalmente, evidencia-se que a definição das sub-bacias hidrográficas é fundamental do ponto de vista da estrutura do modelo hidrológico a criar. Estas serão as unidades hidrológicas de tal modelo, sendo o resultado da sua modelação encaminhado sucessivamente para jusante, pelo modelo de propagação em canal, até que se atinja a secção terminal. Esta metodologia evidencia, desde logo, a opção por um modelo hidrológico agregado, o que atendendo à reduzida área da bacia em estudo (aproximadamente 10,5 km<sup>2</sup>) se traduz, na realidade, num modelo quase distribuído, colhendo os benefícios das duas abordagens.

### 5.5.1 Software utilizado

O *software* escolhido para levar a cabo o processamento do MDT elaborado foi o HEC-GeoHMS (*Hydrologic Engineering Center – Geographic Hydrologic Modeling System*), versão 1.1, do Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos da América (*US Army Corps of Engineers*). Trata-se de uma extensão de domínio público do SIG ArcView 3.2, correndo em conjunto com a sua extensão de análise espacial (*Spatial Analyst*).

Este *software* foi desenvolvido como um conjunto de ferramentas hidrológicas geo-espaciais para utilização por hidrologistas em aproveitamento das potencialidades do SIG. A extensão permite a visualização de informação hidrológica espacial, documentação de características hidrológicas de bacias hidrográficas, análise espacial, na sua vertente de extracção de parâmetros hidrológicos, o delineamento de bacias, sub-bacias e redes de drenagem e a produção de *inputs* para modelos hidrológicos. Trabalhar com este *software* através dos seus interfaces, menus e ferramentas, faculta a elaboração de parte do modelo hidrológico de uma forma expedita e intuitiva.

A criação, por esta extensão, dos ficheiros digitais que constituem a base estrutural, ou espacial, do modelo hidrológico e a extracção de parâmetros hidrológicos, pela mesma, será objecto de maior aprofundamento aquando da criação do modelo hidrológico.

### 5.5.2 Eliminação de Depressões do MDT

O modelo de eliminação das depressões do terreno, como as apontadas na Figura 5.17, remete para modelos do tipo de eliminação dos pontos de acumulação após o delineamento da rede de drenagem, embora esta seja, paradoxalmente, a primeira etapa no acondicionamento do MDT. O algoritmo utilizado pela extensão HEC-GeoHMS realiza numa primeira fase um processamento iterativo, correndo todas as etapas conducentes à obtenção da rede de drenagem, o objectivo será determinar quais as depressões que efectivamente interferem com os possíveis percursos de drenagem, sendo eliminadas as que potencialmente o façam. Depressões isoladas da rede de drenagem permanecem inalteradas.

Após a obtenção da grelha ausente de sulcos, interferentes com a determinação dos possíveis traçados das linhas de água, os seguintes algoritmos têm a possibilidade de operar sem o risco de geração de uma rede incongruente.

O processo de eliminação destas zonas, em si, consiste no elevar da cota das células que constituem a depressão à mais baixa das oito quadrículas vizinhas quando o respectivo operador percorre o local côncavo, restando deste modo uma área plana.

O problema do tratamento das depressões do MDT é, como referido em 4.3.5, complexo. Se estas resultam de erros ocorridos durante o processo de geração do próprio MDT ou correspondem a verdadeiras concavidades do terreno torna-se numa questão a atender, nomeadamente por comparação visual. Não obstante, a sua eliminação para obtenção de uma correcta interpretação do MDT pelos operadores dos algoritmos que o percorrem é fundamental, e, consensualmente, em metodologias do tipo *raster* este objectivo só pode ser alcançado num terreno livre de tais irregularidades.

Na Figura 5.19 é representado o MDT, na sua forma *raster*, ausente de depressões altimétricas. Na sua génese esteve o modelo apresentado na Figura 5.14. A operação executada na extensão HEC-GeoHMS foi a *fill sinks*, do menu *terrain preprocessing*.

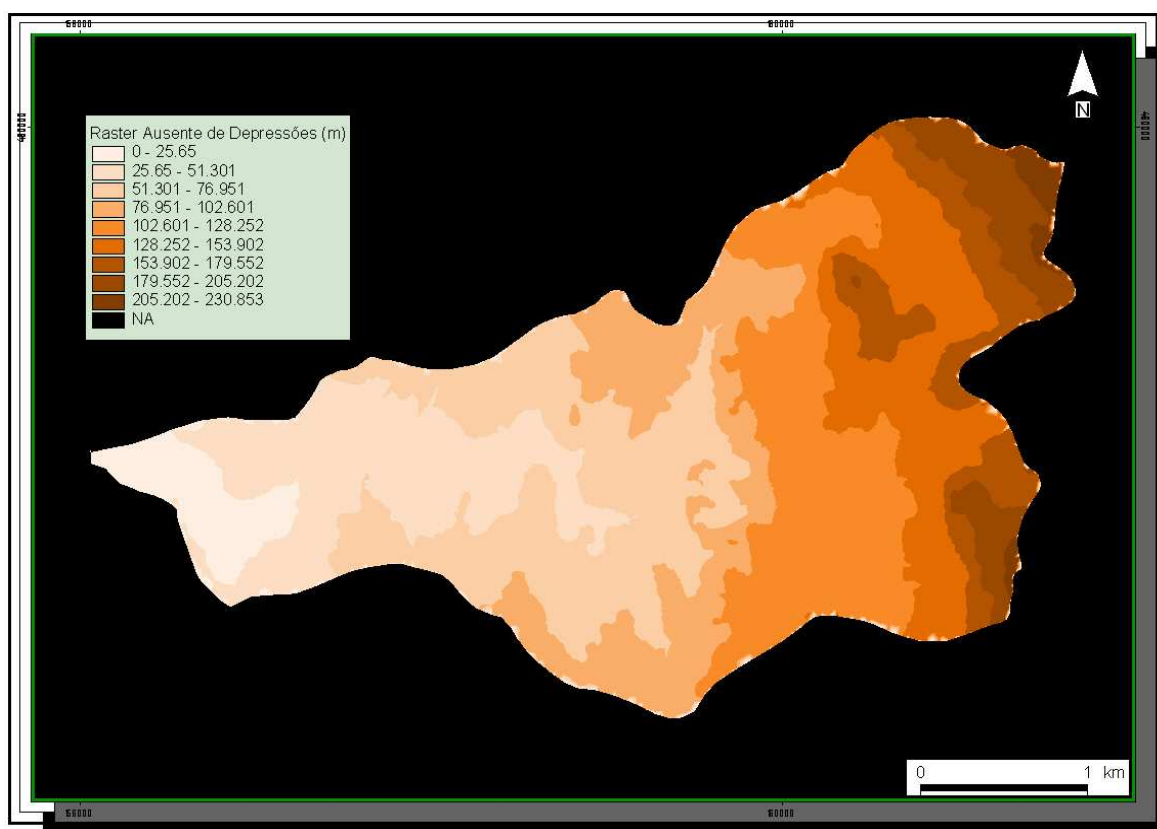


Figura 5.19 – Representação do MDT da bacia da Ribeira de Valadares ausente de depressões altimétricas.

Por sobreposição da grelha da Figura 5.19 ao *raster* original do terreno (Figura 5.14), e aplicando um operador espacial de cálculo do valor da diferença entre cada célula desta, obteve-se a grelha que evidencia as zonas do terreno que foram, de facto, preenchidas. Esta é apresentada na Figura 5.20.

Sobrepondo as zonas isoladas na Figura 5.20 ao ortofotomapa da bacia da Ribeira de Valadares resulta a Figura 5.21 (pág. 113), onde se verifica que a zona identificada como número 2 corresponde, de facto, a uma depressão altimétrica do terreno, mais precisamente a uma área de extracção de granito (por contraposição às cartas de uso do solo e carta geológica apresentadas em 5.3). A zona reconhecida como número 1 apresenta-se, possivelmente, como parte do leito maior da Ribeira de Valadares. Por causas naturais ou artificiais, também uma provável área inundável.

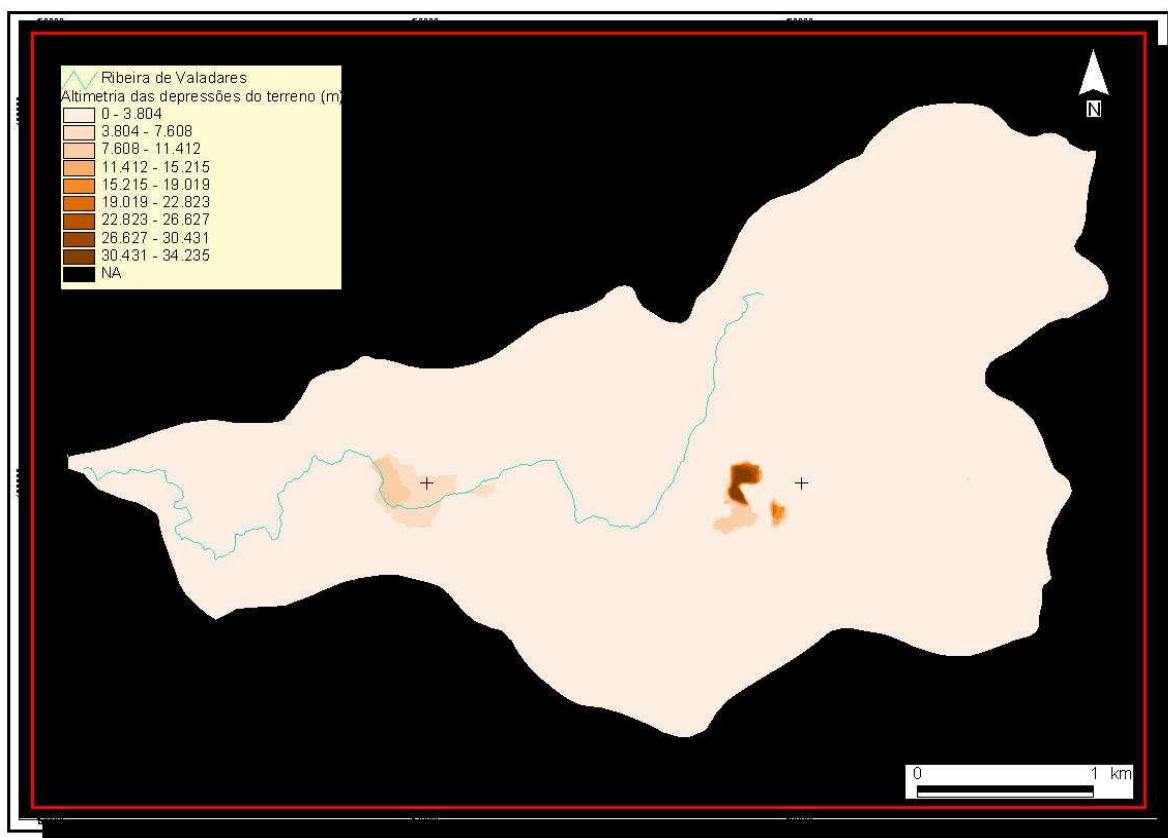


Figura 5.20 – Representação altimétrica das depressões do terreno encontradas para a bacia de Valadares

### 5.5.3 Grelha da Direcção do Escoamento

Trabalhando sobre a grelha livre de depressões altimétricas apresentada na Figura 5.19, e aplicando o modelo de de O`Callaghan & Mark, 1984, usualmente designado por modelo do D8 (*Deterministic eight point*), é agora possível derivar a grelha de direcção do escoamento.

A grelha de direcção do escoamento representa, genericamente, a direcção do fluxo de água de uma célula para outra sobre a totalidade da grelha. A cada uma das células de  $1 \text{ m}^2$  é atribuído um número que denota a direcção do escoamento, ou o *pixel* adjacente para a qual o fluxo se desloca. Imaginando uma célula quadrada circunscrita em todos os seus lados e cantos por outras idênticas, torna-se claro existirem apenas oito direcções possíveis para o escoamento (Figura 4.5).



**Figura 5.21** – Ortofotomapa da bacia de Valadares. Representação das depressões do terreno encontradas (Fonte: EM Águas de Gaia)

Estas direcções representam-se por números numa série de potências de base dois (este=1, sudeste=2, sul=4, sudoeste=8, oeste=16, noroeste=32, norte=64, nordeste=128). A direcção de escoamento, como mencionado no capítulo 4, para uma dada célula é avaliada calculando o percurso de vazão mais curto, onde surge o declive entre células mais acentuado. As distâncias nesta análise são tomadas como medidas entre o centro dos diferentes *pixels*.

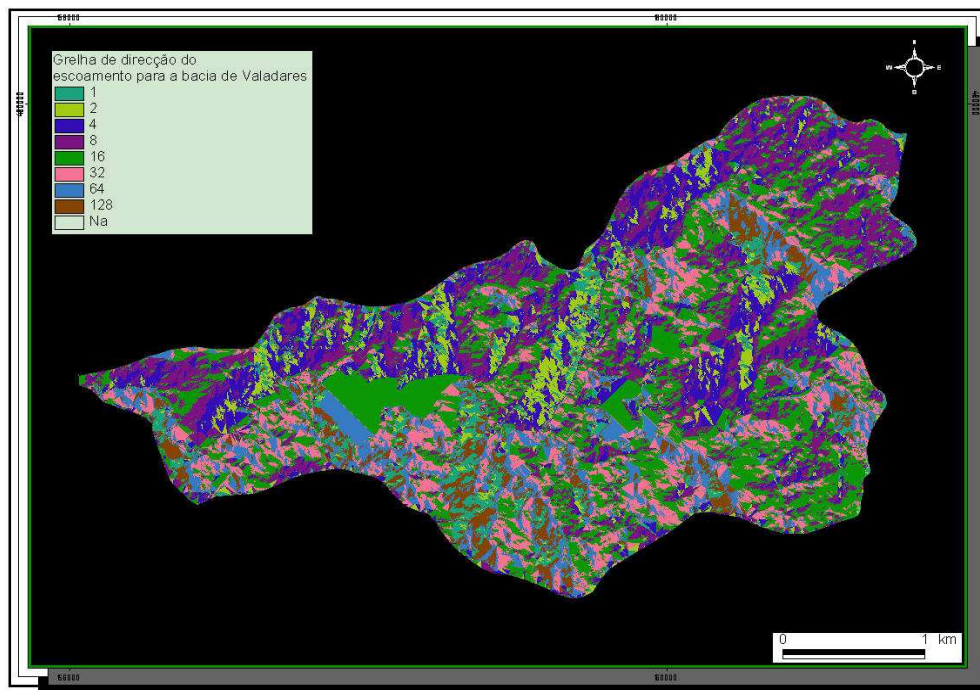


Figura 5.22 – Grelha de direcção do escoamento para a bacia de Valadares.

A geração da grelha de direcção do escoamento é conseguida utilizando a extensão HEC-GeoHMS, mais precisamente a operação de *flow direction*, do menu *terrain preprocessing*.

A grelha resultante é representada na Figura 5.22, onde as direcções de escoamento surgem codificadas por cores, de acordo com a legenda de tal figura.

De notar que as zonas anteriormente demarcadas como de depressão altimétrica apresentam cor número 16 (legenda Figura 5.22), i.e., como resultado do preenchimento do MDT estas foram forçadas a drenar para oeste, no sentido de jusante. Não interferindo, deste modo, com potenciais áreas de acumulação, na posterior definição da rede de drenagem.

#### 5.5.4 Grelha de Escoamento Acumulado

Baseado na grelha de direcção do escoamento derivada da grelha do terreno corrigida, outro importante *raster* pode ser obtido. A grelha de escoamento acumulado determina o número de células que drenam para uma dada célula. Embora este cálculo possa parecer o resultado, novamente, da simples análise das oito células vizinhas, a elaboração desta grelha implica o cálculo cumulativo das células a montante de cada célula individual da grelha de direcção do escoamento. Esta grelha, gerada na extensão HEC-GeoHMS, mais precisamente pela operação *flow accumulation*, do menu *terrain preprocessing*, aponta as células onde a água se acumula. Células com altos valores de acumulação

de escoamento, acima do limiar de área mínima definida pelo utilizador, assumem-se como pertencentes à rede de drenagem. Este limiar será aprofundado na alínea seguinte.

A grelha resultante é representada na Figura 5.23. O número de células que drenam para a respectiva célula de jusante é contabilizado e classificado em intervalos representados por diferentes cores. As cores mais pronunciadas representam as células passíveis de integrar a rede de drenagem.

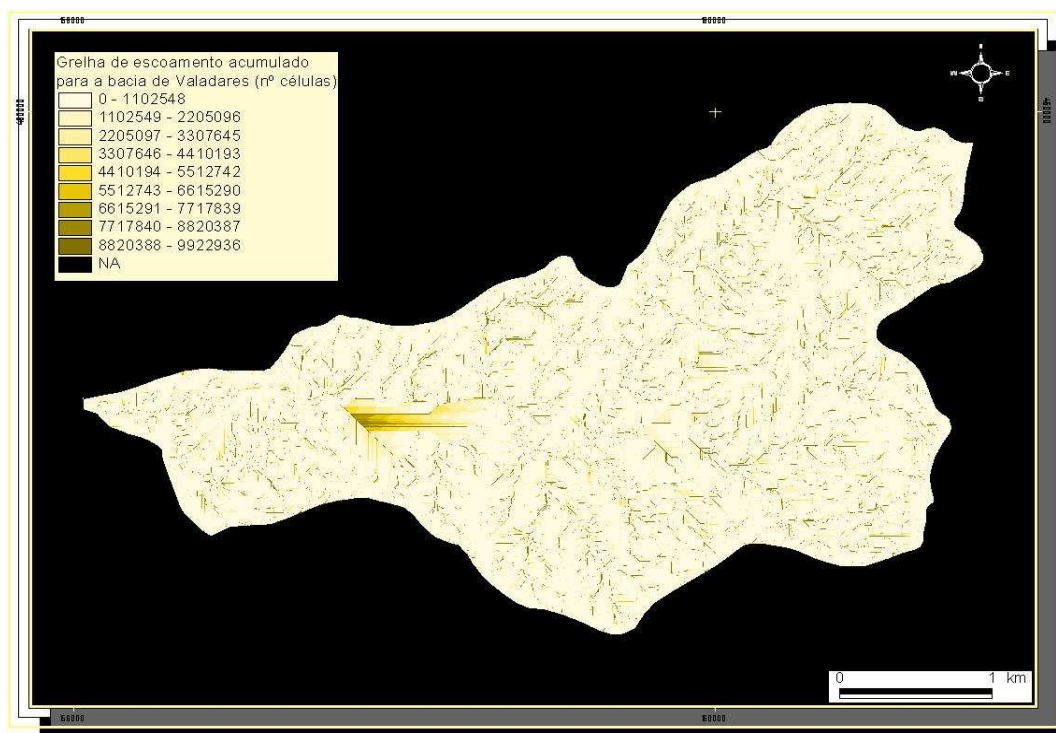


Figura 5.23 – Grelha de escoamento acumulado para a bacia de Valadares.

Dada a reduzida resolução de trabalho a Figura 5.23 evidencia toda uma rede de drenagem que pode potencialmente ser delineada. O juízo do operador e os dados de caracterização balizam o grau de detalhe com que tal rede deve ser delineada.

De notar, ainda, que a depressão altimétrica anteriormente referida por zona número 1 (Figura 5.21) apresenta uma acumulação de escoamento algo confusa, evidenciando, uma vez mais, a sua possível natureza de área inundável.

### 5.5.5 Delineamento de Bacia, Sub-Bacias e Rede de Drenagem

Partindo das grelhas de direcção de escoamento e de acumulação de escoamento, forma-se desde logo uma imagem das características hidrológicas do terreno. Não só apontam para análises da sua elevação e tendências gerais do escoamento, mas permitem também determinar onde se formam canais de escoamento e as respectivas áreas drenantes. Arbitrando um valor limiar de área, ou de número de células, necessário para que se considere a célula alvo como integrante da rede de drenagem, torna-se possível obter a rede de drenagem. Este passo, delimitar da rede de drenagem,

segue-se no esquema de processamento da extensão HEC-GeoHMS, mais precisamente pela operação *stream definition*, do menu *terrain preprocessing*.

Para a resolução de 1 m utilizada na bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, optou-se inicialmente por um valor de 100 000 células, ou seja 0,1 km<sup>2</sup>, para que a célula, para onde esta área de montante drena, seja considerada como parte de uma linha de água. A grelha gerada em resultado desta escolha, grelha de rede de drenagem, representa uma sequência de células associadas a um único valor na respectiva tabela da base de dados, o que faz com que a qualquer célula em que surja relacionado um valor superior a 100 000, esta faça parte da rede de drenagem e seja representada pelo número um. Por oposição, se esse valor for menor é associado o valor de zero a essa célula, não integrando esta a respectiva rede. Este processamento é elaborado por uma filtragem da grelha de escoamento acumulado, ao nível da sua tabela associada, sendo claramente uma operação de manipulação de bases de dados com um resultado binário (0 se menor que 100 000, 1 se maior que 100 000). A grelha resultante é representada na Figura 5.24.

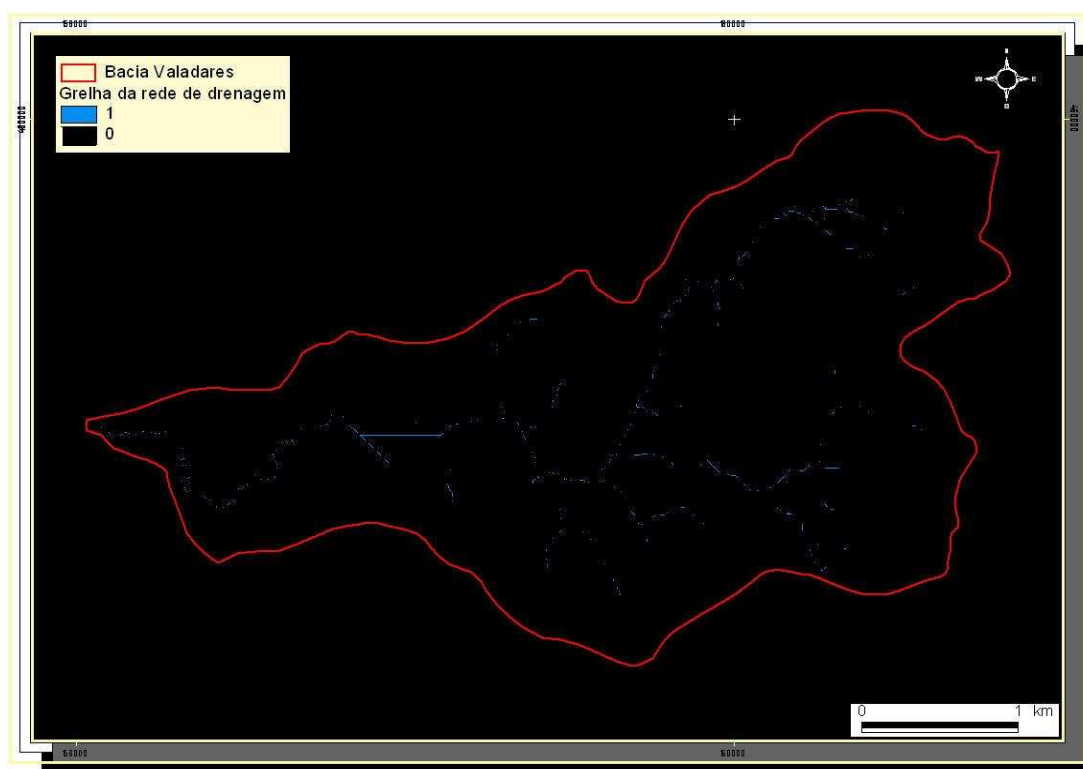
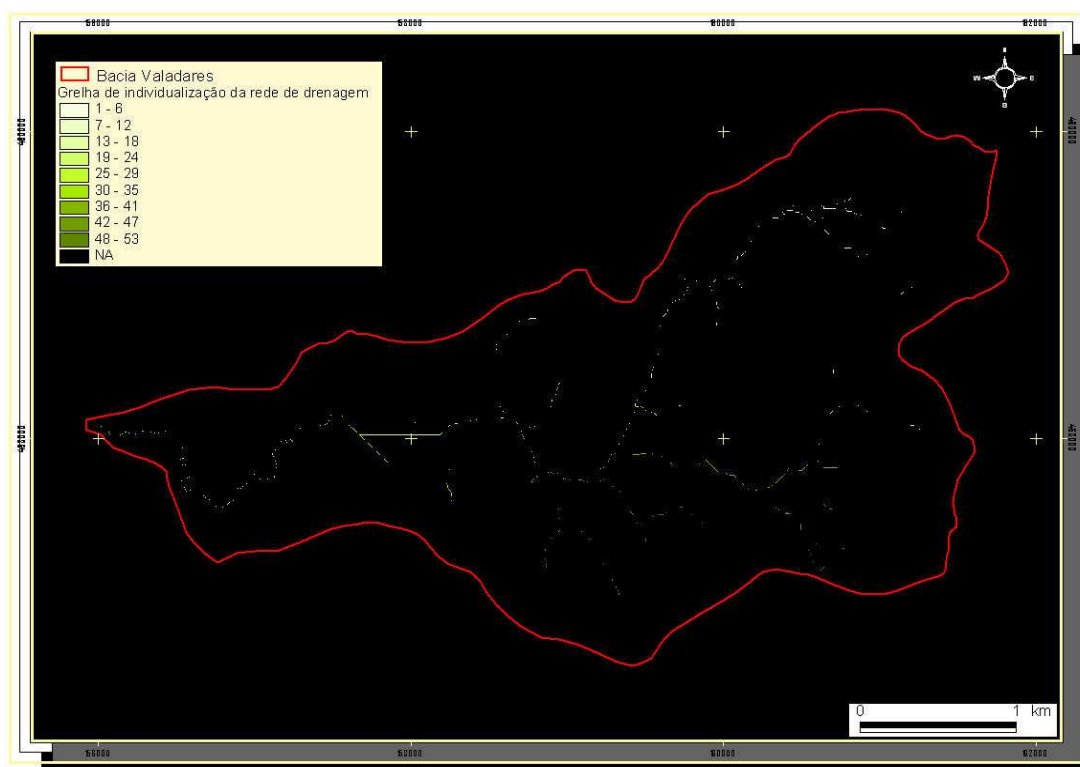


Figura 5.24 – Grelha da rede de drenagem para a bacia de Valadares

A grelha de individualização da rede de drenagem pode ser alcançada directamente deste último *raster*. Neste, segmentos individuais são identificados separadamente e não como parte de uma rede, auxiliando as células de confluência ou nós esta operação. Esta informação possibilita a identificação e análise de um segmento particular da rede e aponta uma primeira relação de conectividade do sistema, i.e., quais os segmentos que se antecedem ou sucedem. A grelha resultante encontra-se representada na Figura 5.25, correspondendo a cada segmento um número identificativo.

Esta é gerada na extensão HEC-GeoHMS, mais precisamente pela operação *stream segmentation*, do menu *terrain preprocessing*.

Finalmente, apresenta-se a grelha necessária para completar o processamento do terreno. Cada um dos segmentos representados na grelha de individualização da rede de drenagem tem a sua área de drenagem específica, resultante da acumulação das áreas de drenagem de cada célula que o constitui. Esta relação permite a delimitação das sub-bacias hidrográficas e a sua reunião define o conjunto da bacia hidrográfica.



Os limites de cada sub-bacia são traçados usando as grelhas de direcção de escoamento e de escoamento acumulado aplicadas à grelha de individualização de segmentos. A grelha de escoamento acumulado fornece a informação do número de células que drenam para cada célula contida num dado segmento da rede. A grelha de direcção do escoamento pode então ser referenciada para determinar precisamente quais as células de montante que estão englobadas nesse número. As células limítrofes resultantes desta determinação são assinaladas e o processo repete-se para cada segmento. Uma vez mais, esta operação é realizada pela extensão HEC-GeoHMS, mais precisamente pela operação *watershed delineation*, do menu *terrain preprocessing*. A grelha das sub-bacias é apresentada na Figura 5.26.

Recorrendo a operações de vectorização, integradas na extensão HEC-GeoHMS, mais precisamente pelas operações *watershed polygon processing* e *stream segment processing*, do menu *terrain preprocessing*, torna-se possível individualizar os temas respeitantes às sub-bacias e rede de drenagem. Estes elementos gráficos são apresentados na Figura 5.27.

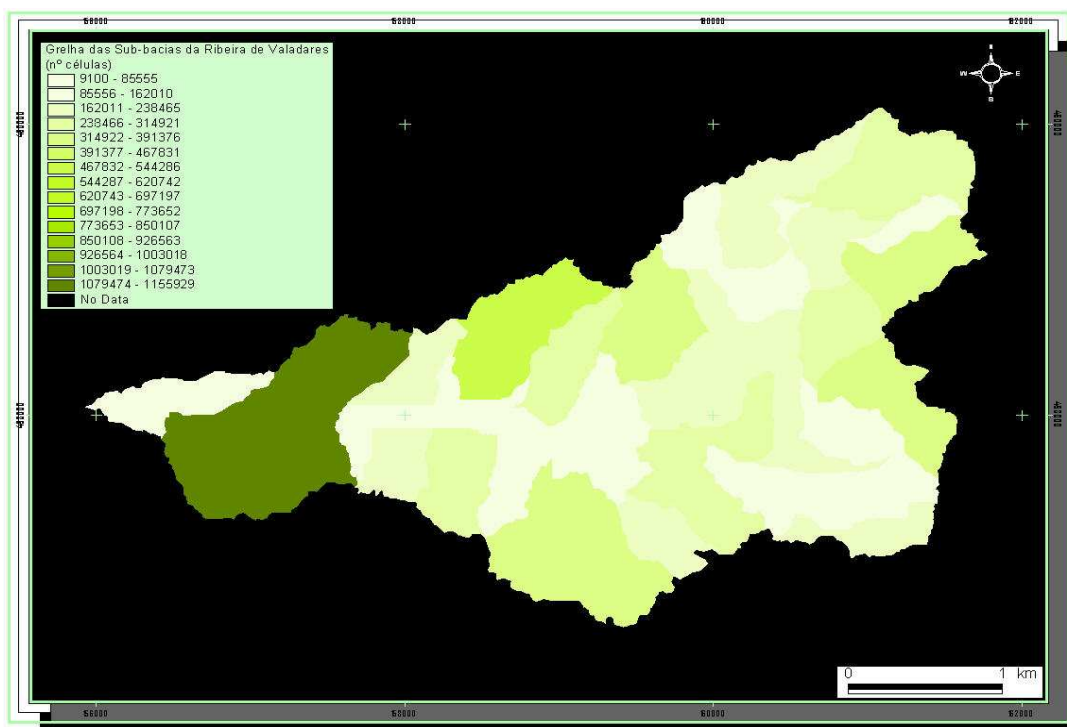


Figura 5.26 – Grelha de sub-bacias para a bacia de Valadares.

É possível verificar na Figura 5.27, que a cada segmento da rede hidrográfica corresponde uma sub-bacia hidrográfica. Esta relação de um para um facilita cálculos futuros, determinando uma ligação, ao nível da base de dados, entre estes dois temas vectoriais. O estabelecimento desta ligação reforça o conceito de cada uma das sub-bacias delimitadas constituir uma unidade hidrológica individualizada.

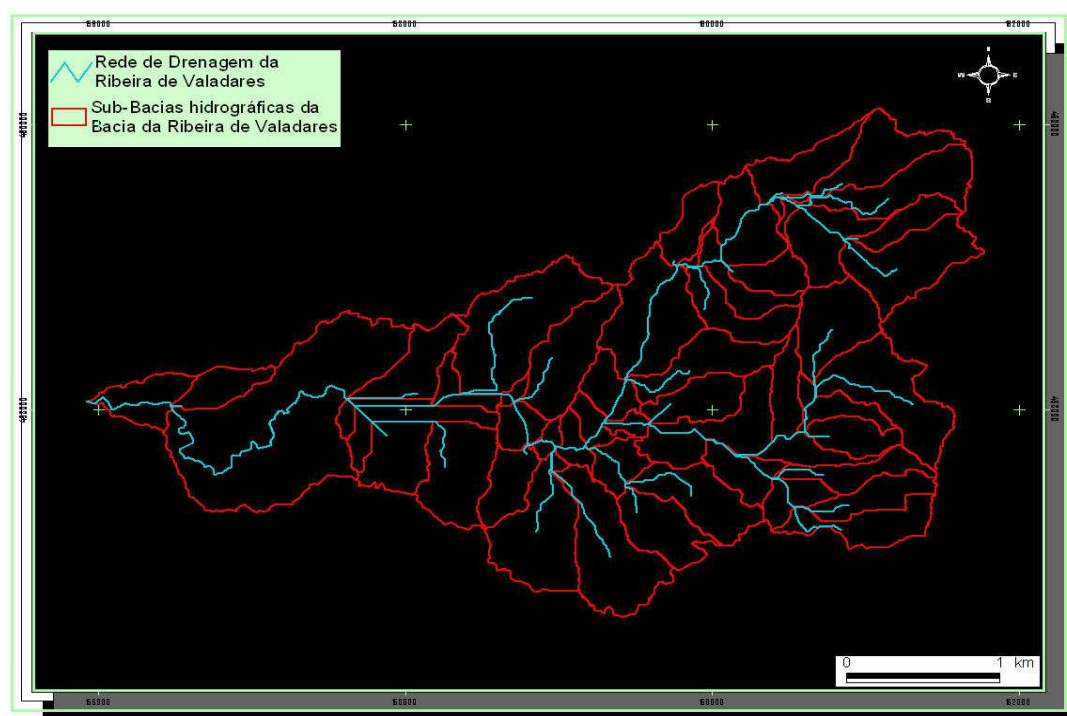
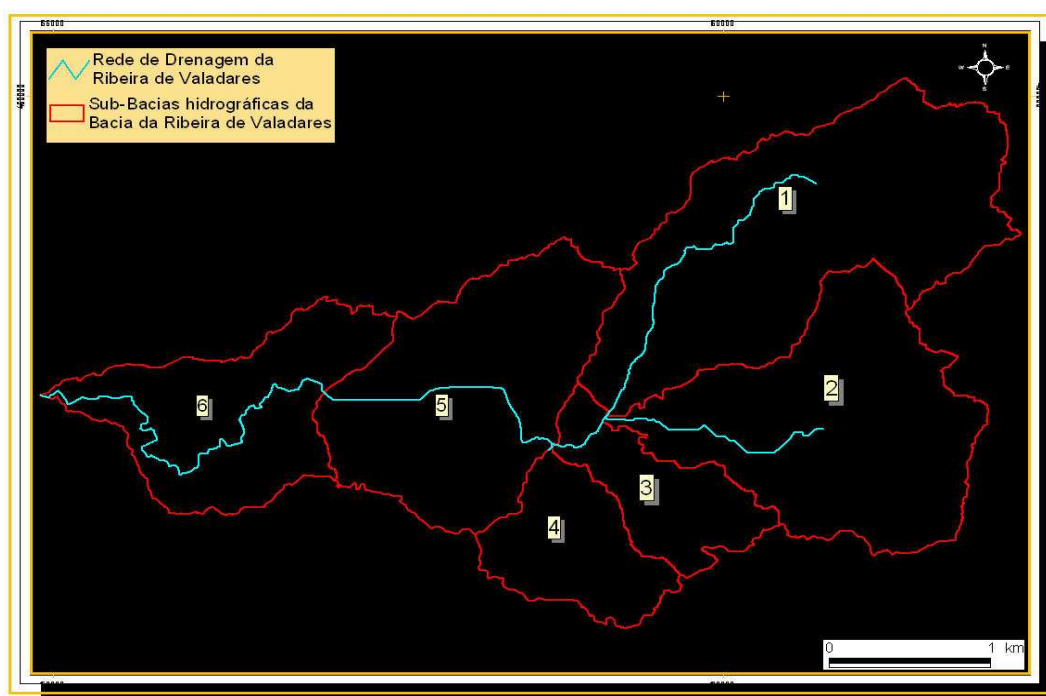


Figura 5.27 – Representação da rede de drenagem e respectivas subunidades hidrológicas, em formato vectorial, para a bacia de Valadares.

Como ressalta da Figura 5.27 o limiar de área mínima utilizado foi demasiado baixo, tendo resultado num excessivo número de subunidades hidrológicas e numa rede de drenagem demasiado intrincada para a sua modelação, bem como não representativa da situação real. Pelo exposto, optou-se por repetir o processo conducente à sua obtenção através da escolha de valores compreendidos no intervalo de 100 000 células até 800 000 células, pesquisando por acréscimos sucessivos de 50 000 células. Os resultados obtidos para o valor de 700 000 células ( $0,7 \text{ km}^2$ ) representam uma solução de compromisso entre um grau de detalhe aceitável para a rede de drenagem, um número de subunidades hidrológicas razoável e a necessária representatividade do modelo hidrológico a gerar. Representa-se na Figura 5.28 o resultado final obtido.



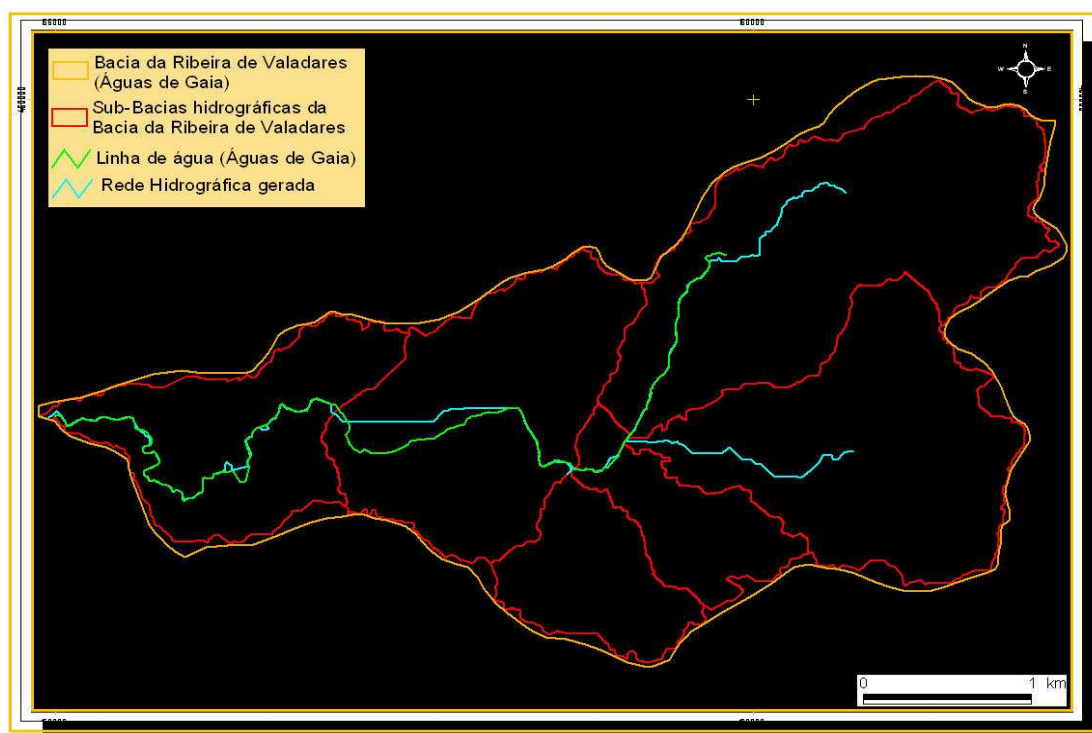
**Figura 5.28** – Representação da rede de drenagem e respectivas subunidades hidrológicas, em formato vectorial, para a bacia de Valadares, e para uma área mínima de drenagem de  $0,7 \text{ km}^2$ .

As áreas dos polígonos delimitados e os comprimentos dos respectivos segmentos de drenagem representados na Figura 5.28 são apresentadas na Tabela 5.6. O seu cálculo recorre a comuns operações de análise espacial, tal como mencionado no capítulo 2. De referir que esta informação é incorporada na base de dados associada a estes elementos vectoriais através da extensão HEC-GeoHMS.

Da análise da tabela 5.6 depende-se uma diferença no valor da área total encontrada relativamente ao valor extraído do polígono providenciado pela empresa Águas de Gaia. Na Figura 5.29 encontram-se sobrepostos os dois polígonos em questão.

**Tabela 5.6** – Valor da área das sub-bacias de Valadares geradas e comprimento dos troços da respectiva rede de drenagem.

Polígono/Troço (número)	Area (km <sup>2</sup> )	Comprimento de Linha Água (km)
1	2,82	2,5
2	2,24	1,55
3	0,68	0,45
4	0,76	0,057
5	2,00	1,92
6	1,42	2,95
Total	9,92	



**Figura 5.29** – Representação do polígono da bacia de Valadares, e respectiva rede de drenagem, gerado e obtido (Águas de Gaia).

A diferença de 0,72 km<sup>2</sup> fica-se a dever aos espaços definidos durante o processamento do terreno como não integrantes da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, atendendo a que este valor representa cerca de 7% da área do polígono calculado, e por a sua definição a este grau de detalhe ser algo subjectiva, optou-se por não elaborar sobre a questão, e para efeitos de trabalho aceitar as subunidades hidrológicas definidas. Uma aferição de qual a delimitação mais correcta só poderia ser feita por recurso a um levantamento topográfico relativamente exaustivo.

Relativamente à rede hidrográfica gerada e por contraste com o elemento vectorial disponibilizado pela empresa Águas de Gaia, observa-se uma concordância satisfatória. O local onde estas duas cartografias diferem remete, uma vez mais, para a zona demarcada na Figura 5.21 pelo número 1, permitindo concluir que o leito desta área é realmente algo difuso.

## 5.6 Elaboração do Modelo Hidrológico

Como abordado no capítulo 3, um modelo hidrológico permite a simulação da resposta a eventos de precipitação e a previsão de situações futuras em resposta a esses mesmos eventos ao possibilitar a combinação de vários *inputs* por parte do utilizador. A previsão de caudais de cheia depende em muito do uso de modelos matemáticos e da sua precisão, uma vez que o fenómeno provém de uma panóplia de circunstâncias, sujeito a interferência de praticamente todas as componentes do ambiente natural e transformado. Embora a sua predição com completa certeza seja inexequível, um modelo que descreva adequadamente as características do terreno, dos padrões de precipitação, hidráulicas e hidrológicas e atenda às condições locais, aumenta significativamente a probabilidade da sua percepção e do alerta atempado. A disponibilidade de meios de monitorização que permitam a obtenção de dados observados é neste contexto particularmente relevante, pois estes são fundamentais à calibração dos modelos gerados. Além de previsão, um modelo permite a simulação de possíveis cenários para a bacia hidrográfica a que se aplica. Este aspecto pode ser bastante útil na investigação de tendências ambientais e na identificação de potenciais acções gravosas na gestão da bacia hidrográfica em causa.

No presente capítulo pretendem-se descrever as etapas a percorrer na prossecução da criação de um modelo hidrológico, nos moldes do descrito no anterior parágrafo.

### 5.6.1 Software de Modelação Hidrológica Utilizado

No seguimento da utilização da extensão HEC-GeoHMS, optou-se por gerar o modelo hidrológico no *software* HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*), versão 3.0.1, do Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos da América (*United States Army Corps of Engineers*). Esta escolha advém de se tratar de *software* versátil na escolha dos modelos e informação a integrar, ser bastante evoluído ao nível do interface gráfico e ser, uma vez mais, de domínio público. Esta opção beneficia directamente da exploração feita da extensão HEC-GeoHMS, permitindo uma razoável ligação entre o SIG e o programa informático de modelação hidrológica. A dita extensão realiza a transformação de ficheiros digitais necessários como estrutura base ao modelo hidrológico, assim como a extracção de alguns parâmetros adicionais que a compõem.

O programa informático HEC-HMS modela, genericamente, a transformação de precipitação em escoamento superficial. Os modelos incluídos são exclusivamente determinísticos e embora permita a modelação hidrológica em contínuo pela recente introdução de um modelo de perdas contínuo (SMA – *soil moisture accounting*), trata-se de um *software* tradicionalmente vocacionado para a modelação de eventos. Este programa, contém quatro componentes elementares:

- Um sistema de armazenamento e gestão de informação, em particular de vastos conteúdos de variáveis temporais;

- Um módulo analítico para cálculo de escoamento sobre a superfície e escoamento em canal, incluindo diversos algoritmos para solução das diferentes componentes dos modelos de bacia hidrográfica;
- Um avançado sistema de representação e interacção gráfico (GUI – *Graphical user interface*), ilustrando as variadas componentes do sistema hidrológico de uma forma bastante interactiva e aceitando, já, informação georreferenciada (possuindo localização geográfica própria, implicitamente);
- Uma componente de tratamento e apresentação de resultados dos modelos hidrológicos, possibilitando, inclusivamente, calibrações iterativas adaptáveis.

O formato digital de armazenamento e acesso de dados do *software* do HEC é o *dss (data storage system)*. Este tipo de ficheiro abrange diferentes tipos de informação, como séries temporais de valores de precipitação ou séries temporais de valores de escoamento. Este sistema faculta ao utilizador o armazenar de grandes volumes de informação num só ficheiro enquanto o próprio modelo serve de navegador dessa base de dados, encontrando a informação específica necessária (HEC, 2000 b)

Uma das limitações do presente programa prende-se com a sua incapacidade de processar redes de drenagem não dendríticas, as redes devem apresentar-se como fractais (ramificação em árvore), sendo este facto acautelado pela extensão HEC-GeoHMS aquando da sua geração. Outra das limitações, diz respeito à obrigatoriedade de estabilidade dos parâmetros que integram os diferentes modelos que caracterizam a bacia hidrográfica ao longo de uma simulação, tornando assim necessária a geração de modelos, por exemplo, sazonais.

### 5.6.2 Estruturação do Modelo Hidrológico

O programa HEC-HMS requer do utilizador a introdução de várias componentes e características do terreno, em particular as respeitantes a ambas bacia hidrográfica e rede de drenagem da região em estudo. Este conjunto de características é incorporado num modelo de bacia. A identificação de subunidades hidrológicas e dos respectivos segmentos de linha de água, bem como a conectividade da rede de drenagem ou a extracção de parâmetros integrantes de modelos, são *inputs* necessários a esse mesmo modelo de bacia. O conjunto das características geométricas enumeradas foi alvo de extracção prévia pela extensão HEC-GeoHMS, como se verificou em 5.5. Como referido, a extensão utilizada possibilita a geração de um ficheiro digital com a estrutura base, i.e., geometria, conectividade e identificação dos elementos a modelar, da bacia em estudo.

As características em falta, na continuação do delineamento elaborado em 5.5, para a geração do ficheiro indicado são:

- A interpolação da rede de drenagem ao MDT original pelo comando *river slope*, do menu *basin characteristics*, recorrendo à extensão HEC-GeoHMS. A interpolação realiza-se por um operador que verifica o *raster* para zonas de intercepção espacial com a rede, quando estas

ocorrem é atribuído um valor altimétrico à linha vectorial em análise, por quociente destes valores com o comprimento do *pixel* obtém-se um valor da inclinação do segmento em análise, a cada célula. A colheita desta informação permite a criação dos perfis longitudinais dos segmentos isolados anteriormente. Estes são representados graficamente na Figura 5.30, sendo identificados pela mesma numeração utilizada para as subunidades hidrológicas, patente na Figura 5.28.

- O percurso hidráulico mais distante para as subunidades hidrológicas. A sua determinação, feita pela extensão HEC-GeoHMS, envolve a análise conjunta da grelha de escoamento acumulado e grelha de individualização dos segmentos que compõem a rede hidrográfica, sendo assim possível estabelecer qual o *pixel* da grelha de escoamento acumulado que maior distância percorre para atingir determinado segmento da rede hidrográfica.

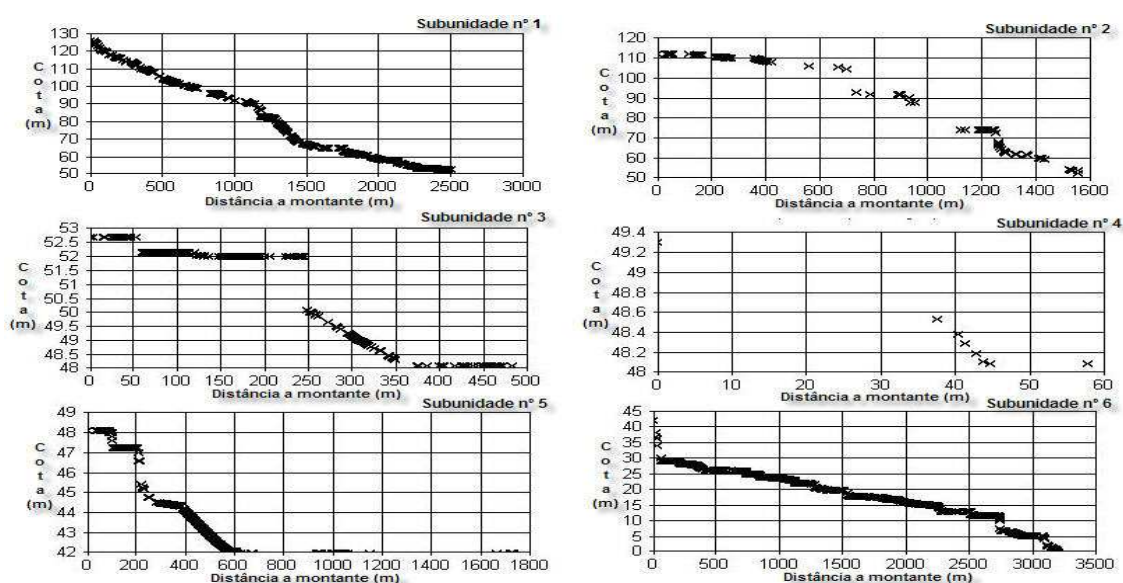


Figura 5.30 – Perfis longitudinais da rede hidrográfica da Bacia de Valadares, de acordo com as subunidades enumeradas na Figura 5.28.

Com o adicionar dos mencionados elementos, a caracterização geométrica da bacia hidrográfica encontra-se concluída no que respeita ao delinear da sua estrutura base. Embora a extensão HEC-GeoHMS permita a extracção de determinados parâmetros, não geométricos, referentes a alguns dos modelos matemáticos que compõem o modelo de bacia, a sua utilização generalizada num contexto de disponibilidade de informação digital georreferenciada é ainda inviável. Muito do código de programação que permita a ampliação destas capacidades, em particular de parametrização de modelos disponíveis no programa HEC-HMS, ainda se encontra em desenvolvimento por parcerias entre o ESRI e o HEC.

O último contributo da citada extensão consistiu em compilar, em formato digital, toda a informação gerada num único ficheiro, estando envolvida a transformação de formatos digitais próprios da linguagem de programação *avenue*, característica do *software* ArcView 3.2, para o formato de dados *Java*, linguagem desenvolvida da sua antecedente *C++* e de uso generalizado actualmente. O

ficheiro digital gerado possui a extensão *basin*. Este conjunto de operações finais não é objecto de aprofundamento do corrente trabalho. Na Figura 5.31 (pág. 126) representa-se a bacia hidrográfica de Valadares após a extracção da sua informação geométrica e respectivo preparo para migração de *software*.

O modelo de bacia deve conter informação para a simulação do escoamento directo, das perdas de precipitação, do escoamento base e do escoamento em canal. O programa HEC-HMS dispõe de diversos modelos para cada uma das componentes descritas e apresenta-se na Tabela 5.7 a sua listagem. O modelo de bacia prevê também a possibilidade de introdução de valores medidos ou registados de caudais, ou mesmo de hidrogramas observados, em associação com as suas respectivas localizações de determinação.

Como referido, o modelo de bacia assim gerado trata-se de um modelo agregado quanto à sua caracterização espacial. Embora fosse possível ter optado por um modelo distribuído a dimensão da bacia hidrográfica em estudo não o justificaria. A abordagem à construção de um modelo com essa particularidade espacial é substancialmente diferente da explanada, em particular do momento de geração da grelha de escoamento acumulado em diante.

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

As especificações de controlo facultam ao modelador o estabelecimento de variáveis temporais, como seja o intervalo de cálculo desejado.

O programa HEC-HMS combina as três componentes supracitadas, i.e., modelo de bacia, modelo de precipitação e as especificações de controlo, numa simulação individual para o cálculo do valor do escoamento nas secções terminais das subunidades hidrológicas e ao longo dos segmentos de linha de água e suas junções. Diversas simulações podem ser obtidas para diferentes variantes de um mesmo modelo hidrológico.

Os resultados destas simulações podem ser vistos directamente em hidrogramas, resultantes de tabelas do escoamento em função do tempo. Como mencionado, estes valores podem ser alvo de calibração.

**Tabela 5.7** – Modelos hidrológicos constantes do programa HEC-HMS, respectiva classificação.

Modelo	Componente do Escoamento Superficial	Modelo Matemático de Simulação	Classificação do Modelo de simulação
Bacia	Escoamento de Base	Constante Mensal	de evento; agregado; empírico
		Recessão Exponencial	de evento; agregado; empírico
		Reservatório Linear	de evento; agregado; empírico
	Perdas	Taxa Inicial e Constante do SCS	de evento; agregado; empírico
		do SCS aplicável a Modelo de Bacia Distribuídos	de evento; agregado; empírico
		de Green & Ampt	de evento; distribuído; empírico
		Taxa constante e Défice SMA	contínuo; agregado; empírico
		SMA aplicável a Modelo de Bacia Distribuídos	contínuo; agregado; empírico
	Escoamento Directo	Hidrograma Unitário apresentado pelo utilizador	de evento; agregado; empírico
		Hidrograma Unitário de Clark	de evento; agregado; empírico
		Hidrograma Unitário de Snyder	de evento; agregado; empírico
		Hidrograma Unitário do SCS	de evento; agregado; empírico
		Hidrograma Unitário de Clark Modificado	de evento; distribuído; empírico
		Onda Cinemática	de evento; agregado; conceptual
	Propagação em Canal	Onda Cinemática	de evento; agregado; conceptual
		Tempo de Resposta (Lag)	de evento; agregado; empírico
		Puls Modificado	de evento; agregado; empírico
Muskingum		de evento; agregado; empírico	
Muskingum-Cunge Secção Standard		de evento; agregado; conceptual	
Muskingum-Cunge Secção de 8 Pontos		de evento; agregado; conceptual	
Precipitação	Dados Históricos	Polígonos de Thiessen	agregado
		Grelhas de Precipitação	distribuído
		Hietograma Observado	agregado
Dados Hipotéticos	Evento com Probabilidade de Ocorrência		
	Evento standard de Projecto		
	Evento de Projecto do SCS		
Especificações de controlo	Data de Inicio	definida pelo utilizador	
	Data de Termino	definida pelo utilizador	
	Intervalo de tempo	definida pelo utilizador	

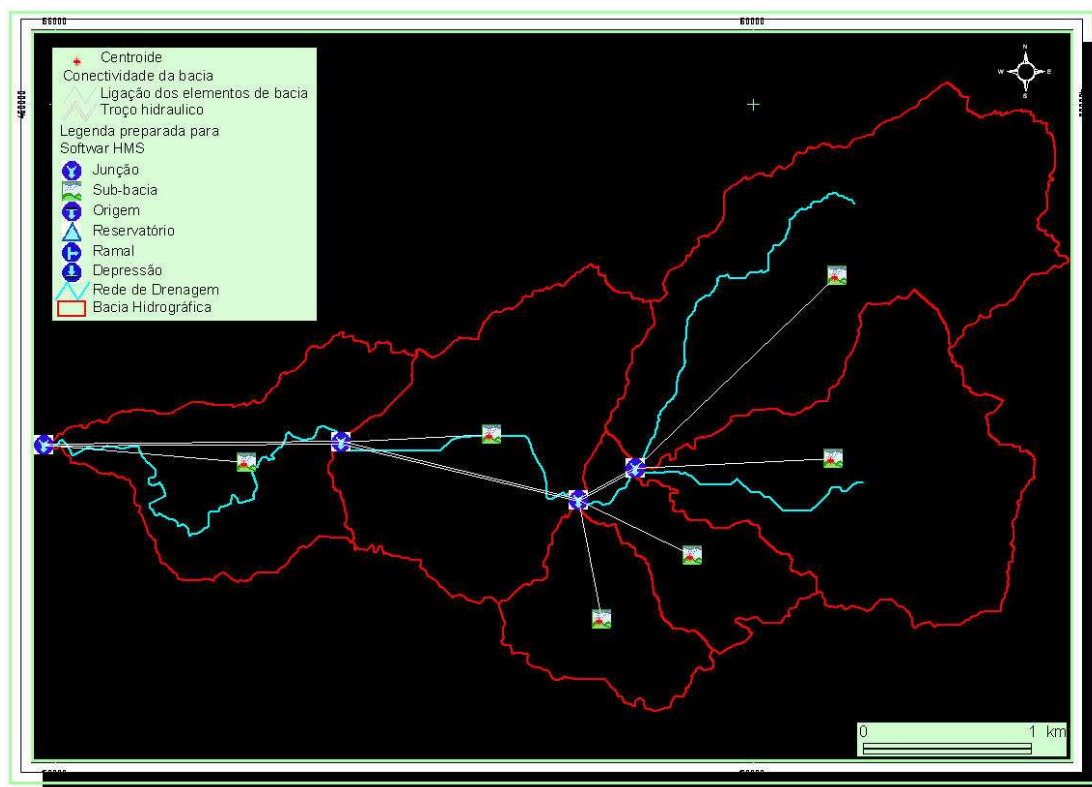


Figura 5.31 – Representação da conectividade entre os diferentes elementos hidrológicos que compõem a bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares.

Ao longo dos vários passos do programa vai sendo possível ao utilizador observar os resultados cumulativos da informação carregada nos modelos através do GUI. Este pode assim atempadamente corrigir qualquer um dos *inputs* introduzidos ou das interpretações geradas. A representação esquemática apresentada na Figura 5.31 corresponde ao visualizado na janela de representação do *software* HEC-HMS, encontrando-se deste modo a totalidade dos elementos representativos da bacia e a informação a eles associada, tanto a introduzida como a gerada, acessível de um modo intuitivo.

### 5.6.3 Modelo Hidrológico

Como referido, o programa HEC-HMS requer um modelo de bacia, de precipitação e um conjunto de especificações de controlo para que seja possível executar uma simulação do comportamento hidrológico da bacia. Tendo já a estrutura geométrica da bacia da Ribeira de Valadares resta a escolha dos modelos de simulação para cada uma das componentes mencionadas e a sua correspondente parametrização.

Utilizando o SIG e as suas extensões foi possível determinar não só a localização da rede hidrográfica no terreno, como também a sua divisão em segmentos com as respectivas bacias de drenagem associadas. Uma das vantagens do estabelecimento desta ligação está relacionada com a descrição dos parâmetros hidrológicos de cada uma das subunidades hidrológicas geradas. A relação

destes elementos no SIG permite o cálculo de vários dos parâmetros requeridos como *inputs* aos modelos de simulação das diferentes componentes do programa HEC-HMS.

### 5.6.3.1 Modelo de Bacia

Tendo por base, no *software* HEC-HMS, o modelo de bacia gerado, incorporando este a informação geométrica previamente calculada no SIG e correspondendo ao ficheiro digital de extensão *basin*, procedeu-se à escolha dos modelos matemáticos representativos de cada uma das componentes hidrológicas da bacia da Ribeira de Valadares.

Os modelos matemáticos de simulação empregues neste trabalho foram seleccionados atendendo à sua adequação para a modelação de eventos de precipitação extrema, remetendo à exposição teórica elaborada no capítulo 3, e levando em linha de conta a contingência da ausência de valores observados de escoamento, estes terão, forçosamente, de ser modelos caracterizáveis de uma forma física. Ou seja, a escolha feita privilegiou modelos adequados à simulação da ocorrência de cheias e, em simultâneo, cujos parâmetros fossem obteníveis por recurso ao SIG e a informação digital disponível. As diferentes fracções do escoamento superficial foram modeladas por:

- Escoamento de Base – modelo de recessão exponencial;
- Perdas de Precipitação – modelo do SCS;
- Escoamento Directo – modelo da onda cinemática;
- Propagação do Escoamento – modelo da onda cinemática.

#### 5.6.3.1.1 Modelo de Escoamento Directo

O modelo da onda cinemática, tendo por base o conceito físico e expressões matemáticas apresentadas em 3.4.7, encontra no *software* HEC-HMS uma formulação espacial onde cada subunidade hidrológica é representada por dois planos inclinados, compondo uma disposição em “V”. Os planos, em si mesmos, são o resultado da divisão da subunidade pela porção da linha de água principal que a atravessa. Os planos, representativos das duas encostas que compõem o vale, apresentam uma geometria rectangular como simplificação à sua descrição e processo de cálculo do algoritmo de resolução das mencionadas expressões matemáticas.

Conforme esta conceitualização, a divisão dos planos segundo o canal principal destes prossegue sobre os primeiros planos gerados, procedendo-se à determinação, de forma idêntica à inicial, das áreas resultantes da divisão pelo canal (colector) maior desse mesmo plano, assim sucessivamente até ao valor da área dos sub-planos não ser de todo divisível. Neste trabalho os planos gerados quedaram-se pela primeira divisão, uma vez que as áreas destes apresentam-se de valor bastante reduzido. Na Figura 5.32 representa-se essa divisão das subunidades hidrológicas, o método de determinação consistiu numa operação no SIG, onde estas foram processadas geograficamente de modo a que os polígonos de cada subunidade fossem cortados pelo segmento da

linha de água dessa mesma subunidade. Salienta-se que, para que exista uma separação efectiva em duas áreas distintas, representativas dos planos, é necessário que o segmento em causa atravessasse até à extremidade o polígono da subunidade em processamento. Não sendo este o caso das sub-bacias número 1, 2, 3 e 4 (numeração de acordo com a Figura 5.28), foi neste caso utilizado o percurso hidráulico mais longo, que tem obrigatoriamente início numa célula limítrofe do MDT, sectando, assim, os mencionados polígonos na sua totalidade, e coincidindo com a linha de drenagem na sua porção definida vectorialmente.

Os dados geométricos colhidos da realização desta operação constituíram informação de entrada no programa HEC-HMS, na parametrização do modelo da onda cinemática. Especificamente, os valores referentes à área de cada subunidade, o respectivo comprimento do segmento da linha de água e as fracções destes valores. Os dados obtidos encontram-se sumariados na Tabela 5.8.

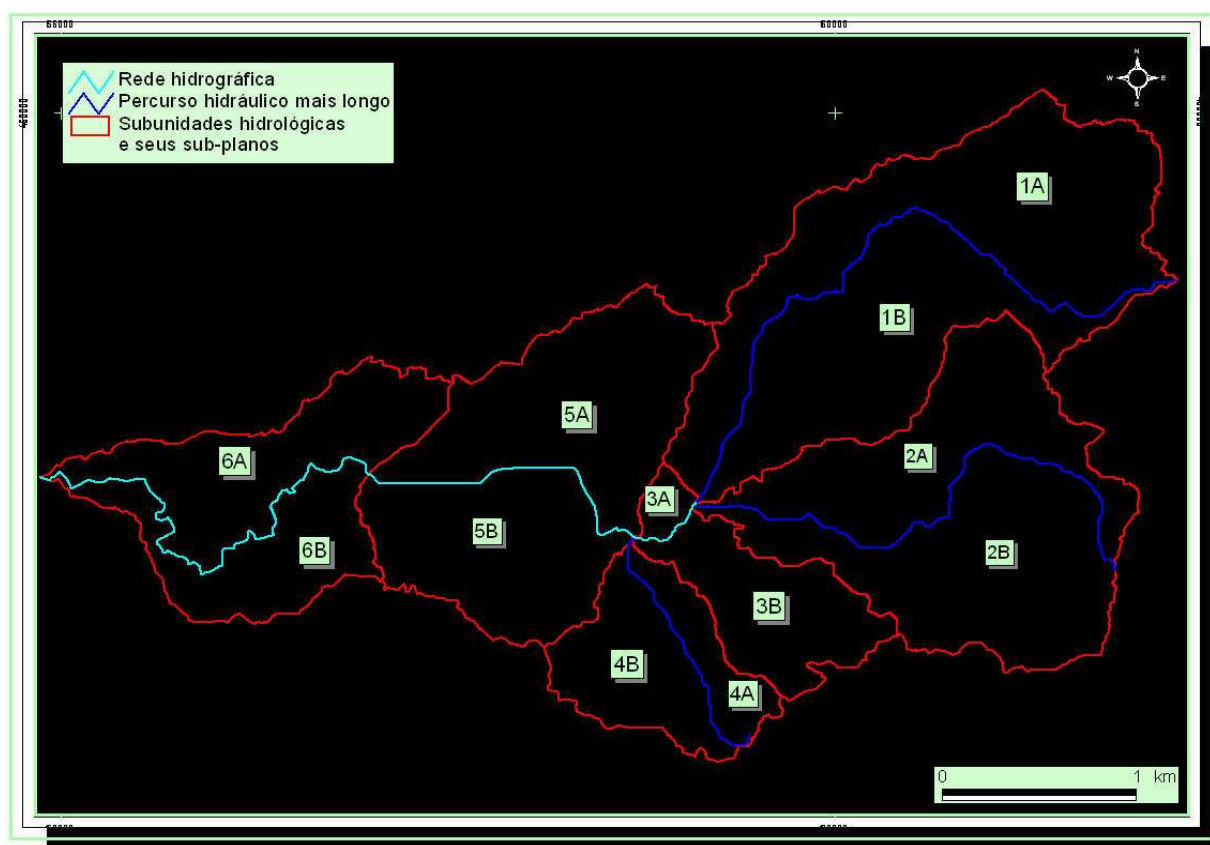


Figura 5.32 – Representação da divisão das subunidades hidrológicas.

Uma vez disponíveis os valores supracitados, torna-se possível o cálculo de um dos parâmetros com relevância na caracterização dos planos da onda cinemática, o comprimento médio que uma gota de água caída, em tal plano, percorre até atingir um canal, i.e., o segmento da linha de água dessa subunidade hidrológica. Este valor resulta do quociente entre o valor da área do plano da subunidade e o comprimento do segmento de linha de água da sub-bacia em análise, representando em termos geométricos o valor da largura do rectângulo conceptualizado no modelo. O valor encontrado expressa-se em metros e na Tabela 5.8 apresenta-se o resultado do seu cálculo para cada um dos planos da bacia da Ribeira de Valadares.

Os restantes parâmetros que visam a caracterização dos planos da onda cinemática reportam ao declive de cada uma destas fracções das subunidades hidrológicas, remetendo para a Figura 5.18, e à rugosidade cinemática, de acordo com o conceito apresentado na Equação (3.22), capítulo 3, e constantes do Anexo A.

O procedimento de determinação do declive dos mencionados planos assemelha-se ao utilizado para corte dos polígonos das subunidades hidrológicas geradas. As diferenças residem no facto dos elementos gráficos vectoriais utilizados (segmentos ou percursos mais longos) actuarem sobre o *raster* da carta de declives apresentada na Figura 5.18, criando fracções da mesma por sobreposição. Após esta operação é calculado um valor médio do declive em cada uma dessas fracções por simples média aritmética, uma vez que cada célula tem 1 m<sup>2</sup> de área e um respectivo valor de declive. Esta operação realiza-se no SIG, especificamente na base de dados das fracções *raster* conseguidas. O valor do declive médio foi obtido em graus, tendo sido convertido para uma inclinação expressa em m/m, unidade de trabalho do *software* HEC-HMS, pela expressão:

$$x = Tg\left(\frac{y \cdot \pi}{180}\right) \quad \text{Equação (5.1)}$$

em que:

$x$  – declive (m/m)

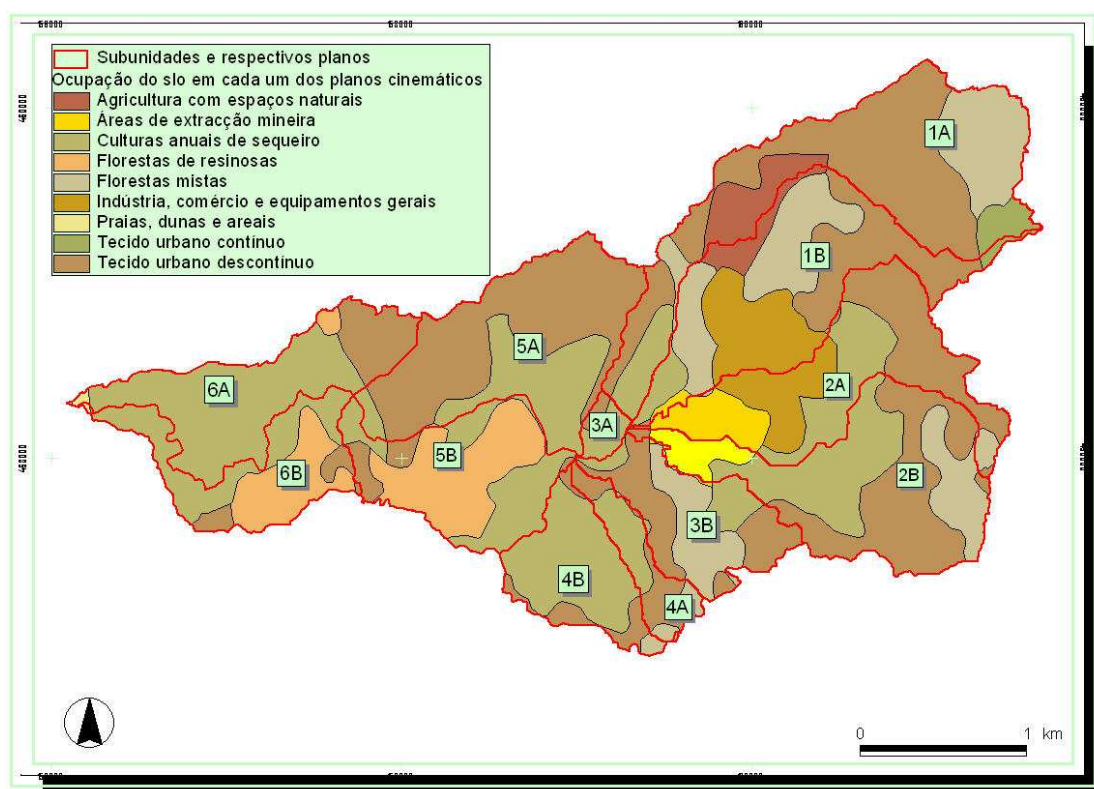
$y$  – declive (°)

O valor assim determinado consta da Tabela 5.8.

**Tabela 5.8** – Valores dos parâmetros integrantes do modelo da onda cinemática (excepto a rugosidade cinemática), na sua formulação para escoamento à superfície, para a bacia de Valadares.

Área Planos (A) (km <sup>2</sup> )	Área Planos (%)	Divisão	Sub-bacia	Area Sub-bacia (km <sup>2</sup> )	Comprimento da Linha Água (L) (km)	Comprimento do modelo Cinemático (A/L) (m)	Declive do plano (m/m)
1,583	56	1N	1	2,82	4,12	384,34	0,1047
1,234	44	1S				299,59	0,1356
1,004	45	2N	2	2,24	3,24	309,82	0,1057
1,233	55	2S				380,46	0,1314
0,079	12	3N	3	0,68	0,45	176,03	0,0910
0,605	88	3S				1344,03	0,1014
0,245	32	4N	4	0,76	1,52	160,98	0,1160
0,514	68	4S				338,42	0,0913
1,207	60	5N	5	2,00	1,92	628,84	0,0772
0,796	40	5S				414,52	0,1128
0,825	58	6N	6	1,42	2,95	279,78	0,0686
0,597	42	6S				202,36	0,0925
9,92		Total		9,92	14,20		

A determinação do valor da rugosidade cinemática de cada um dos planos analisados foi conseguida por recurso à carta de uso do solo representada no cartograma da Figura 5.5, alínea 5.3.4. Associando à base de dados, referente a tal informação, um valor do Anexo A, de acordo com a respectiva classe de uso do solo, e recorrendo a uma operação de intercepção espacial entre a carta do uso do solo da bacia de Valadares e os polígonos delimitantes de cada plano, foi possível calcular, por meio de uma média ponderada à área de cada um dos polígonos contidos no respectivo plano, um valor médio do coeficiente de rugosidade para cada plano. A Figura 5.33 ilustra o resultado espacial da dita operação de sobreposição e a Tabela 5.9 resume os valores encontrados por média ponderada ao valor da área de cada polígono, para a rugosidade cinemática.



**Figura 5.33** – Cartograma de ocupação do solo de cada um dos planos do modelo da onda cinemática para a bacia de Valadares.

O conjunto da informação obtido foi carregado no *software* HEC-HMS através do seu interface gráfico. Com os valores encontrados foram parametrizados os planos de cada subunidade hidrológica, tendo assim a Equação (3.25) ficado resumida a uma variável dependente,  $y_0$ , e pelo tanto passível de resolução em ordem a uma ordenada e uma abcissa,  $(x, y)$ , para uma dada precipitação efectiva. Este valor introduzido de volta na Equação (3.22) permite achar o valor da descarga por unidade de tempo dos elementos de superfície integrantes do modelo.

Após a descrição da parametrização da componente de escoamento em canal aborda-se a questão do algoritmo de resolução da conjugação das equações resultantes dos dois tipos de elementos.

**Tabela 5.9** – Valores definidos para a rugosidade cinemática para cada classe de uso do solo, em situação AMCII e AMCIII, e respectiva média ponderada para os planos das subunidades hidrológicas da bacia de Valadares.

Área (m <sup>2</sup> )	Sub-divisão	Classe de uso do solo	Rugosidade da classe (N) (AMC II)	Rugosidade da classe (N) (AMC III)	Rugosidade média (N) (AMC II)	Rugosidade média (N) (AMC III)
878897.24	1 A	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15	0.19	0.19
309373.65	1 A	Florestas mistas	0.4	0.40		
171638.08	1 A	Agricultura com espaços naturais	0.12	0.12		
72009.99	1 A	Tecido urbano contínuo	0.08	0.08		
36904.63	1 A	Florestas mistas	0.4	0.40		
114655.91	1 A	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
350113.69	1 B	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15	0.22	0.21
80719.57	1 B	Agricultura com espaços naturais	0.12	0.12		
259611.85	1 B	Florestas mistas	0.4	0.40		
16485.70	1 B	Tecido urbano contínuo	0.08	0.08		
138195.55	1 B	Florestas mistas	0.4	0.40		
310320.36	1 B	Indust. comércio e equipamentos	0.1	0.10		
781.20	1 B	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
60933.81	1 B	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
15199.49	1 B	Áreas de extracção mineira	0.35	0.35		
1932.29	1 B	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15		
351896.09	2 A	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15	0.16	0.16
1464.03	2 A	Florestas mistas	0.4	0.40		
209381.85	2 A	Indust. comércio e equipamentos	0.1	0.10		
256605.34	2 A	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
225.04	2 A	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
155050.74	2 A	Áreas de extracção mineira	0.35	0.35		
26818.44	2 A	Florestas mistas	0.4	0.40		
2369.72	2 A	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15		
540387.67	2 B	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15	0.19	0.18
399350.98	2 B	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
291.09	2 B	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
95520.14	2 B	Áreas de extracção mineira	0.35	0.35		
188586.47	2 B	Florestas mistas	0.4	0.40		
6721.85	2 B	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15		
1827.56	2 B	Florestas mistas	0.4	0.40		
20432.69	3 A	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15	0.11	0.10
58782.31	3 A	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
113275.79	3 B	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15	0.23	0.23
79007.29	3 B	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
27209.71	3 B	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
5409.14	3 B	Áreas de extracção mineira	0.35	0.35		
164499.99	3 B	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15		
215411.09	3 B	Florestas mistas	0.4	0.40		
101575.45	4 A	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08	0.16	0.15
109796.56	4 A	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15		
33311.43	4 A	Florestas mistas	0.4	0.40		
411480.83	4 B	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08	0.12	0.10
87085.18	4 B	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15		
15836.55	4 B	Florestas mistas	0.4	0.40		

Área (m <sup>2</sup> )	Sub-divisão	Classe de uso do solo	Rugosidade da classe (N) (AMC II)	Rugosidade da classe (N) (AMC III)	Rugosidade média (N) (AMC II)	Rugosidade média (N) (AMC III)
822739.70	5 A	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15	0.13	0.13
27.18	5 A	Agricultura com espaços naturais	0.12	0.12		
29595.23	5 A	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
353157.63	5 A	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
1844.41	5 A	Florestas de resinosas	0.40	0.40		
27334.73	5 B	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15	0.27	0.26
44869.05	5 B	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
249851.63	5 B	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
430323.19	5 B	Florestas de resinosas	0.40	0.40		
2.85	5 B	Florestas de resinosas	0.40	0.40		
4003.88	5 B	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15		
39488.54	5 B	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15		
167629.62	6 A	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15	0.12	0.10
5935.88	6 A	Praias, dunas e areais	0.1	0.10		
18390.32	6 A	Florestas de resinosas	0.40	0.40		
633037.44	6 A	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
2101.99	6 B	Praias, dunas e areais	0.1	0.10	0.23	0.22
291946.70	6 B	Culturas anuais de sequeiro	0.1	0.08		
246105.17	6 B	Florestas de resinosas	0.40	0.40		
56799.27	6 B	Tecido urbano descontínuo	0.15	0.15		

A parametrização da componente do escoamento em canal pelo modelo da onda cinemática reporta para as Equações (3.26) e (3.27). O sistema de canais, como referido, descreve-se pelo seu declive, comprimento, forma e áreas das secções transversais, bem como pelo valor da rugosidade de Manning ( $n$ ).

Por observações de campo foi possível concluir que os canais nas suas secções acessíveis e identificáveis, oscilam entre a forma aproximadamente rectangular e leito naturalizado, nas secções terminais das subunidades de montante (número 2 e 4), e leito regularizado em betão e forma rectangular nas secções terminais das sub-bacias número 1, 3, 5 e 6. Este levantamento pressupõe a marcação das coordenadas dos pontos descritos no SIG e seu carregamento num sistema portátil de GPS, com o objectivo da sua localização no decorrer do trabalho em campo. Durante este levantamento prévio procedeu-se igualmente à medição directa dos valores de largura do canal. De referir, que a rede de drenagem das sub-bacias número 1, 2 e 4, dada a sua reduzida dimensão, apresentam nas suas secções mais a montante um leito de difícil detecção.

Alternativamente ao processo de medição directa foi possível interpolar o MDT criado em secções transversais, perpendiculares à linha de água, num conjunto variado de locais da rede hidrográfica gerada. Os valores obtidos correspondem de uma forma geral, tanto em forma e largura, aos determinados no local. Assim, os dados representados na Tabela 5.10 reflectem valores médios para a caracterização geométrica dos segmentos da rede hidrográfica em estudo.

A rugosidade de Manning dos referidos canais, na impossibilidade da sua caracterização exaustiva ao longo dos diversos segmentos em análise e tendo sido observado que a constituição do canal varia entre betão e um leito medianamente regular, foram assumidos valores de 0,03 para as subunidades número 2 e 4, e de 0,013 para as restantes, uma vez se encontrarem regularizadas. Estes valores encontram-se de acordo com o tabelado no Anexo B e representam um bom compromisso inicial na caracterização do modelo. Não obstante, este parâmetro ajusta-se usualmente por calibração, apesar das contingências a que está sujeita o ajuste do seu valor.

O comprimento e declive dos segmentos em estudo foram já determinados aquando da utilização da extensão HEC-GeoHMS, em particular na elaboração dos respectivos perfis longitudinais, tendo sido determinado o valor médio da inclinação. Os segmentos referentes às subunidades número 1, 2 e 4, em virtude de ter sido utilizado para fins de modelação da onda cinemática o percurso hidráulico mais longo, foram objecto de uma nova caracterização no SIG para a obtenção dos seus comprimentos e declives. Os valores médios assim determinados figuram na Tabela 5.10.

**Tabela 5.10** – Valores dos parâmetros integrantes do modelo da onda cinemática, na sua formulação para escoamento em canal, para a bacia de Valadares.

Sub-bacia (nº)	Comprimento do segmento (m)	Declive médio (m/m)	Largura média do canal (m)	Rugosidade de Manning (n)	Forma da secção
1	4123.21	0.0368	3,5	0,013	rectangular
2	3241.74	0.0512	2	0,03	rectangular
3	451.380	0.0127	3,5	0,013	rectangular
4	1524.750	0.0383	2	0,03	rectangular
5	1921.070	0.0020	4	0,013	rectangular
6	2946.75	0.0143	5	0,013	rectangular

Reportando para as Equações (3.26) e (3.27), verifica-se que obtendo o valor do escoamento lateral proveniente dos planos antes descritos ( $m^3/s/m$ ), e conhecida a área das secções em estudo (calculada pela expressão  $A = L \cdot h$ , expressa em  $m^2$ ), resta a determinação do valor de  $\alpha_c$  e de  $m_c$ . O valor de  $\alpha_c$  para uma secção de forma rectangular pode ser obtido pela equação:

$$\alpha_c = \frac{\sqrt{S_c}}{n} \cdot L^{-2/3} \quad \text{Equação (5.2)}$$

onde:

$\alpha_c$  – parâmetro característico do modelo da onda cinemática para uma dada secção transversal de um troço de canal

$S_c$  – representa o declive médio do segmento (m/m)

$L$  – representa a Largura do canal (m)

$n$  – representa a rugosidade de Manning ( $m^{-1/3}s$ )

O parâmetro  $m_c$ , tal como para os planos, toma o valor de 5/3. Esta determinação é igualmente feita de forma intrínseca pelo *software* HEC-HMS e recorre à equação de Manning no estabelecimento dos seus parâmetros.

Definidos os valores dos parâmetros  $\alpha_c$  e  $m_c$ , e admitindo estes constantes ao longo da simulação, se a Equação (3.27) for substituída na Equação (3.26), obtém-se a Equação (5.3), onde  $A_c$  é a única variável a determinar. Esta substituição é idêntica à realizada na obtenção da equação que governa o escoamento sobre os planos.

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \alpha_c m_c A_c^{(m_c-1)} \cdot \frac{\partial A_c}{\partial x} = q_0 \quad \text{Equação (5.3)}$$

A solução numérica da Equação (5.3) produz valores de  $A_c$  em função de  $x$ ,  $t$  e de  $q_0$ . Estes podem ser novamente introduzidos na equação (3.27) para obtenção de um valor de  $Q_c$ . Este simples procedimento permite o cálculo de  $Q_c$  em função do comprimento do segmento e do tempo, tornando-se assim possível descrever o hidrograma de descarga para os diversos canais definidos. Se estas descargas,  $Q_c$ , representarem descargas de canais colectores locais, então o programa HEC-HMS distribui-las-á uniformemente como escoamento lateral do canal principal. Esta apresenta-se como uma forma simples de cálculo, inicialmente do escoamento sobre a superfície, seguida do cálculo no sistema de colectores (caso estes existam) e finalmente das descargas do canal principal. No caso da bacia de Valadares não se recorreu à modelação em colectores por motivos já referidos.

Como descrito anteriormente, o escoamento sobre os planos recorre a um solucionamento idêntico, fazendo para tal uso do respectivo par de equações, Equações (3.23) e (3.24).

Finalmente, a solução numérica das equações diferenciais do modelo da onda cinemática realizada pelo programa HEC-HMS é conseguida por recurso a métodos de diferenças numéricas finitas. Como na generalidade dos métodos de diferenças numéricas, o tempo é discretizado em intervalos constantes e a distância em intervalos métricos regulares. A precipitação durante cada intervalo de tempo definido é assumida como constante, podendo contudo variar entre intervalos, de modo a simular a sua variabilidade durante a ocorrência de precipitação.

O método de diferenças finitas empregue pelo *software* HEC-HMS representa uma aproximação por pontos ao solucionar das equações diferenciais apresentadas. Este método utiliza simples equações de diferenças para um conjunto de pontos estacionários de uma grelha, num plano espaço-temporal (Figura 5.34), em lugar das referidas equações diferenciais. As intercepções das linhas na Figura 5.34 definem os pontos no espaço e no tempo para os quais é calculada a altura de água e a descarga. O padrão regular formado por estas intersecções designa-se de rede computacional, constituindo os pontos de intersecção os nós dessa rede. A solução das equações de governo da onda cinemática é, por este método, computada em cada um destes nós. Essa computação progride no sentido de jusante, para cada intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), até que todos os

escoamentos e alturas de água estejam calculados para o comprimento do elemento em análise. Este processamento avança, então, para o seguinte intervalo de tempo e são determinados, uma vez mais, todos os escoamentos e alturas de água.

Os dois pares de equações apresentados para os canais e planos, respectivamente, são solucionados de forma idêntica, como tal as formulações que de seguida se apresentam referem-se apenas a um destes pares, sendo, no entanto, a formulação do restante em tudo idêntica. O programa HEC-HMS procede na seguinte sequência: determinação do escoamento sobre os planos, que por sua vez é distribuído uniformemente ao longo do canal, como entrada lateral; quando em canal dá-se uma translação da onda de cheia ao longo da sub-bacia, até à sua secção mais a jusante.

Remetendo para a Figura 5.34, e para a Equação (5.3), a área  $A_c$  é conhecida em pontos da grelha espaço-temporal para intervalos de tempo antecedentes ao momento de cálculo e para pontos do espaço prévios à localização aquando do passo de cálculo. Nessas condições, o índice  $(i, j)$  corresponde às coordenadas espaço-temporais no passo de cálculo, e por indicação de  $i+1$ , ou  $i-1$ , referem-se os pontos espaciais seguintes e anteriores, aplicando-se idêntica notação para os instantes temporais. Desta forma, e atendendo às considerações feitas, torna-se possível a reescrita da equação diferencial em termos de uma aproximação por diferenças finitas de valores conhecidos (valores anteriores ao passo de cálculo) e não conhecidos (valores no passo de cálculo). Assim, parte da Equação (5.3) assume, no ponto A da Figura 5.34, a forma:

$$\alpha_c m_c A_c^{(m_c-1)} \cdot \frac{\partial A_c}{\partial x} \approx \alpha_c m_c A_c^{(m_c-1)} \cdot \frac{\Delta A_c}{\Delta x} = \alpha_c m_c \left( \frac{A_{c(i,j-1)} + A_{c(i-1,j-1)}}{2} \right)^{(m_c-1)} \cdot \left( \frac{A_{c(i,j-1)} - A_{c(i-1,j-1)}}{\Delta x} \right)$$

Equação (5.4)

onde o diferencial da área  $A_c$  na direcção  $x$  é tido como a diferença entre os valores conhecidos dos pontos C e D da Figura 5.34. O termo  $A_c$ , que se encontra elevado a  $(m_c - 1)$ , é considerado como sendo a área média entre os pontos C e D da Figura 5.34.

O termo derivado em ordem ao tempo,  $\frac{\partial A_c}{\partial t}$ , da Equação (5.3) avalia-se entre os pontos A e D (Figura 5.34), resultando:

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} \approx \frac{\Delta A_c}{\Delta t} = \left( \frac{A_{c(i,j)} - A_{c(i,j-1)}}{\Delta t} \right)$$

Equação (5.5)

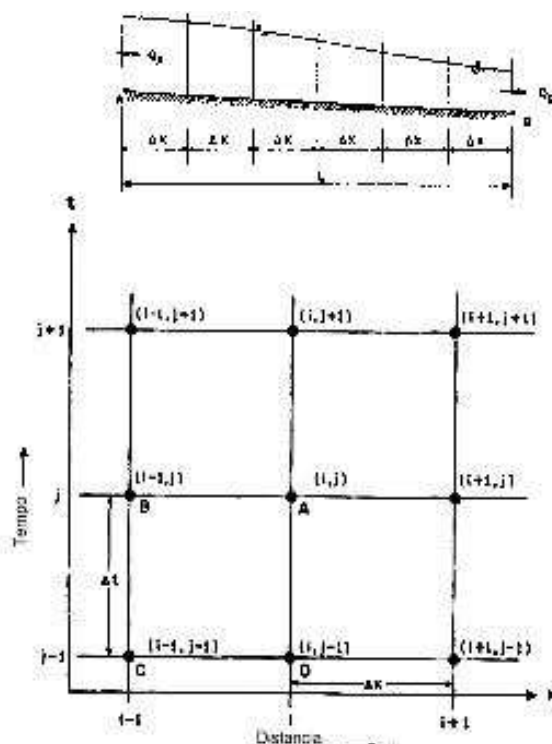


Figura 5.34 – Representação do método de diferenças finitas no solucionar do modelo da onda cinemática (adaptado de HEC, 1993).

O escoamento lateral,  $q_0$ , é tratado como a média do escoamento lateral para o intervalo de tempo. Representado sob a forma de equação:

$$q_0 \approx \frac{q_{(i,j)} + q_{(i,j-1)}}{2} = \bar{q} \quad \text{Equação (5.6)}$$

Da combinação das equações apresentadas resulta a forma completa das diferenças finitas da equação diferencial original (Equação (5.3)). Esta equação final é enunciada na sua forma de resolução em ordem ao ponto A da Figura 5.34, apresentando-se como:

$$A_{c(i,j)} = \bar{q} \cdot \Delta t + A_{c(i,j-1)} - \alpha_c m_c \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( \frac{A_{c(i,j-1)} + A_{c(i-1,j-1)}}{2} \right)^{(m_c-1)} \cdot (A_{c(i,j-1)} - A_{c(i-1,j-1)})$$

Equação (5.7)

Uma vez conhecido  $A_{c(i,j)}$ , o correspondente valor de  $Q_{c(i,j)}$  pode ser determinado na Equação (3.27). Este método faculta, de uma forma expedita, a computação dos valores de descarga ao longo do tempo e do espaço.

A forma das equações encontrada aplica-se a situações em que a celeridade média da onda em estudo,  $c$ , é menor que a razão entre o passo de cálculo espacial e o passo temporal, ou seja:

$c \leq (\Delta x / \Delta t)$ . Caso esta condição não se verifique, a onda deslocar-se-á mais rápido no espaço e tempo do que a aproximação numérica. Nestas situações o software emprega uma forma alternativa da aproximação por diferenças numéricas finitas, designada por forma conservativa. Nesta aproximação a ordem de análise espacial dos pontos processa-se entre os pontos B e C da Figura 5.34, ao invés dos pontos A e D da abordagem anterior, a análise temporal faz-se entre B e A, inversamente a C e D. O *software* HEC-HMS verifica a estabilidade da onda de cheia quanto à relação expressa, a cada passo de cálculo, aplicando uma ou outra forma de aproximação consoante o caso.

A precisão e estabilidade do método das diferenças finitas dependem da manutenção da relação:  $v_c(\Delta t) = \Delta x$ , onde  $v_c$  é a velocidade média da onda cinemática num determinado elemento de simulação. A velocidade da onda cinemática depende da altura do escoamento, e, conseqüentemente, varia na propagação do hidrograma através de qualquer um dos seus elementos. Como  $\Delta x$  se trata de um valor fixo, o esquema das diferenças finitas recorre a uma modificação interna de  $\Delta t$  de modo a manter a desejada estabilidade da relação inicialmente expressa. Contudo, o *software* HEC-HMS processa todos os outros cálculos num passo temporal fixo definido pelo utilizador, definido nas especificações de controlo. Assim, a variação de  $\Delta t$  utilizada para cada sub-bacia pelo método das diferenças finitas é comparado ao valor definido pelo utilizador previamente a qualquer cálculo como forma de assegurar a estabilidade da relação que rege a velocidade da onda cinemática.

A precisão do método das diferenças finitas depende também da selecção do incremento de distância,  $\Delta x$ , que, como referido, se trata de um valor fixo. Este valor é escolhido internamente pelo programa HEC-HMS admitindo um valor máximo de velocidade estimado pelos valores do escoamento lateral e escoamento vindo de montante (caso exista). O valor de  $\Delta t$  será o mínimo de: um terço do tempo de translação, sendo este determinado com base na velocidade estimada; um quarto do tempo de crescimento do hidrograma de montante; o intervalo de tempo definido pelo utilizador. Finalmente, pela equação expressa no parágrafo anterior, é determinado  $\Delta x$ , permanecendo este constante. O erro nesta determinação estima-se geralmente num valor inferior a cinco por cento, sendo este expresso aquando da realização da simulação

#### 5.6.3.1.2 Modelo de Perdas de Precipitação

Como referido em 3.3.6.2 as equações que regem o modelo do SCS, método de simulação das perdas de precipitação escolhido, são as equações (3.10), (3.11) e (3.13).

De acordo com este conjunto de equações e com os parâmetros de entrada no *software* HEC-HMS, procedeu-se à avaliação do número de escoamento para cada uma das subunidades hidrológicas em estudo. O processo de aquisição deste valor obedeceu a uma metodologia equivalente à empregue na ponderação da rugosidade dos planos aquando da caracterização do modelo de escoamento directo. Assim, obteve-se um valor resultante de uma média ponderada ao valor da área de cada um dos polígonos da carta de uso do solo contidos no interior dos polígonos representativos dos planos definidos para o modelo da onda cinemática.

O valor de número de escoamento atribuído a cada uma das classes da carta de uso do solo foi baseado na tabela apresentada no Anexo C. Este atendeu a que o tipo de solos, do ponto de vista hidrológico, de acordo com a classificação sugerida pelo SCS, característicos da bacia da Ribeira de Valadares foi anteriormente classificado como pertencente ao tipo B. Na Tabela 5.11 representam-se os valores médios para cada plano das sub-bacias hidrográficas da Ribeira de Valadares. O cálculo foi realizado para a situação antecedente de humidade média (AMC II) e para a situação antecedente de humidade elevada (AMC III), sendo esta última espectável na ocorrência de um evento de precipitação extrema, uma vez que este ocorrerá com maior probabilidade em meses tipicamente húmidos e usualmente antecedido de idênticos eventos de menor intensidade e/ou duração. O valor médio para a situação antecedente de humidade elevada (AMC III) foi calculado com base na Equação (3.14).

**Tabela 5.11** – Valores definidos para o número de escoamento para cada classe de uso do solo, em situação AMCII e AMCIII, média ponderada para os planos das subunidades hidrológicas da bacia de Valadares, e respectivo valor da abstracção inicial.

Área (m <sup>2</sup> )	Plano	Classe de uso do solo	CN (AMC II)	CN (AMC II)	CN – Valor Médio (AMCII)	CN – Valor Médio (AMC III)	I <sub>a</sub> AMC II (mm)	I <sub>a</sub> AMC III (mm)
878897.24	1N	Tecido urbano descontínuo	72	86	71	85	21	9
309373.65	1N	Florestas mistas	60	78				
171638.08	1N	Agricultura com espaços naturais	71	85				
72009.99	1N	Tecido urbano contínuo	85	93				
36904.63	1N	Florestas mistas	60	78				
114655.91	1N	Culturas anuais de sequeiro	81	96	73	86	19	8
350113.69	1S	Tecido urbano descontínuo	72	86				
80719.57	1S	Agricultura com espaços naturais	71	85				
259611.85	1S	Florestas mistas	60	78				
16485.70	1S	Tecido urbano contínuo	85	93				
138195.55	1S	Florestas mistas	60	78				
310320.36	1S	Indust. comércio e equipamentos	88	94				
781.20	1S	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
60933.81	1S	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
15199.49	1S	Áreas de extracção mineira	88	94				
1932.29	1S	Tecido urbano descontínuo	72	86	80	91	13	5
351896.09	2N	Tecido urbano descontínuo	72	86				
1464.03	2N	Florestas mistas	60	78				
209381.85	2N	Indust. comércio e equipamentos	88	94				
256605.34	2N	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
225.04	2N	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
155050.74	2N	Áreas de extracção mineira	88	94				
26818.44	2N	Florestas mistas	60	78	74	88	18	7
2369.72	2N	Tecido urbano descontínuo	72	86				
540387.67	2S	Tecido urbano descontínuo	72	86				
399350.98	2S	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
291.09	2S	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
95520.14	2S	Áreas de extracção mineira	88	94				
188586.47	2S	Florestas mistas	60	78				
6721.85	2S	Tecido urbano descontínuo	72	86				
1827.56	2S	Florestas mistas	60	78				

Área (m <sup>2</sup> )	Plano	Classe de uso do solo	CN (AMC II)	CN (AMC II)	CN – Valor Médio (AMCII)	CN – Valor Médio (AMC III)	I <sub>a</sub> AMC II (mm)	I <sub>a</sub> AMC III (mm)
20432.69	3N	Tecido urbano descontínuo	72	86	79	94	14	3
58782.31	3N	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
113275.79	3S	Tecido urbano descontínuo	72	86	69	85	22	9
79007.29	3S	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
27209.71	3S	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
5409.14	3S	Áreas de extracção mineira	88	94				
164499.99	3S	Tecido urbano descontínuo	72	86				
215411.09	3S	Florestas mistas	60	78				
101575.45	4N	Culturas anuais de sequeiro	81	96	74	89	18	6
109796.56	4N	Tecido urbano descontínuo	72	86				
33311.43	4N	Florestas mistas	60	78				
411480.83	4S	Culturas anuais de sequeiro	81	96	79	94	14	3
87085.18	4S	Tecido urbano descontínuo	72	86				
15836.55	4S	Florestas mistas	60	78				
822739.70	5N	Tecido urbano descontínuo	72	86	75	89	17	6
27.18	5N	Agricultura com espaços naturais	71	85				
29595.23	5N	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
353157.63	5N	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
1844.41	5N	Florestas de resinosas	52	71				
27334.73	5S	Tecido urbano descontínuo	72	86	65	82	28	11
44869.05	5S	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
249851.63	5S	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
430323.19	5S	Florestas de resinosas	52	71				
2.85	5S	Florestas de resinosas	52	71				
4003.88	5S	Tecido urbano descontínuo	72	86				
39488.54	5S	Tecido urbano descontínuo	72	86	78	93	14	4
167629.62	6N	Tecido urbano descontínuo	72	86				
5935.88	6N	Praias, dunas e areais	40	61				
18390.32	6N	Florestas de resinosas	52	71				
633037.44	6N	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
2101.99	6S	Praias, dunas e areais	40	61	68	85	24	9
291946.70	6S	Culturas anuais de sequeiro	81	96				
246105.17	6S	Florestas de resinosas	52	71				
56799.27	6S	Tecido urbano descontínuo	72	86				

De acordo com a Equação (3.11) foi possível o cálculo directo do valor das perdas iniciais de precipitação. Estes encontram-se igualmente representados na Tabela 5.11, e para as duas situações antecedentes de humidade referidas. Lembra-se que, de acordo com Correira, 1984 b, citado em 3.4.6.2, o valor de 20% sugerido pelo SCS seria excessivo e, ainda, a sugestão do estudo de Portela, 2000, segundo a qual se deveria iniciar a modelação considerando este valor como igual a zero e por calibração ajustá-lo. Não obstante, entendeu-se o valor encontrado como indicativo, sendo o seu acerto feito aquando da calibração do modelo hidrológico.

Uma vez estimados os parâmetros acima mencionados o cálculo da precipitação efectiva, intrínseco ao funcionamento do programa de modelação utilizado, resume-se à aplicação da Equação (3.10). Esta determinação será feita de acordo com o passo de cálculo definido pelo modelador, i.e., o intervalo de tempo escolhido, e servirá de condição fronteira ao modelo da onda cinemática.

### 5.6.3.1.3 Modelo de Escoamento de Base

A separação do escoamento de base do escoamento directo, gerado pelo modelo da onda cinemática, rege-se, como exposto em 3.4.3, segundo o modelo da recessão exponencial, pela Equação (3.1).

O modelo de recessão exponencial do escoamento de base assume no *software* HEC-HMS a forma matemática seguinte:

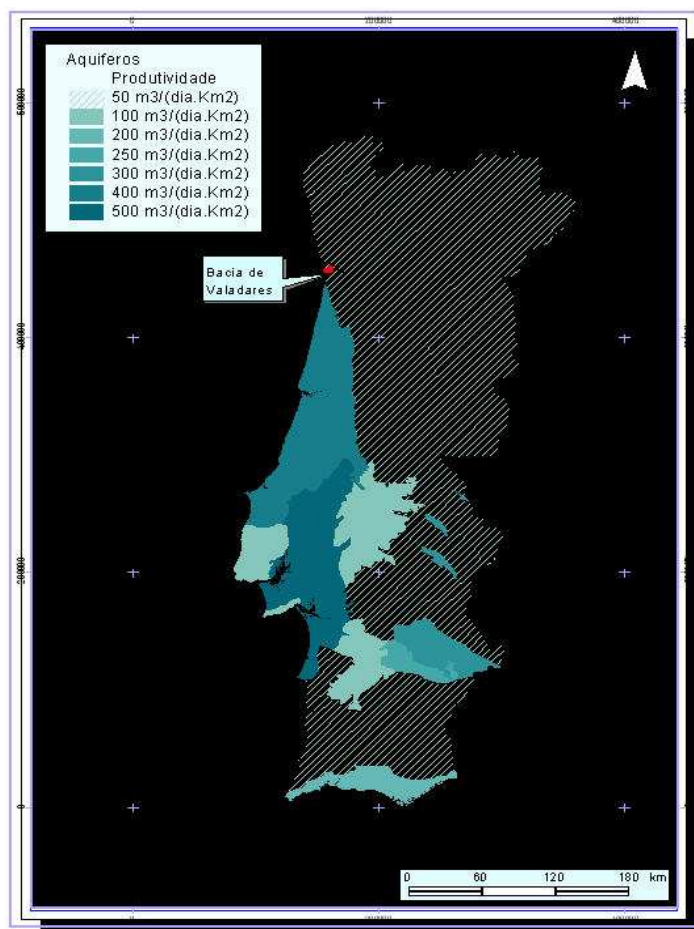
$$Q(t) = Q_0 \cdot k_{HEC}^t \quad \text{Equação (5.8)}$$

em que  $Q_0$  tem significado idêntico ao da equação (3.1), expresso  $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ,  $Q(t)$ , o valor, em  $\text{m}^3/\text{s}$ , do escoamento de base no instante  $t$ , este expresso em dias, e  $k_{HEC}$  a constante de decaimento exponencial, adimensional.

De acordo com o algoritmo de resolução da Equação (5.8), implementado no programa HEC-HMS, para definir a constante  $k_{HEC}$  é solicitada a razão entre o escoamento de base no instante  $t$  e o escoamento de base 24 h antes, razão que portanto varia entre 0 e 1.

A cada utilização, o *software* exige a indicação do caudal  $Q_0$ , bem como a de um outro caudal, no ramo descendente do hidrograma e a que atribui a designação de limiar (*threshold*). A recessão do escoamento de base tem lugar a partir de  $Q_0$  até ao instante de ocorrência do referido caudal limiar. Para instantes posteriores, o programa considera que a forma do hidrograma total é dada pela curva de recessão que, para o efeito é aplicada a partir desse caudal limiar. O escoamento de base é então avaliado de modo indirecto, subtraindo ao escoamento total definido pela curva de recessão o escoamento directo que o programa vai sucessivamente obtendo. A sua representação gráfica enquadra-se na Figura 3.5, apresentada anteriormente.

De acordo com a carta digital (*raster*) da produtividade dos aquíferos em Portugal continental, informação gratuita disponibilizada no portal do Instituto do Ambiente, e sobrepondo-a pelo polígono da bacia da Ribeira de Valadares, foi possível estimar o valor de  $Q_0$ , sendo este de aproximadamente  $0,00058 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ , logo  $5,75 \text{ l/s}$  para a área da bacia de Valadares. A Figura 5.35 representa a carta digital (*raster*) da produtividade dos aquíferos em Portugal continental sobreposta pelo polígono da bacia da Ribeira de Valadares.



**Figura 5.35** – Carta digital da produtividade dos aquíferos em Portugal continental sobreposto pelo polígono da bacia da Ribeira de Valadares (Fonte: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente)

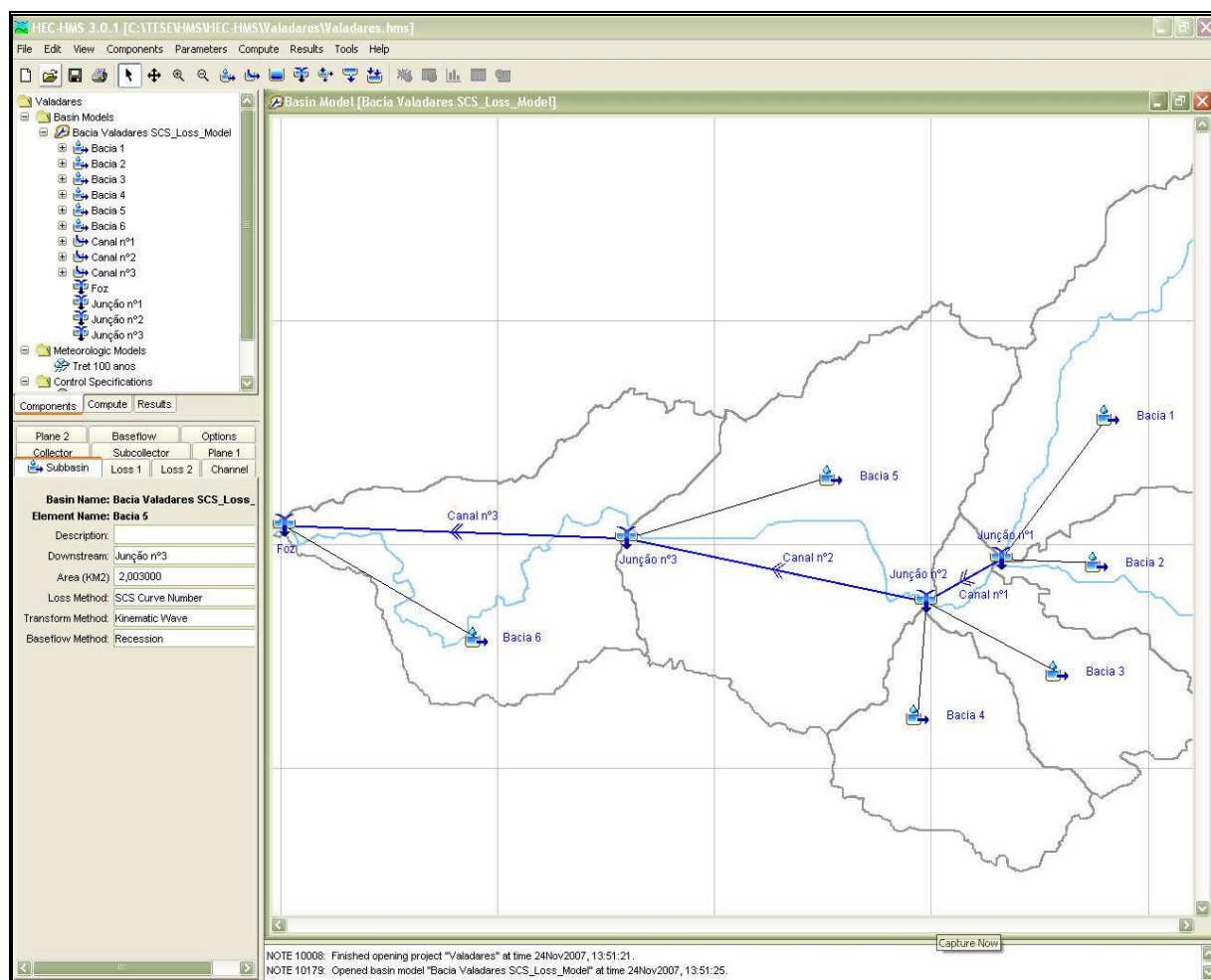
A constante  $k_{HEC}$  e o valor do caudal limiar, representado pelo quociente do seu valor relativamente ao valor do caudal de ponta no decorrer do evento de precipitação, na impossibilidade da sua caracterização dada a ausência de hidrogramas observados e a sua natureza empírica, serão obtidos aquando da realização da calibração do modelo hidrológico. Inicialmente estes valores foram arbitrados numericamente, sem significado físico, como 0,001 e 0,01, para a constante  $k_{HEC}$  e para o valor do rácio do escoamento de base ao valor de ponta do hidrograma (noção idêntica à de caudal limiar), respectivamente. O valor prévio a calibração para a razão do caudal limiar foi reduzido (1%), atendendo à escassa relevância do valor do escoamento de base na ocorrência de um evento de precipitação para uma bacia hidrográfica da dimensão da presente.

#### 5.6.3.1.4 Modelo de Propagação do Escoamento em Canal

Os hidrogramas provenientes de cada uma das sub-bacias ou junções são combinados de acordo com o princípio da sobreposição e trasladados para jusante pelo canal da subunidade subsequente de acordo com o modelo hidrológico seleccionado. A modelação dos escoamentos combinados desenvolve-se em cada fracção por introdução do hidrograma resultante na secção mais a

montante da subunidade em análise. Na Figura 5.36, proveniente do *software* HEC-HMS, representa-se a situação definida.

Na simulação da translação do escoamento em canal optou-se pelo modelo da onda cinemática. As considerações quanto à sua formulação e solucionamento tidas em 5.6.3.1.1 relativamente à modelação do escoamento em canal aplicam-se, sendo que a parametrização realizada (Tabela 5.10) para os canais das subunidades 3, 5 e 6 foi de novo utilizada (por se tratarem dos mesmos segmentos da rede hidrográfica).



**Figura 5.36** – Representação no programa HEC-HMS da estrutura hidrográfica da bacia da Ribeira de Valadares.

De acordo com Radwan e Berlamont, 2000, a escolha de um modelo de translação adequado depende de diversos factores como a configuração da rede de drenagem, regime do escoamento (crítico, supercrítico ou subcrítico), declive e geometria dos canais, existência, ou não, de zonas de armazenamento e das condições fronteira de jusante. O mesmo autor refere ainda que na ausência de dados de calibração a opção deverá ser feita entre os dois modelos hidráulicos agregados e conceptuais disponíveis e validados por diversos estudos anteriores, i.e., o modelo da onda cinemática ou o modelo de Muskingum-Cunge. O último difere na sua formulação matemática do primeiro considerando a atenuação de energia do escoamento que ocorreria por acção de forças de inércia

(componente dinâmica do escoamento), estando assim indicado para situações de geometria de leito irregular, sobretudo quando os seus declives são inferiores a cerca de 0.002 m/m. No caso da Ribeira de Valadares verificou-se a ocorrência de canais de geometria rectangular e declives iguais ou superiores ao valor indicado, tendo, pelo tanto, sido escolhido o modelo da onda cinemática.

Finalmente, refere-se o facto da modelação, levada a cabo pelo programa HEC-HMS, nas confluências (junções) assumir uma situação de não armazenamento de volumes nessas zonas.

### 5.6.3.2 Modelo de Precipitação

Tendo por objectivo o estabelecimento do hietograma de projecto para um evento de precipitação extrema com 1% de frequência de ocorrência, i.e., para um período de retorno de 100 anos, foi determinado o tempo de concentração da bacia da Ribeira de Valadares. O cálculo deste valor visa encontrar a duração da precipitação crítica, de modo assegurar a contribuição da totalidade da área da bacia hidrográfica para o escoamento na sua secção terminal. Para tal efeito foi utilizada a Equação (3.15).

O comprimento do curso de água principal foi determinado como o somatório dos valores de comprimento de canal das subunidades 3, 5 e 6, e o percurso hidraulicamente mais distante da subunidade 1. Estes segmentos correspondem aos elementos de canal visualizáveis no terreno, excepto o que refere à subunidade 1 onde se assume o comprimento do percurso hidraulicamente mais distante de forma a validar a condição imposta em anterior parágrafo. Os valores previamente determinados para a caracterização geométrica dos canais do modelo da onda cinemática, apresentados na Tabela 5.10, constituem a base de determinação do referido comprimento. A soma dos referidos valores encontra-se expressa na Tabela 5.12.

O valor do número de escoamento médio para a totalidade da bacia de Valadares foi obtido por média ponderada ao valor da área de cada um dos planos da onda cinemática anteriormente considerados, e tendo por base os valores médios do número de escoamento expressos na Tabela 5.11. O cálculo foi realizado para a situação antecedente de humidade média (AMC II) e para a situação antecedente de humidade elevada (AMC III), sendo esta, como referido, espectável na ocorrência de um evento de precipitação extrema. Na Tabela 5.12 representa-se o valor médio do número de escoamento para a totalidade da bacia de Valadares.

O declive médio da bacia da Ribeira de Valadares foi determinado por recurso à carta de declives apresentada na Figura 5.18. A operação executada em SIG permitiu a pronta obtenção do valor médio desejado, expresso em graus. Este foi convertido a percentagem por aplicação da Equação (5.1) e consta da Tabela 5.12.

**Tabela 5.12** – Valores médios do número de escoamento, comprimento da linha de água principal e declive da totalidade da bacia da Ribeira de Valadares.

Comprimento (m)	Número de Escoamento Médio (AMC II)	Número de Escoamento Médio (AMC III)	Declive Médio da bacia de Valadares (%)
9440	75	87	12.5

Substituindo na Equação (3.15) os valores apresentados na Tabela 5.12, foi possível determinar os tempos de concentração da bacia de Valadares para a situação antecedente de humidade média (AMC II) e para a situação antecedente de humidade elevada (AMC III). Os tempos encontrados foram de 162,45 minutos (2,7 h) e de 110,35 minutos (1,8 h), respectivamente.

Salienta-se que a metodologia empregue na determinação do tempo de concentração da bacia de Valadares recorre a parâmetros que traduzem a situação presente de utilização da sua área, reflectido no valor médio do número de escoamento médio encontrado. Esta foi utilizada em detrimento do recurso a fórmulas empíricas como as de Kirprich ou de Temez onde tal caracterização não é tida em conta.

Para efeito de determinação do tempo crítico de precipitação para a bacia de Valadares adoptou-se o valor correspondente à situação antecedente de humidade elevada (AMC III). Este valor foi substituído na equação proposta por Mockus para o cálculo do tempo crítico de precipitação, tendo sido obtido o valor de 2,7 horas. Uma vez que o valor encontrado não coincide com a precipitação diária máxima anual para o período de retorno de 100 anos, como é comum em dimensionamento hidrológico de bacias hidrográficas, recorreu-se à Equação (3.6).

Os valores do coeficiente  $a$  e expoente  $b$  da curva IDF foram obtidos com base nos valores constantes de tal curva no portal do SNIRH, para a zona da Serra do Pilar (local mais próximo da área de estudo), e para o período de retorno de 100 anos, encontrando-se representados na Tabela 5.13.

**Tabela 5.13** – Curva IDF: Porto (Serra do Pilar) (Fonte: SNIRH)

Curva IDF: Porto (Serra do Pilar)	
Período de Retorno (anos)	100
Coeficiente ( $a$ )	392
Expoente ( $b$ )	-0.58

Na determinação do valor da precipitação diária máxima anual ( $P_{24}$ ) para o período de retorno de 100 anos recorreu-se a uma operação de sobreposição no SIG, tendo esta como elementos base o polígono delimitante da bacia da Ribeira de Valadares e a grelha de precipitação diária máxima anual para um período de retorno de 100 anos de Portugal Continental, disponível em formato *raster* no portal do SNIRH (Figura 5.37). Desta operação resultou um valor médio de precipitação diária máxima

anual para a bacia de Valadares de 116,91 mm. A média calculada directamente no SIG considera o valor de precipitação relativo a cada quadrícula da grelha utilizada, sendo a sua resolução de 1000 m.

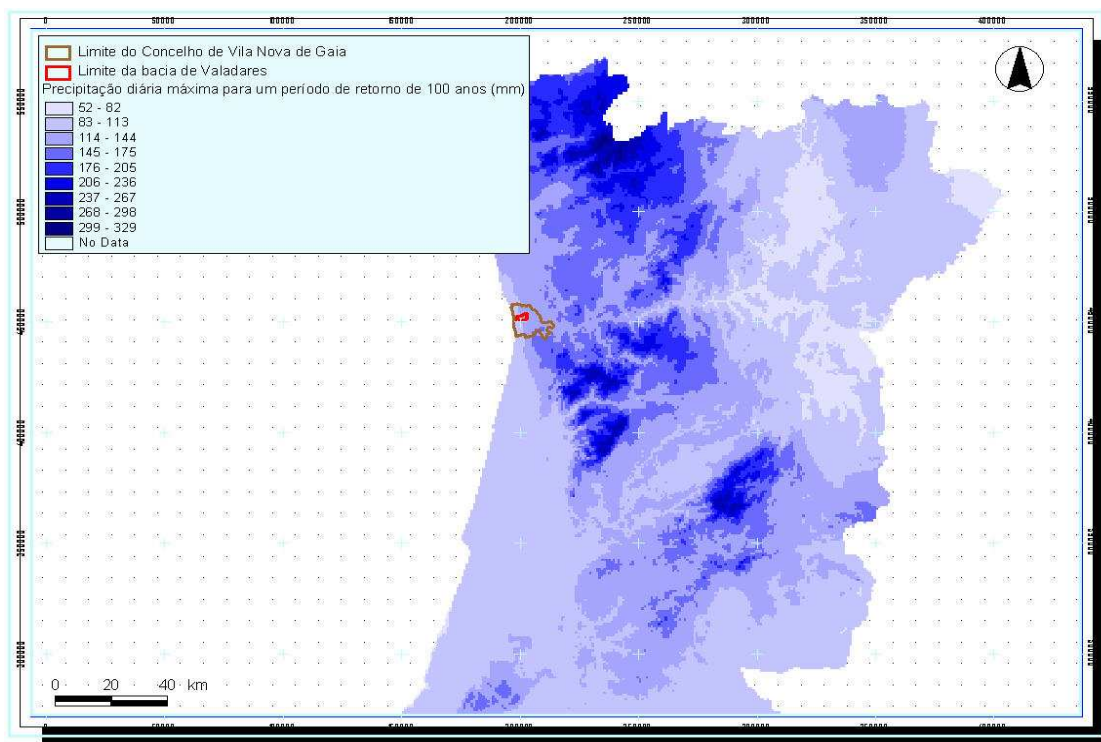


Figura 5.37 – Representação da distribuição espacial da precipitação diária máxima anual para Portugal Continental (Fonte: SNIRH).

Substituindo na Equação (3.6) os valores aferidos para o coeficiente  $a$  e expoente  $b$  da curva IDF, o valor da precipitação diária máxima anual,  $P_{24}$ , e resolvendo a expressão em ordem a  $P_t$ , encontrou-se o valor de 46,8 mm para a precipitação de duração igual ao tempo crítico de precipitação determinado para a bacia de Valadares e uma frequência de ocorrência de 1%.

Atendendo às conclusões de Portela *et al.*, 2000 a, citadas em 3.4.5, e encontrados os valores de duração e de precipitação conducentes à constituição do hietograma de projecto para a bacia de Valadares, e para um período de retorno de 100 anos, procedeu-se à discretização temporal do evento de precipitação em três blocos alternados, de igual duração e intensidade variável, perfazendo a sua soma o valor de precipitação crítica encontrado. Assim, e dividindo o tempo de precipitação crítica obtido anteriormente (2,7 h) em três fracções equivalentes, foi possível determinar a duração de cada um dos blocos, 0,9 h, aproximadamente. Recorrendo à curva IDF apresentada na Tabela 5.13 e, uma vez mais, à Equação (3.6), seguiu-se um procedimento idêntico ao utilizado na determinação de  $P_t$ , sendo assim possível determinar a precipitação acumulada para os instantes relativos à duração de cada um dos blocos, respectivamente  $P_{0,9}$ ,  $P_{1,8}$  e  $P_{2,7}$ . Os valores obtidos constam da Tabela 5.14, encontrando-se assinalados os referidos instantes.

**Tabela 5.14** – Razão e valores de precipitação acumulada, de acordo com a curva IDF da Região do Porto (Serra do Pilar), para diferentes instantes, e para a bacia de Valadares.

$t$ (h)	$\frac{a \cdot (60 \cdot t)^b \cdot t}{a \cdot (60 \cdot 24)^b \cdot 24}$	$P_{24(\text{Valadares})} \cdot \frac{a \cdot (60 \cdot t)^b \cdot t}{a \cdot (60 \cdot 24)^b \cdot 24}$ (mm)
0,08	0,09	10,8
0,17	0,12	14,5
0,25	0,15	17,2
0,33	0,17	19,4
0,42	0,18	21,3
0,50	0,20	23,0
0,90	0,25	29,5
1,00	0,26	30,8
1,81	0,34	39,5
2,00	0,35	41,2
2,71	0,40	46,8
3,00	0,42	48,8
4,00	0,47	55,1
5,00	0,52	60,5
6,00	0,56	65,3
12,00	0,75	87,4
24,00	1,00	116,9

(Nota: Assinalam-se os instantes relativos à duração de cada um dos blocos do hietograma de projecto)

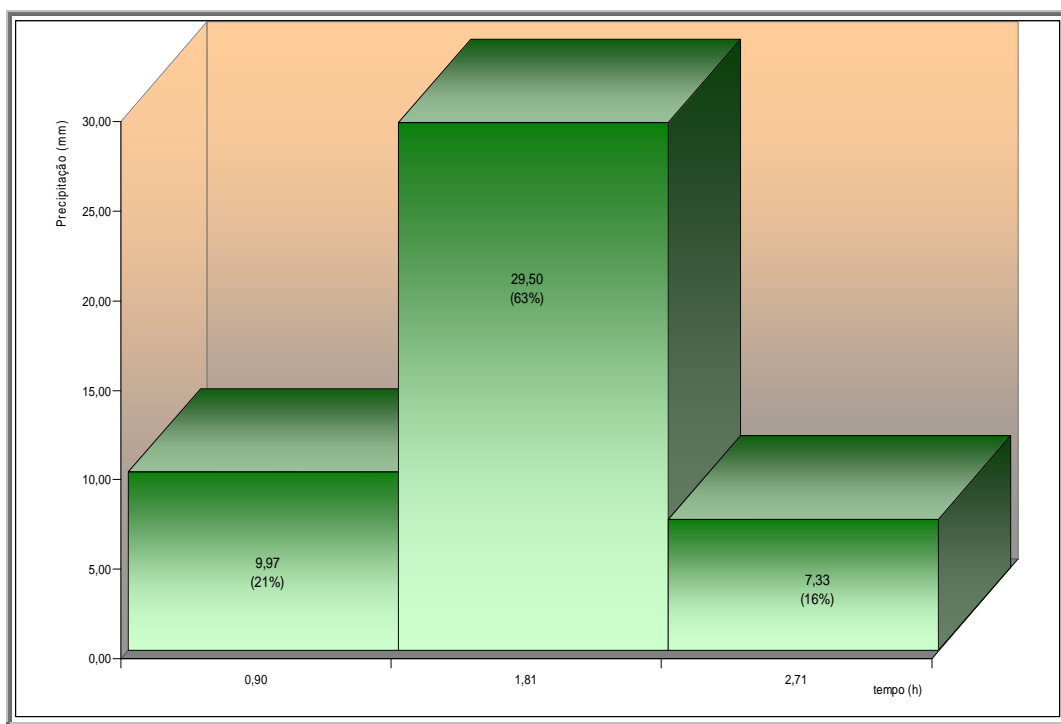
Conforme o método dos blocos alternados, o resultado da diferença entre os valores determinados para os instantes assinalados na Tabela 5.14 deve ser distribuído optando-se pelo maior valor dessa diferença como sendo o valor do bloco central, o segundo maior valor corresponde ao bloco posicionado à sua esquerda e o terceiro valor ao bloco posicionado à sua direita. No caso de se optar por mais do que três blocos, a sua distribuição seguiria a sequência enunciada, sendo os valores das diferenças encontradas dispostos alternadamente à esquerda e à direita do bloco central (maior valor de diferença), por ordem de grandeza decrescente respectivamente. Na Tabela 5.15 apresenta-se a distribuição obtida para os instantes de cálculo anteriormente referidos.

Na Tabela 5.15 encontram-se, igualmente, representados os resultados conducentes à elaboração do hietograma de projecto para um período de retorno de 100 anos para a bacia de Valadares, constituído por três blocos alternados. Este representa-se graficamente na Figura 5.38.

**Tabela 5.15** – Processo de cálculo do método dos blocos alternados. Resultado da diferença entre os valores determinados para os instantes assinalados na Tabela 5.14, sua fracção percentual, e respectivo procedimento para disposição alternada.

$t$ (h)	$P_t$ (mm)	$\Delta P_t$ (mm)	Fracção de $\Delta P / \sum P_t$ (%)
0,9	29,50	29,50	63
1,81	39,47	9,97	21
2,71	46,79	7,33	16
Técnica dos blocos alternados	Bloco ao centro (maior valor de $\Delta P_t$ ) 29,50 mm		
	Bloco à esquerda (2º maior valor de $\Delta P_t$ ) 9,97 mm		
	Bloco à direita (3º valor de $\Delta P_t$ ) 7,33 mm		

A preferência de arranjo da precipitação crítica por blocos alternados prende-se com o ajuste dos dados a uma distribuição normal. Esta, de acordo com estudos de Portela *et al.*, 2000 a, atalhará a subestima do valor do caudal de ponta do hidrograma de projecto, resposta ao hietograma gerado.



**Figura 5.38** – Hietograma de projecto para a bacia de Valadares, para um período de retorno de 100 anos, considerando três blocos alternados.

### 5.6.3.3 Especificações de Controlo

As especificações de controlo estabelecem o intervalo temporal no qual decorre a simulação a desenvolver. Este intervalo define-se por uma data de início, hora de início, data de término e hora de término da simulação. O *software* HEC-HMS não impõe qualquer limitação quanto à duração do intervalo temporal a definir. Considera-se uma simulação como de evento ou contínua mediante a duração do intervalo temporal definido, bem como o carácter dos modelos empregues nessa mesma simulação.

As especificações de controlo incluem ainda o estabelecimento do passo de cálculo a usar nas computações a realizar no decorrer da simulação. Implicitamente, os resultados apresentam-se para a mesma duração do passo de cálculo considerado. Como descrito anteriormente, alguns dos modelos empregues no modelo de bacia compreendem métodos de solucionamento sensíveis a esta duração, pelo tanto foi conferido um valor de cinco minutos a esta, admitindo-se como sendo suficientemente reduzido de modo a não comprometer tal solucionamento.

Os valores da série temporal gerada para o hietograma de projecto são interpolados ao intervalo de tempo definido para a simulação. A interpolação é linear no tempo e realizada entre os pontos de informação disponível. Uma vez que o hietograma de projecto corresponde, na sua concepção, a uma condição temporal abstracta, a definição da sua data de ocorrência, ou outra contextualização, não assume particular relevância.

### 5.6.4 Calibração e Resultados do Modelo Hidrológico

O presente subcapítulo tem por objectivo estabelecer os resultados do modelo hidrológico gerado, ou seja, o hidrograma de projecto para a bacia da Ribeira de Valadares, para um período de retorno de 100 anos. No entanto, como ressalta das alíneas onde se caracterizaram os diferentes modelos descritivos do comportamento hidrológico da bacia, alguns dos seus parâmetros não tem um verdadeiro significado físico, sendo, como tal, inexequível a atribuição de um valor rigoroso aos mesmos. Posta esta condicionante, impõem-se um ajuste desses mesmos parâmetros por recurso a um processo de calibração, envolvendo este, na ausência de valores históricos de monitorização de caudais, a colheita de dados de campo em face da ocorrência de um evento de precipitação.

Optou-se por inicialmente apresentar os resultados relativos à calibração do modelo de bacia, de modo a evidenciar as suas alterações após a dita. Descrevem-se os pressupostos e trabalho de campo necessários ao processo de calibração, terminando-se por apresentar o hidrograma resultante das alterações impostas ao modelo de bacia, resultante do evento de precipitação registado, e a sua contraposição ao hidrograma observado, fruto dos dados recolhidos.

Finalmente, representam-se os resultados do modelo hidrológico criado ao longo de 5.6.3, após a rectificação do seu modelo de bacia por calibração, e assim, os hidrogramas de projecto para a

bacia da Ribeira de Valadares, para um período de retorno de 100 anos, sendo esta determinação um dos objectivos finais da presente dissertação.

#### 5.6.4.1 Calibração do Modelo de Bacia

Embora se tenha nesta fase uma ideia consistente dos valores a atribuir a cada um dos parâmetros integrantes dos métodos de simulação constantes do modelo de bacia, tendo para tanto contribuído o recurso ao SIG e à informação digital nele trabalhada, permanece ainda um conjunto de parâmetros para o qual só foi possível estimar uma gama dos seus valores. Na alteração destes valores por meio do ajuste dos resultados simulados e observados consiste o processo de calibração.

Idealmente, o processo de calibração utilizado na definição do hidrograma de projecto, para o tempo de retorno de 100 anos, deveria ser feito recorrendo a dados históricos de eventos de similar magnitude. No entanto, na ausência de registos de séries temporais de valores de escoamento, a solução encontrada passou pela monitorização desse mesmos valores durante a ocorrência de um evento de precipitação. Mediante a recolha de dados da precipitação relativa ao evento mensurado foi criado um novo modelo de precipitação e avaliada a resposta do modelo de bacia existente, através de simulações. Assim, o hidrograma simulado foi contrastado ao hidrograma observado, sendo o valor de um conjunto de parâmetros ajustado. Por contingência de tempo e de meios esta monitorização foi unicamente realizada nas imediações da foz da Ribeira de Valadares, num troço da linha de água de geometria rectangular com cinco metros de largura e um metro de altura. A Figura 5.39 representa fotograficamente o local de recolha de dados.

**Figura 5.39** – Local de determinação dos valores de escoamento (foz da Ribeira de Valadares)



Uma vez que a monitorização realizada teve lugar em meses tidos como húmidos, o modelo de bacia utilizado na simulação foi, *a priori*, idêntico ao parametrizado para o cálculo do hidrograma de projecto. O registo dos valores de escoamento foi efectuado por um medidor de caudal (Nivus PCM 4), cujo princípio de medição assenta na determinação da altura e velocidade do escoamento por meio de ultra-som. Estas determinações pressupondo a prévia introdução no controlador do equipamento da geometria da margem. Os valores de precipitação foram recolhidos localmente, por recurso a um udómetro posicionado na foz da bacia de Valadares. A precipitação assumiu-se como sendo uniforme sobre a totalidade da bacia hidrográfica, abstracção provável dada a sua reduzida área. Os seus valores foram registados a intervalos regulares de 30 minutos.

Previamente à abordagem descrita foi realizado trabalho no terreno com o objectivo de observação dos pontos mais relevantes à caracterização hidrológica e hidráulica da bacia da Ribeira de Valadares. Desta forma, as secções terminais das subunidades hidrológicas definidas foram geograficamente referenciadas e localizadas no terreno por meio de GPS. Os locais assinalados permitiram a extracção de dados geométricos dos canais de drenagem, anteriormente utilizados na parametrização do modelo da onda cinemática na sua formulação para escoamento em canal. Adicionalmente foram percorridos alguns itinerários com vista ao levantamento de singularidades hidráulicas ao longo da rede de drenagem, registando-se o tipo de meio envolvente, em particular no que respeita ao uso do solo. Este primeiro levantamento, não tendo sido exaustivo, permitiu completar e confirmar a informação proveniente do SIG. Os percursos trilhados e os pontos de recolha de informação geométrica dos canais encontram-se representados na Figura 5.40.

Da análise indicada, realizada no mês de Agosto de 2007, e dada a prolongada ausência de precipitação verificada no período antecedente a esta data, foi possível concluir que a Ribeira de Valadares se trata de um curso de água perene, uma vez ter sido perceptível escoamento, necessariamente de base, na sua linha de água principal, mesmo nas secções de montante (subunidade número 1). A determinação do seu valor na secção terminal rondou os 50 l/s.

Quanto à ocupação do solo, a informação recolhida nos itinerários corroborou, de uma forma geral, os dados constantes da carta digital de ocupação do solo (*Corine Land Cover 2000*), utilizada na parametrização do modelo de bacia. Verificou-se igualmente uma relativa concordância com os levantamentos ortofotométricos (Fonte: Águas de Gaia) apresentados anteriormente, datados de 2003. Finalmente, foi verificado o cultivo agrícola predominante ser de cariz anual (milho), tal como consta da carta digital de ocupação do solo. Os valores da rugosidade dos planos do modelo da onda cinemática, a abstracção inicial e o número de escoamento do modelo de perdas de precipitação do SCS, reflectem assim a ausência de recobrimento vegetal do solo para os meses húmidos, nessas fracções.

As constatações advindas do levantamento de campo preliminar mencionado foram tidas em conta na atribuição do número de escoamento feita aquando da parametrização do modelo de perdas do SCS, informação apresentada na Tabela 5.11. Analogamente, foi também tida em conta a sazonalidade dos valores da rugosidade dos planos do modelo da onda cinemática, informação patente na Tabela 5.9.

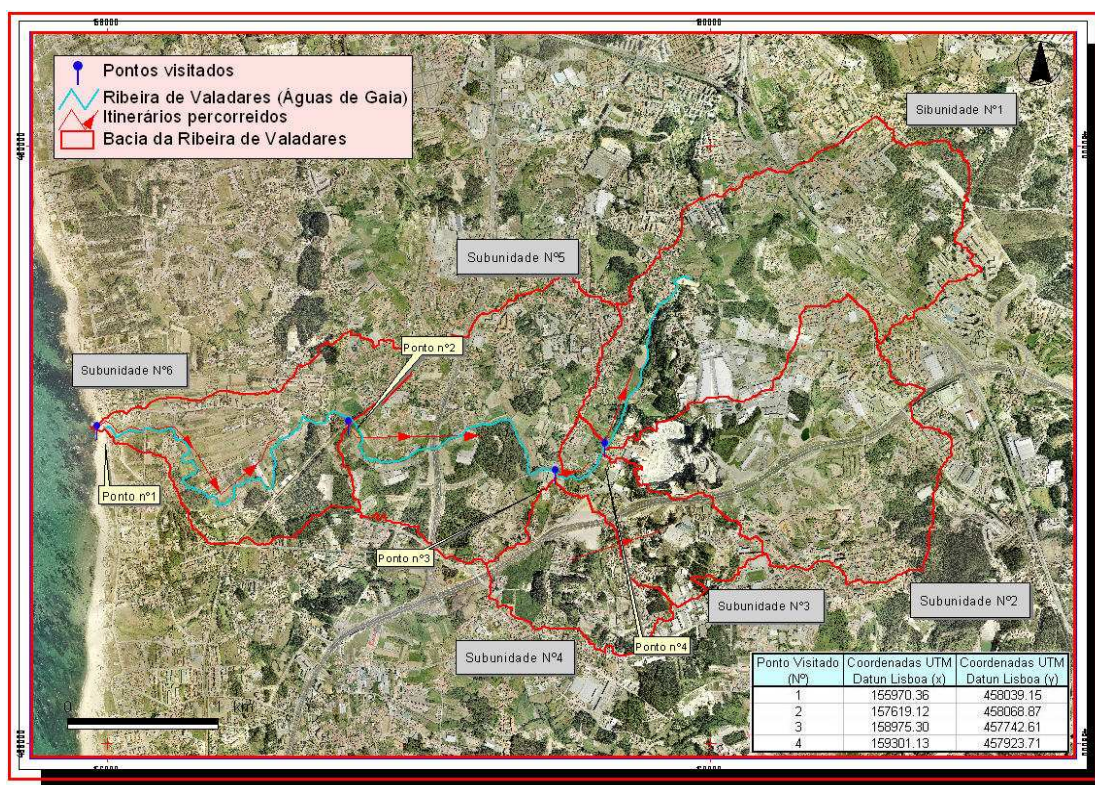


Figura 5.40 – Representação dos percursos trilhados e dos pontos de recolha de informação geométrica dos canais.

Posta a prévia caracterização realizada, procedeu-se à obtenção da série temporal de escoamento em resposta a precipitação na foz da Ribeira de Valadares. A colheita destes valores foi realizada no decorrer de meses húmidos, nomeadamente no mês de Janeiro. A referida série foi migrada do *software* Microsoft Excel para um ficheiro digital no formato *dss*, mencionado previamente, com vista à sua incorporação no *software* HEC-HMS como dados observados na foz da Ribeira de Valadares. Aquando do processo de simulação, os resultados gerados foram automaticamente comparados com os valores observados na secção terminal da bacia de Valadares. Esta comparação pôde ser feita quer por avaliação das séries temporais de escoamento, simulado e observado, na resposta à série temporal de precipitação observada, constante do respectivo modelo hidrológico, quer pelas suas representações gráficas simultâneas, i.e., os seus respectivos hidrogramas em face do hietograma registado.

O conjunto de parâmetros que se consideraram passíveis de calibração, mediante a sua natureza quer empírica, quer de difícil estabelecimento, foram:

- a rugosidade dos planos do modelo da onda cinemática;
- a rugosidade dos canais das subunidades número 2 e 4, do modelo da onda cinemática, na sua formulação para canal;
- a abstracção inicial do modelo de perdas de precipitação do SCS;
- a constante  $k_{HEC}$  e o valor do caudal limiar no modelo de escoamento de base.

Os parâmetros envolvidos podem ser alterados manualmente, com base na experiência do utilizador, ou iterados por métodos intrínsecos ao *software*, visando o seu ajuste por minoração de um parâmetro de optimização. Desta forma, uma cópia do modelo de bacia original pode ser sucessivamente alterada e os seus resultados posteriormente contrastados com a sua forma prévia à calibração, permanecendo, contudo, o projecto digital inicialmente criado no programa HEC-HMS inalterado na sua concepção geral.

As razões que assistiram ao delimitar deste conjunto de parâmetros foram sendo expostas ao longo das diferentes aléneas onde se procurou o aproximar dos seus valores. A manipulação destes, e outros, parâmetros em processo de calibração atende a alguns pressupostos, sumariamente:

- atributos dos modelos característicos das subunidades tendem a ter efeito no volume total escoado;
- atributos dos modelos característicos dos canais de drenagem tendem a ter um efeito menos perceptível e incidente sobretudo no tempo e forma do hidrograma.

No Anexo D são apresentados os valores das séries temporais determinados por simulação, antes e após calibração, e por medição, em face do evento de precipitação registado no dia 2 de Janeiro de 2008. O valor total de precipitação observado foi de 7,98 mm, tendo esta sido registada a intervalos regulares de 30 minutos. Uma vez que o registo automático do escoamento foi feito a intervalos de um minuto, os valores de precipitação foram distribuídos para tal intervalo.

O processo de ajuste paramétrico começou necessariamente pela adequação do valor do escoamento de base ao valor registado previamente à ocorrência de precipitação. Assim, tendo este valor rondado os 250 l/s, e dividindo pelo valor da área da bacia de Valadares,  $Q_0$  foi definido como sendo de  $0,025 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ . Os baixos valores inicialmente atribuídos à constante de recessão e ao limiar (Figura 3.5), definido pela sua razão ao pico do hidrograma, corroboram o estabelecido teoricamente para o comportamento de pequenas bacias hidrográficas. Embora estes valores tenham sofrido um acréscimo, para 0,1 e 0,2, respectivamente, permanecem como relativamente baixos ao estipulado para bacias hidrográficas de dimensões mais apreciáveis. Este facto traduz-se, como espectável, numa baixa representatividade dos valores do escoamento de base em relação ao escoamento directo aquando da ocorrência de precipitação. Esta parametrização é igualmente capaz de explicar os reduzidos tempos de crescimento do hidrograma observado.

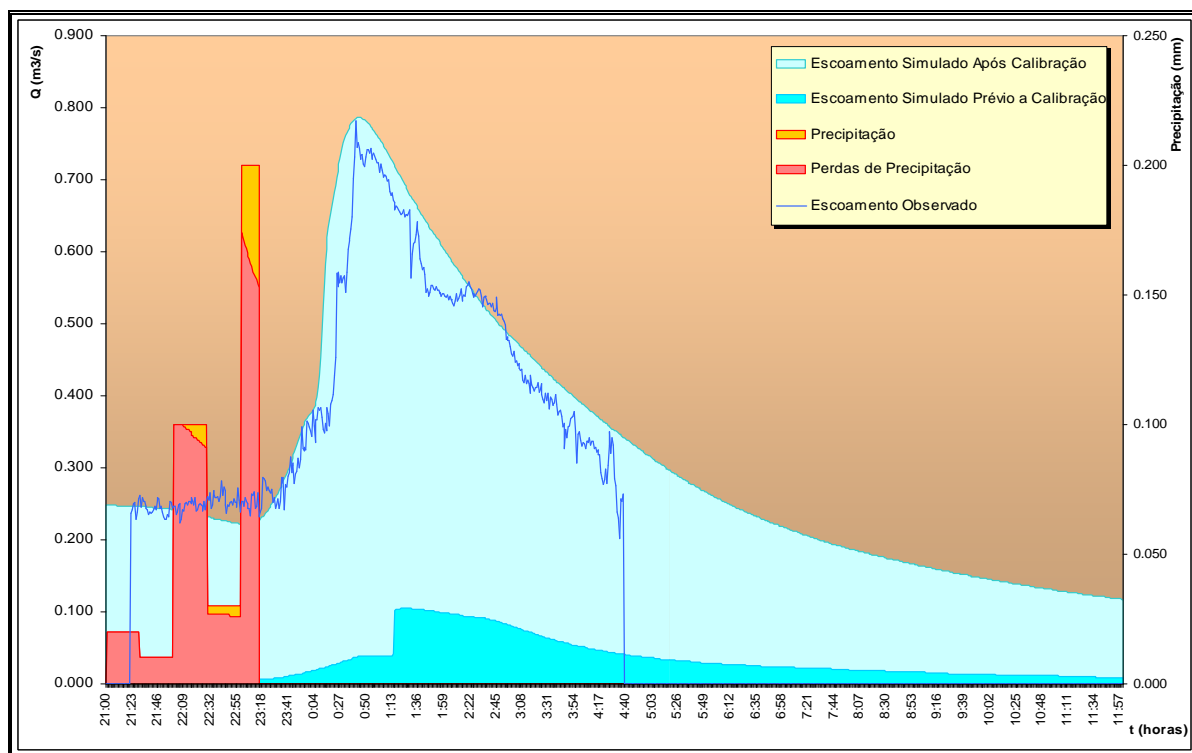
Seguidamente procedeu-se a uma adequação do volume escoado, bem como do valor de ponta do hidrograma. Para tanto bastou um ajuste nos valores da abstracção inicial no modelo de perdas do SCS. Como referido, o método de cálculo sugerido pelo SCS para este parâmetro conduziu a uma franca sobrestima do valor das perdas de precipitação no início do evento. Assim, e dada a ausência de valores de monitorização para cada uma das subunidades hidrológicas em separado, foi atribuído um valor de genérico de 1,7 mm para a abstracção inicial. Salienta-se que, a atribuição uniforme deste valor a cada uma das sub-bacias não representa, provavelmente, o real comportamento da bacia de Valadares, sendo que a atribuição de um valor mais elevado às subunidades com coberto

florestal (números 5 e 6), à subunidade número 2, onde a indústria de extracção de pedra funcionará como um reservatório, e anulando os valores das restantes sub-bacias, constituiria, possivelmente, uma representação mais fidedigna. Na impossibilidade de contrapor tal interpretação a valores determinados para cada uma das subunidades, optou-se por uma distribuição equitativa do valor das perdas iniciais.

Na Figura 5.41 representa-se graficamente o resultado observado e simulado, quer para o modelo de bacia calibrado, quer não calibrado.

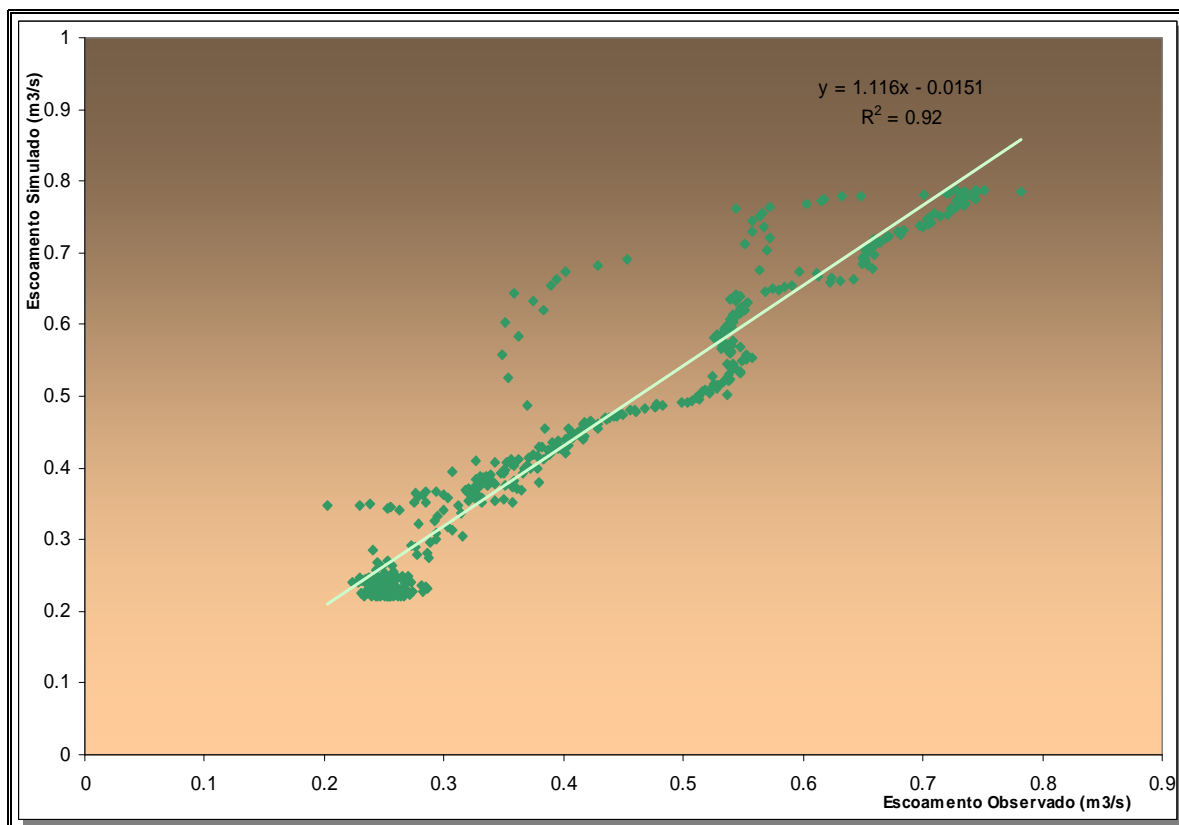
Nenhum dos parâmetros referentes aos modelos de escoamento directo e de translação do escoamento foram alterados.

A adequação dos parâmetros supracitados conduziu a um ajuste que se considera como razoável e corrobora a metodologia desenvolvida ao longo do presente trabalho, onde se procurou por recurso ao SIG e a modelos matemáticos de tradução física, reduzir a subjectividade inerente à representação da complexidade de uma bacia hidrográfica. O número de parâmetros ajustados foi reduzido e incidiu nos modelos não conceptuais utilizados, sendo que o modelo de escoamento base é de aplicação consensual e desempenhou, quando devidamente parametrizado, uma eficaz separação do escoamento de base do escoamento directo. O modelo do SCS, apesar da sua natureza empírica e da sobrestima da representatividade das perdas iniciais, respondeu adequadamente, o que se ficou a dever à apropriada caracterização do número de escoamento feita por recurso à cartografia digital de ocupação do solo e respectiva manipulação no SIG.



**Figura 5.41** – Representação gráfica do evento de precipitação registado a 2 Janeiro de 2008, respectivos valores de escoamento na foz da bacia de Valadares, observados e simulados, antes e após calibração.

Afim de quantificar o ajuste conseguido foi aplicado um processo de regressão linear aos valores observados e simulados após calibração. O seu resultado encontra-se representado graficamente na Figura 5.42, onde se inclui a equação resultante da regressão linear aplicada e respectivo coeficiente de correlação. O valor do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) encontrado, 0,92, embora não estatisticamente satisfatório, é bastante elevado e demonstra uma estreita relação entre os valores de escoamento observado e simulado.



**Figura 5.42** – Representação gráfica da relação entre os valores de escoamento observados e simulados após calibração. Representação da equação resultante da regressão linear aplicada e respectivo coeficiente de correlação.

Na Figura 5.43 representam-se os hidrogramas e hietogramas relativos a cada uma das subunidades hidrológicas delimitadas, bem como na Figura 5.44 em cada uma das junções constantes da estrutura hidrológica do modelo de bacia. As respectivas séries temporais, resultantes do programa HEC-HMS, são apresentadas no Anexo E. Na Figura 5.43 e Anexo E foram discriminadas as diferentes componentes dos hidrogramas representados e dos respectivos hietogramas: o seu escoamento de base, o escoamento total e as perdas de precipitação no hietograma. Complementarmente, foram assinalados graficamente os tempos de resposta, tempos de descida e os pontos relativos ao limiar do escoamento de base, sendo os respectivos valores apresentados na Tabela 5.16.

Da análise da Figura 5.43 e da Tabela 5.16 é, de uma forma geral, possível concluir que os tempos de descida se apresentam como relativamente elevados por comparação com os de subida, em particular por oposição aos tempos de resposta. O tempo de descida, englobando o tempo de

esvaziamento, corresponde ao decréscimo do escoamento directo e à passagem na secção do volume de água armazenado na rede durante a chuvada. Os baixos declives da rede de drenagem explicam de forma verosímil este atraso no esgotar do escoamento armazenado na mesma, em particular para as subunidades mais a jusante, como o caso da sub-bacia número 5, cujo declive é francamente reduzido. As subunidades mais a montante, números 1 e 2, apresentam idêntico comportamento, o que se ficará a dever aos seus valores mais elevados de comprimento de linha de água, maior valor de área e baixos valores de rugosidade das suas superfícies, protelando assim o decaimento do escoamento directo. O facto da subunidade número 2 apresentar uma rugosidade do leito superior remete, igualmente, para a justificação encontrada.

A forma do hietograma observado, onde se verifica uma tendência de aumento da precipitação até que o evento cesse, terá igualmente contribuído para que o tempo de esvaziamento seja, em geral, proporcionalmente elevado. A representação das perdas de precipitação caracteriza a elevada impermeabilização da bacia em estudo, sendo exemplo a subunidade número 4, onde estas, assumindo uma baixa representatividade, se traduzem num valor de escoamento de ponta próximo ao da sub-bacia número 1, cuja área é significativamente maior.

**Tabela 5.16** – Valores determinados para o centro de massa do hietograma, escoamento de ponta, tempo de resposta, tempo de descida e os pontos relativos ao limiar do escoamento de base, para a bacia de Valadares, para o evento registado a 2 de Janeiro de 2008.

	Sub-bacia Nº1		Sub-bacia Nº2		Sub-bacia Nº3		Sub-bacia Nº4		Sub-bacia Nº5		Sub-bacia Nº6	
	m <sup>3</sup> /s	t	m <sup>3</sup> /s	t	m <sup>3</sup> /s	t	m <sup>3</sup> /s	t	m <sup>3</sup> /s	t	m <sup>3</sup> /s	t
Centro de massa do Hietograma	-	22:12 h	-	22:12 h	-	22:12 h	-	22:12 h	-	22:12 h	-	22:12 h
Escoamento de Ponta	0,148	00:12 h	0,2	00:05 h	0,05	23:31 h	0,147	23:54 h	0,09	00:37 h	0,19	00:14 h
Tempo de Resposta	-	193 min	-	113 min	-	79 min	-	102 min	-	145 min	-	122 min
Limiar do Escoamento de base	0,029	10:09 h	0,04	06:45 h	0,01	07:19 h	0,029	02:47 h	-	-	0,04	04:25 h
Tempo de Descida	-	597 min	-	400 min	-	468 min	-	173 min	-	-	-	251 min

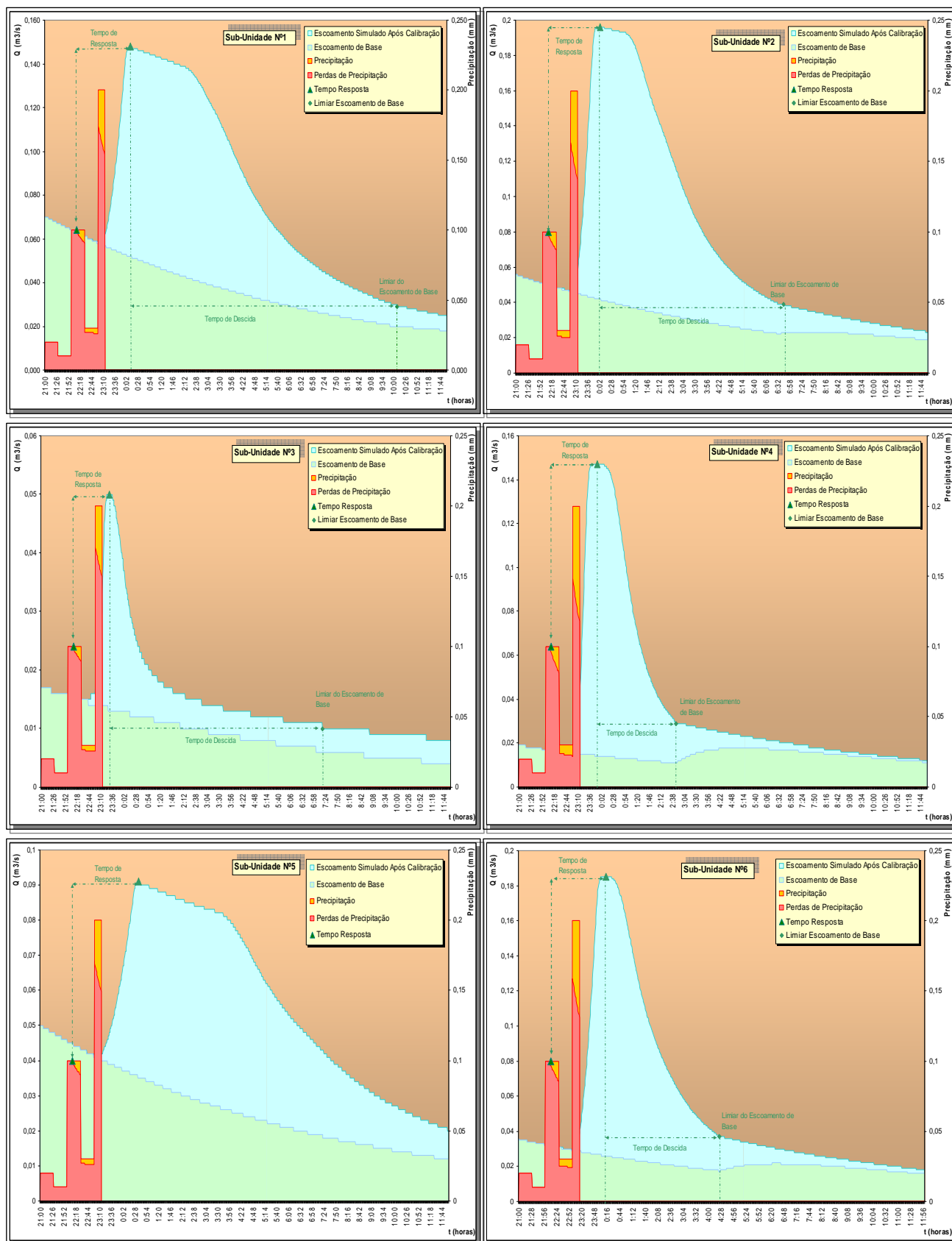


Figura 5.43 – Hidrogramas, e respectivos hietogramas, das diferentes subunidades hidrológicas individualizadas na bacia de Valadares, resultantes do evento de precipitação registado a 2 Janeiro de 2008.

Os hidrogramas representados na Figura 5.44 evidenciam a aplicação do princípio da sobreposição para a sua determinação nas junções do modelo de bacia criado. Estes quando interpretados em conjunto são representativos da evolução do escoamento ao longo da rede de drenagem, quer no seu valor, quer no tempo, sendo exemplo desta análise o pequeno intervalo de tempo que decorre entre os valores de ponta das junções número 1 e 2, resultado dos, apenas, 450 metros percorridos.

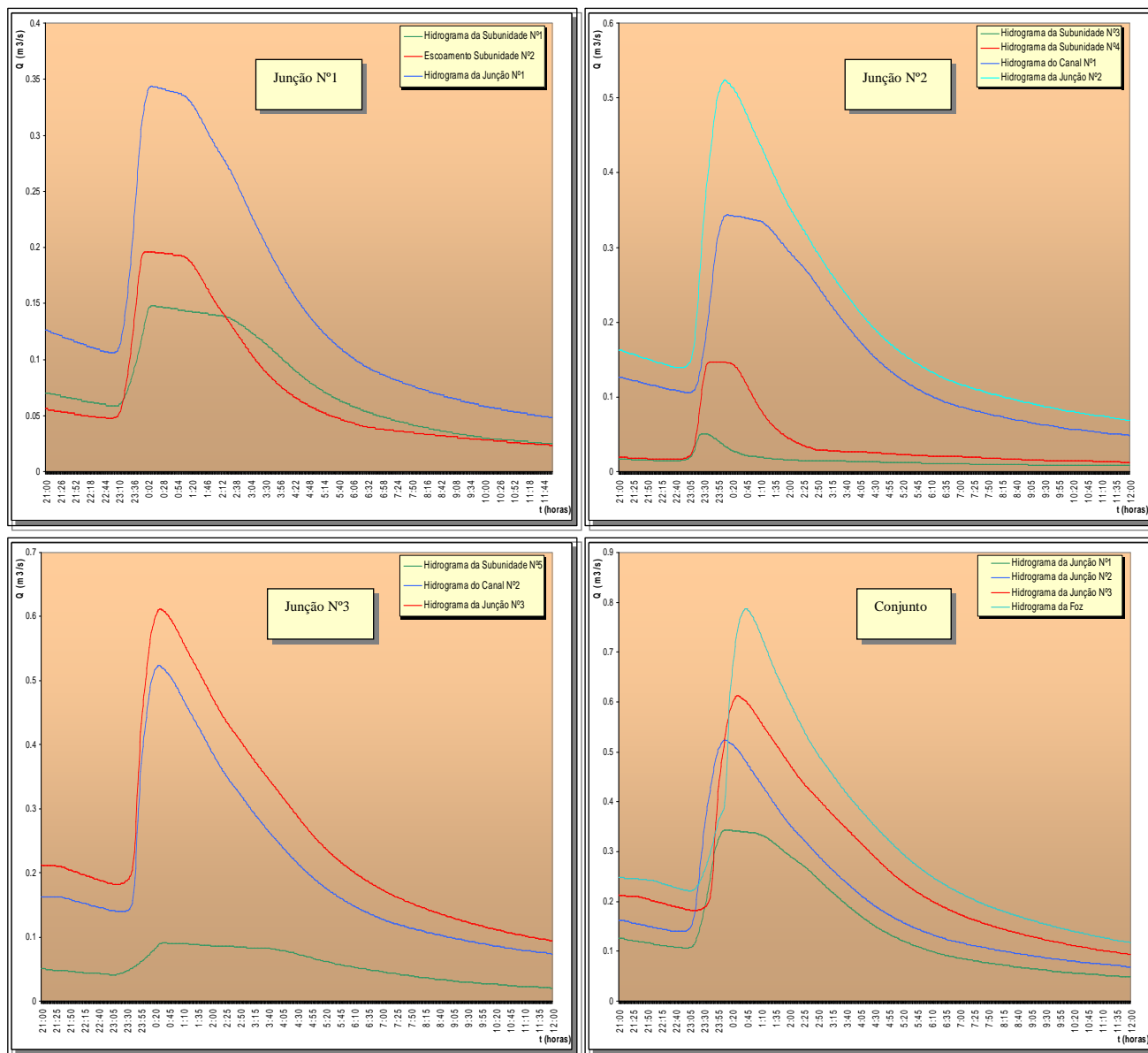


Figura 5.44 – Hidrogramas para as diferentes junções definidas para a bacia de Valadares, resultantes do evento de precipitação registado a 2 de Janeiro de 2008.

### 5.6.4.2 Resultados do Modelo Hidrológico de Projecto

Atendendo a que na sequência da análise hidrológica elaborada ao longo do presente trabalho se seguiria uma análise hidráulica, com vista à determinação das áreas inundáveis de cada uma das subunidades definidas, ou dimensionamento de obras de encaixe (albufeiras), ou mesmo o estudo de cenários de crise, os hidrogramas de projecto de maior relevância a esta serão os obtidos para as junções e foz da Ribeira de Valadares. Os valores de escoamento, e respectiva variação no tempo, nestes pontos, conjuntamente com um levantamento topográfico que possa enriquecer o MDT elaborado, permitiriam, então, a dita análise. Assim, e recorrendo ao modelo de bacia calibrado, apresenta-se na Figura 5.45 o conjunto dos hidrogramas de projecto obtidos, para um tempo de retorno de 100 anos e para os referidos pontos da rede de drenagem, bem como o respectivo hietograma de projecto que os originou.

As séries temporais de escoamento gerado pelo *software* HEC-HMS para as diferentes junções e foz da bacia de Valadares são apresentadas no Anexo F.

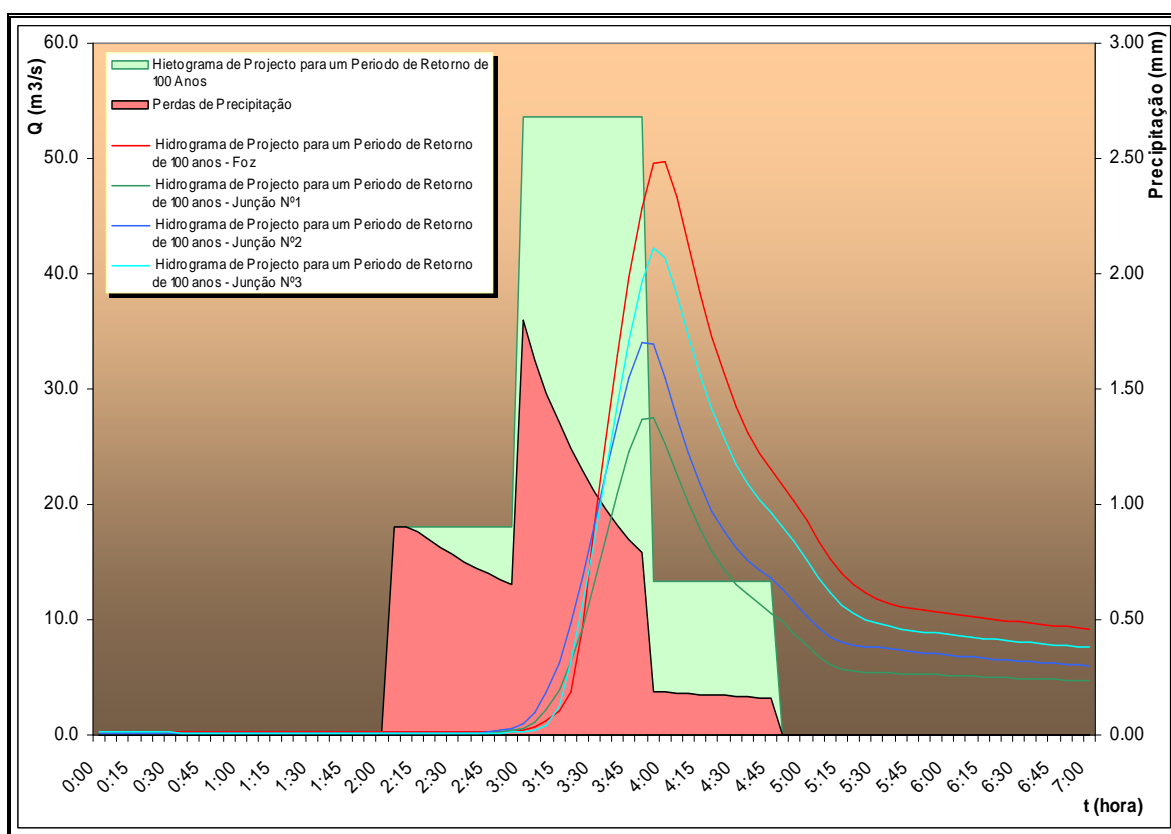


Figura 5.45 – Hidrograma e hietograma de projecto, para um período de retorno de 100 anos, para as Junções nº 1, 2, 3 e Foz da bacia de Valadares.

## **Capítulo 6**

### Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

O objectivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia capaz de explorar as potencialidades dos Sistemas de Informação Geográfica como instrumento de apoio à modelação hidrológica. Especificamente, este objectivo compreendeu o desenvolvimento de um modelo hidrológico para a bacia da Ribeira de Valadares, utilizando os programas ArcView, ArcGis, HEC-HMS e a extensão HEC-GeoHMS, como suas ferramentas de trabalho.

A bacia objecto de estudo apresentou como particularidade o facto de não se encontrar monitorizada. Assim, dada a ausência de dados quer de escoamento, quer de precipitação, e portanto na impossibilidade de recurso a uma extensa calibração, os procedimentos adoptados procuraram ser de natureza conceptual. Esta abordagem orientou o trabalho, inicialmente na elaboração de um modelo digital do terreno detalhado, procurando cartografia a uma escala suficientemente representativa, e mais tarde condicionando a escolha dos modelos matemáticos utilizados na simulação hidrológica, procurando-se assegurar que a sua parametrização fosse possível por via de informação digital georreferenciada adequada e disponível.

Ao longo da exposição teórica feita nos capítulos 2, 3 e 4, foi possível avaliar as possibilidades e as limitações inerentes à integração destes dois domínios de investigação (Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Hidrológica), tendo desta resultado a metodologia empregue no estudo da bacia de Valadares. Os resultados desta metodologia permitem concluir:

1. O MDT elaborado no programa ArcInfo, gerado a partir de cartografia à escala 1:2000 e originalmente no formato de dados TIN, demonstra uma boa representatividade do terreno. A sua conversão para um formato de dados *raster* reduz a riqueza da informação altimétrica que este encerra, tendo a rede de drenagem gerada evidenciado essa mesma lacuna, sobretudo para zonas do terreno planas.

2. A extensão HEC-GeoHMS constitui uma ferramenta efectiva de criação de bases de dados geográficos e de as migrar para o *software* HMS. Esta permitiu explorar o modelo digital elaborado, aplicando diferentes algoritmos em sucessão, e assim extrair informação fundamentalmente geométrica, ficando esta disponível no formato digital apropriado para a criação do modelo de bacia no programa HMS. Não obstante, como fica patente ao longo dos capítulos onde se aborda o processamento do terreno, os pressupostos a que atendem tais algoritmos não estão isentos de criar enviesamentos, resultando estes, na maioria dos casos, da utilização de dados do terreno em formato *raster*. Uma das lacunas do uso desta extensão passa, também, pela impossibilidade de gerar modelos meteorológicos dentro do SIG, com toda a vantagem de avaliação da distribuição espacial da precipitação.

3. Uma vez gerado o modelo de bacia no programa HMS, tendo este já disponíveis os dados geométricos relativos às subunidades hidrológicas consideradas e à respectiva rede de drenagem, tornou-se possível proceder à escolha dos modelos matemáticos que simulam cada uma das componentes do escoamento superficial dessas mesmas subunidades. A escolha feita pendeu, como referido, sobre modelos físicos, para os quais a sua parametrização pôde ser feita por recurso ao SIG. Embora a completa calibração do modelo hidrológico e respectiva validação estatística não

fossem objecto da presente dissertação, ela foi iniciada, tendo o modelo de bacia produzido resultados razoáveis. A aplicação de procedimentos idênticos por um período de tempo mais alargado certamente conduziria a um modelo hidrológico preciso, capaz de produzir resultados confiáveis para a ocorrência de um qualquer evento de precipitação. A existência de tal modelo permite não só a previsão de cenários hidrológicos futuros, como também o estudo das causas de situações passadas adversas, permitindo a tomada de medidas mitigadoras de uma forma atempada. A necessidade de um sistema de modelação desta natureza torna-se assim fundamental do ponto de vista do planeamento e gestão de bacias hidrográficas, abrangendo as suas potencialidades o alerta de cheias em tempo real, a avaliação de áreas de risco de cheia ou a programação de um orçamento baseado na disponibilidade de dado recurso hídrico, de acordo com a legislação em vigor.

De salientar que a determinação dos hidrogramas de projecto para o período de retorno de 100 anos funciona como condição prévia à modelação hidráulica que se deveria seguir à modelação hidrológica realizada. Nesta, além da utilização do dito hidrograma, recorrer-se-ia, de novo, ao modelo digital do terreno gerado e a sua metodologia envolveria novamente a interface com o SIG utilizado. O resultado final seria a aferição das zonas inundáveis para o evento extremo estudado hidrológicamente.

Como resultado do trabalho desenvolvido apresentam-se alguns desenvolvimentos futuros que se entendem oportunos, particularmente na aplicação da metodologia desenvolvida a bacias hidrográficas de maiores dimensões, para as quais se pressupõem a existência do registo de dados de escoamento e de precipitação:

1. A utilização do MDT em formato de dados *raster* mormente a simplificação de análise que introduz no desenrolar da metodologia é igualmente responsável por algumas das suas limitações. Com o recente desenvolvimento de algoritmos capazes de realizar a análise do terreno, conducente à individualização de sub-bacias hidrográficas, respectiva rede de drenagem e extracção de parâmetros mensuráveis destes elementos, em modelos de dados TIN, a sua implementação e utilização no software *ArCInfo* traria benefícios na precisão da análise efectuada, de que são exemplos a definição de redes de drenagem não dendríticas e a devida interpretação das zonas mais planas do terreno.

2. Embora, dada a dimensão da bacia hidrográfica estudada, a questão da utilização de um modelo de bacia distribuído não se tenha colocado, a sua aplicação é de todo desejável. No caso das subunidades hidrológicas definidas atingirem um valor de área apreciável, o método de ponderação, muitas das vezes aplicado à estima de parâmetros dos modelos matemáticos integrantes do modelo de bacia, deixaria de reflectir a variabilidade inerente às diferentes envolvências paisagistas de uma bacia hidrográfica. Num modelo distribuído, definindo uma área para a quadrícula a utilizar, seria possível fazer uma caracterização detalhada para cada um dos modelos matemáticos a utilizar e assim procurar um modelo de bacia o mais conceptual possível, tirando, inerentemente, um maior partido dos SIG.

3. No que concerne à escolha dos modelos de perdas de precipitação também se entende que o uso de um modelo capaz de simular em contínuo estas perdas seria um melhoramento

a introduzir. Foi possível verificar que no modelo de bacia gerado para a bacia de Valadares o principal parâmetro sujeito a correcção aquando da calibração foi o da abstracção inicial. O modelo utilizado para este efeito, modelo de perdas do SCS, como modelo empírico, compreende nesta sua parcela as perdas por intercepção, infiltração, evapotranspiração e retenção superficial. Seria benéfico que cada uma destas componentes fosse modelada por si mesmo, sendo que os modelos de perdas contínuos o permitem. No passado estes modelos eram unicamente utilizados para gerar séries temporais de escoamentos médios diários, apresentando como principal lacuna o facto de não responderem adequadamente a eventos de precipitação, em particular se estes forem extremos. Assim, a sua utilização em análises de cheias era descartada. Não obstante, modelos de perdas contínuos mais recentes, por uma adequada parametrização, são hoje capazes de dar essa resposta. A intervenção dos SIG no seu ajuste afirma-se como preponderante.

4. No seguimento do ponto 3, a evapotranspiração constitui um dos parâmetros tradicionalmente de difícil avaliação, particularmente dada a sua importância na inferência de escoamentos médio em período de estiagem. O recurso à detecção remota, pela análise de imagens de satélite na zona do infra-vermelho próximo, correspondentes algoritmos de tradução em valores de evapotranspiração e sua integração em ambiente SIG, permitiriam esse desenvolvimento.

5. Finalmente, a utilização de dados de precipitação provenientes de radar, estando alguns em funcionamento no nosso país, e a sua análise em SIG, permitiriam ultrapassar a assunção, feita para a generalidade dos modelos hidrológicos, de que a precipitação ocorre uniformemente distribuída sobre a totalidade da bacia hidrográfica, ou numa secção desta. Embora existam para bacias de maior dimensão várias estações udométricas, cuja informação é de domínio público, o seu registo é normalmente diário e permite, na melhor das hipóteses, a ponderação para determinada área desses mesmos valores de precipitação. No caso da análise de cheias, particularmente em tempo real, esta informação é insuficiente, sendo o método proposto uma forma bastante eficiente e não onerosa de atalhar à dificuldade.

O desenvolvimento dos pontos supracitados e uma programação informática capaz de em tempo real integrar os resultados gerados permitiria o estabelecimento de um modelo de previsão de cheias capaz, bem como um modelo de produção de valores médios de escoamento, úteis em análises de qualidade, constituindo assim uma eficiente ferramenta de planeamento.

## **Bibliografia**

Aranoff, S., 1989. *Geographic information systems: a management perspective*. WDL Publications, Ottawa, Canada.

Band, L. E., 1986. *Topographic partition of watersheds with digital elevation models*. Water Resources Research, Vol. 22, pp. 15-24.

Baron, K., Aldstadt, J., 2006. *An ArcGIS application of special statistics to precipitation modelling*. ESRI Publ. N° 206.

Berry, K., 1993. *Cartographic modelling: the analytical capabilities of GIS*. "Environmental Modelling with GIS", Googchild, B. O., Parks, L. T. Oxford University Press, pp. 58-74.

Boroughs, C. B., Zagona, E., 2001. *Daily flow routing with the Muskingum-Cunge method in the Pecos River riverware model*. Journal of Hydrology, Vol. 348, pp. 21-32.

Brandão, C. e Rodrigues, R., 1998. *Precipitações intensas em Portugal Continental para períodos de retorno até 1000 anos*. DSRH – Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, Instituto da Água, Lisboa.

Brandão, C. e Rodrigues, R., e Costa, J. P., 2001. *Análise de fenómenos extremos. Precipitações intensas em Portugal Continental*. DSRH – Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, Instituto da Água, Lisboa.

Calçada, M. C., Portela, M. M., Matos, J., 2002. *Análise de cheias e delimitação de zonas inundáveis em Timor-Leste: abordagem por modelação geográfica*. 7º Congresso da Água, Lisboa.

Chow, V. T., Maidment, D. R. e Mays, L. W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Student Edition, Singapura.

Correia, F. N., 1984 a. *Proposta de um método para a determinação de caudais de cheia em pequenas bacias naturais e urbanas*. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Informação Técnica, Hidráulica. ITH 6, Lisboa.

Correia, F. N., 1984 b. *Alguns procedimentos adoptados pelo Soil Conservation Service para o estudo do impacto da urbanização nos caudais de cheia*. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Informação Técnica, Hidráulica, ITH 7, Lisboa.

Correia, F. N., Rego, F. C., Saraiva, M. G., Ramos, I., 1998. *Coupling GIS with hydrologic and hydraulic flood modelling*. Water Resources Management, Vol. 12, pp. 229-249. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Djokic, D., Ye, Z., Miller, A., 1997. *Efficient watershed delineation using ArcView and Spatial analyst*. Proc., 17<sup>th</sup> Int. ESRI User Conf., Environmental Systems Research Institute, San Diego, California.

Dugger, A. L., 1997. *Linking GIS with the Hydrologic Modeling System: an investigation of the Midwest flood of 1993*. Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Engineering, University of Texas, Austin.

Dozier, J, 1992. *Opportunities to improve hydrologic data*. Reviews of Geophysics, Vol. 30, Issue N° 4, pp. 315-331.

Duarte, F, Gomes, B., Pereira, A., 2005. *Proposta de optimização da ocupação do solo para a região da bacia do Guadiana para o ano 2050*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Ferdinand, L. and Maidment, D.R., 1999. *Definition and connection of hydrologic elements using geographic data*. Journal of Hydrologic Engineering, Vol. January, pp. 10-18.

Fleming, M., Neary, V., 2004. *Continuous hydrologic modelling study with the Hydrologic Modeling System*. Journal of Hydrologic Engineering, Vol.9, N° 3, pp. 175-183.

Gangodagamage, C., 2001. *Hydrological modelling using remote sensing and GIS*. 22<sup>nd</sup> Asian Conference on Remote Sensing, Singapore.

Garbrecht, J., Martz, J., 1993. *Impact of digital elevation model grid size on extracted drainage parameters*. Engineering Hydrology, ASCE – American Society of Civil Engineering, Hydraulic Division, San Francisco, pp. 689-694.

Granado, I. T., 1996. *Comparação de metodologias de geração de modelos digitais do terreno*. Dissertação de Mestrado em Mineralogia e Planeamento, IST – Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Goodchild, M.F., 2005. *Geographic information systems*. An Electronic Journal of Geography and Mathematics, Vol.14.

Godinho, S. F., 1984. *Valores máximos anuais da quantidade da precipitação. Estimativa dos valores relativos a durações inferiores a 24 horas*. Nota Técnica de Meteorologia e Geofísica. Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, N° 2012, Divisão de Hidrometeorologia, Lisboa.

Grayson, R.B.; Moore, I.D.; McMahon, T.A 1992. *Physically based hydrologic modeling: a terrain based model for investigative purposes*. Water Resources Research, Vol. 28, Issue N° 10, pp. 2639-2658.

HEC, 1993. *Introduction and application of kinematic wave routing techniques using HEC-1*. Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers, Davis, EUA. Approved for Public Release – Distribution Unlimited TD-10.

HEC, 2000 a. *HEC-GeoHMS User's Manual*. Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers, Davis, EUA. Approved for Public Release – Distribution Unlimited CPD-77.

HEC, 2000 b. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers, Davis, EUA. Approved for Public Release – Distribution Unlimited CPD-74B.

Henriques, R. G., 1996. *Os sistemas de Informação Geográfica e a modelação hidrológica no domínio das águas superficiais*. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Teses e Programas de Investigação, Lisboa.

Hilderbrand, P. H., Towery, N., Snell, M. R., 1979. *Measurement of convective mean rainfall over small areas using high-density raingages and radar*. American Meteorological Society, Vol. 18, pp. 1316-1326.

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

Hipólito, J. R. e Simões, A. M. A., 2001. *Modelos Raster de escoamento superficial em bacias hidrográficas*. IST – Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Hipólito, J. R. e Portela, M. M., 2004. *Modelos hidrológicos distribuídos utilizando modelos digitais do relevo do tipo Raster e do tipo TIN*. III Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Maputo.

Horton, R. E., 1933. *The role of infiltration in the hydrologic cycle*. Transactions American Geophysical Union, Vol. 14, pp. 446-460.

Jenson, S. K., Domingue, J. O., 1988. *Automated derivation of hydrologic basin characteristics from digital elevation data*. Auto Carto 7 Proceedings, Digital Representations of Spatial Knowledge, Washington, pp. 301-310.

Kafle, T.P., Hazarika, M.K., Karki, S., Ssherstha, R. M., Sharma, R., Samarakoon, L., 2002. *Basin scale rainfall-runoff modeling for flood forecasts*. Journal of Environmental Management, Vol. 33, pp. 102-117.

Koka, S., 2004. *Integration of stream and watershed data for hydrologic modelling*. Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Science, Office of Graduate Studies of Texas A&M University, Austin.

Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K., Maidment, D R., 2004. *Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River basin summer 2002 storm event*. Journal of Environmental Management, Vol. 75, pp. 325-336.

Lighthill, M. J. and Whitham, G. B., 1955. *On kinematic waves:1. Flood movement in long rivers*. Proceedings, Royal Society, London, Series A, Vol. 229, pp. 281-348.

Lencastre, A. e Franco, F. M., 1984. *Lições de hidrologia*. Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.

Macedo, M. E. Z., 1996. *Aplicação do radar meteorológico na previsão de cheias*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências de Lisboa, Lisboa.

Maidment, D. R., 1993. *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc., USA.

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

Martins, J. P., Castro, P. R., 1997. *Metodologias para planeamento de recursos hídricos com um Sistema de Informação Geográfica: o modelo HIDROGIS-3D*. Recursos Hídricos, Vol.18, pp. 3-16.

Matias, P. G., 1989. *Análise da influência da variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada nos processos de infiltração e escoamento numa pequena bacia*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.

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

Matos, M. R., Silva, M. H., 1986. *Estudos de precipitação com aplicação no projecto de sistemas de drenagem pluvial. Curvas intensidade-duração-frequência da precipitação em Portugal*. Encontro Nacional de Saneamento Básico/86, LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Mello, F. C. M., 1987. *Um modelo de simulação contínua para conversão da precipitação em escoamento*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Évora, Évora.

Merkel, W. H., 2002. *Muskingum-Cunge flood routing procedure in NRCS hydrologic models*. Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conferences.

O'Callaghan, J. F., Mark, D. M., 1984. *The extraction of drainage networks from digital elevation data*. Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol 28, pp. 323-344.

Oliveira, M. M. e Ferreira J. P., 2001. *Proposta de uma metodologia para a definição de áreas de infiltração máxima*. 5º Congresso da Água, Lisboa.

Oliveira, F., 2001. *Extracting hydrologic information from spatial data for HMS modelling*. Journal of Hydrologic Engineering, Nov/Dec, pp. 524-530.

Paulo, C. G., 1998. *Os SIG e a modelação hidrológica na produção de cartografia das áreas de risco de cheia*. Tese de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Peucker, T. K., Douglas, D. H., 1975. *Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data*. Computer Vision, Graphics and Image Processing , Vol. 4, pp. 375-387.

Ponce, V. M., 1989. *Engineering Hydrology. Principles and practices*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

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

Portela, M. M., Marques, P. e Carvalho, F. F., 2000 a. *Hietogramas de projecto para análise de cheias baseada no modelo do hidrograma unitário do Soil Conservation Service (SCS)*. 5º Congresso da Água, Lisboa.

Portela, M. M., Silva, A. T. e Melim, C. P., 2000 b. *O efeito da ocupação urbana nos caudais de ponta de cheias naturais em pequenas bacias hidrográficas*. 5º Congresso da Água, Lisboa.

Portela, M. M., 2005. *Precipitações intensas em Portugal Continental. Estimação para durações inferiores ao dia*. III Jornadas de Recursos Hídricos: Situações hidrológicas extremas. CCDR – Alentejo, Évora.

Portela, M. M., 2006 a. *Modelação Hidrológica*. Textos de apoio à disciplina de Modelação Hidrológica, IST – Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Portela, M. M., 2006 b. *Estimação de precipitações intensas em bacias hidrográficas de Portugal Continental*. Recursos Hídricos, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa.

Quintela, A. C., 1967. *Recursos de águas superficiais em Portugal Continental*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Quintela, A. C., 1996. *Hidrologia e Recursos Hídricos*. Folhas de apoio à disciplina de Hidrologia e Recursos Hídricos, Associação de Estudantes do Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Quintela, A. C. e Portela, M. M., 2000. *A modelação hidrológica em Portugal nos últimos 25 anos do século XX, nas perspectivas determinística, probabilística e estocástica*. Recursos Hídricos, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa.

Radwan, M., Willems, P., Berlamont, J., 2000. *Lumped conceptual hydrological modelling in combination with GIS for integrated watershed management*. Watershed Management, ASCE – American Society of Civil Engineering, Hydraulic Division, San Fransisco, pp. 1-10.

Ribeiro, A. A., 1987, *Hidrologia. Águas superficiais*. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Laboratório de Hidráulica, Porto.

Segurado, P. e Jesus, B., 2002. *Aplicação de sistemas de informação geográfica nas diferentes fases de um estudo ecológico*. Centro de Ecologia Aplicada, Universidade de Évora, Évora.

Silva, M. M. P., 1996. *Modelo distribuído de simulação do escoamento superficial*. Dissertação de Doutoramento, IST – Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Singh, V. P., 2001. *Kinematic wave modelling in water resources: a historical perspective*. Hydrological Processes, John Wiley & Sons, Vol. 15, pp. 671-706.

Singh, V. P., 2004. *Kinematic Wave Modeling in Hydrology*. World Water Congress 2003, ASCE - American Society of Civil Engineering, Hydraulic Division, San Fransisco.

Soil Conservation Service, 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*, Technical Release nº. 55 (TR-55), Hydrology, U. S. Dept. of Agriculture, disponível a partir de U. S. Government Printing Office, Washington, D. C.

Springer, E. P., B. J. McGurk, R. H. Hawkins e G. B. Coltharp, 1980. *Curve number for watershed data*. Symposium on Watershed Management. ASCE - American Society of Civil Engineering, Hydraulic Division, San Fransisco.

Tucci, C. E. M., 1993. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Editora da Universidade, ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Portalegre, Brasil.

United States Department of Agriculture, 1951. *Soil Survey Manual #18*, Washington, DC.

Valente, F., David, J. S., GASH, J. H. C., 1997. *Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models*. Journal of Hydrology, Vol. 190, pp. 141-162.

Warwick, J. J., Hanes, S. J., 1994. *Efficacy of ARC/INFO GIS application to hydrologic modelling*. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 120, Nº 3, pp. 366-381.

Xu, Z. X., Ito, K., Schultz, G. A., Li, J. Y., 2001. *Integrated hydrologic modelling and GIS in water resources management*. Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. July pp. 217-223.

Xu, A., 2006. *A new curve number calculation approach using GIS technology*. ESRI 26<sup>th</sup> International User Conference.

Yang, X. and Rystedt, B., 2001. *Predicting flood inundation and risk using GIS and hydrodynamic Model: a case study at Eskilstuna, Sweden*. Indian Cartographer, Vol. 23, pp. 183-191.

## **Anexos**

**Anexo A** – Valores do coeficiente de rugosidade do modelo da onda cinemática ( $N$ ) para diferentes tipos de superfícies (Adaptado de HEC, 1993).

Tipo de superfície	Valores do Coeficiente $N$	
Asfalto/Betão	0.05	0.15
Solo Sedimentar livre de Rochas	0.1	
Baldios sem resíduos	0.008	0.012
Campos cultivados sem entulho	0.06	0.12
Campos cultivados com entulho	0.16	0.22
Terrenos lavrados sem entulho	0.06	0.12
Terrenos lavrados com entulho	0.1	0.16
Terreno não cultivado, não lavrado	0.04	0.1
Vegetação dispersa	0.053	0.13
Vegetação arbustiva baixa (tipo relva)	0.1	0.2
Vegetação arbustiva baixa (tipo relva) e pobre, em terreno árido	0.3	
Superfície nua	0.35	
Vegetação arbustiva densa e solos florestais	0.4	

**Anexo B** – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) para canais a céu aberto  
 (Adaptado de Chow, 1988).

Tipos e Materiais de Canais	Condições dos Canais	Valores do Coeficiente de Rugosidade ( $n$ )			
		Ótimos	Bons	Razoáveis	Maus
<u>Canais a Céu Aberto</u>					
Alvenaria de Pedra			0.014	0.017	
Alvenaria de Tijolo		0.012	0.014	0.016	0.018
Betão	Alinhamentos rectos		0.013	0.014	
Betão	Curvas		0.015	0.017	
Rocha	Escavação cuidada		0.03	0.035	
Rocha	Escavação grosseira		0.035	0.04	
Solo-Cimento			0.02	0.025	
Terra	Condições normais		0.02	0.025	
Terra	Pequenos canais		0.025	0.03	

**Anexo C – Valores do número de escoamento (CN) para zonas urbanas, suburbanas e rurais**  
 (Extraído de Correia, 1984).

UTILIZAÇÃO OU COBERTURA DO SOLO	TIPO DE SOLO				UTILIZAÇÃO OU COBERTURA DO SOLO	CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE	TIPO DE SOLO			
	A	B	C	D			A	B	C	D
	Zonas Cultivadas: Sem medidas de conservação do solo Com medidas de conservação do solo	72	81	88			91	Solo lavrado	segundo o maior declive	77
Pastagens ou Bairios: Em más condições Em boas condições	62	71	78	81	Culturas arvenses	segundo as curvas de nível e em terrços	62	74	82	85
Praças em boas condições	68	79	86	89	Notações de cultura	segundo as curvas de nível	60	71	79	82
Bosques ou Zonas Florestais: Cobertura má, sem "Mulch" Boa cobertura	39	61	74	80		segundo o maior declive	62	75	83	87
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cimiterios, etc. Boas condições: Relva cobrindo mais de 75% da área Condições razoáveis: Relva cobrindo de 50 a 75% da área	30	58	71	78		segundo as curvas de nível	50	72	81	84
Zonas comerciais e de escritórios (75% de área impermeável)	45	66	77	83	Pastagens	segundo as curvas de nível e em terrços	57	70	78	82
Zonas Industriais (75% de área impermeável)	25	55	70	77		pobre	68	79	86	89
Zonas Residuais: Áreas médias dos lotes Percentagem média impermeável	39	61	74	80		normal	49	69	79	84
< 500 m <sup>2</sup> 65 %	80	92	96	99		boa	39	61	74	80
1 000 m <sup>2</sup> 38 %	81	88	91	93		pobre, segundo as curvas de nível	47	67	81	88
1 300 m <sup>2</sup> 30 %						normal, segundo as curvas de nível	25	59	75	83
2 000 m <sup>2</sup> 25 %						boa, segundo as curvas de nível	6	35	70	79
4 000 m <sup>2</sup> 20 %						normal	30	58	71	78
Parques de Estacionamento, telhados, viadutos, etc.	77	85	90	92		normal	59	74	82	86
Arruamentos e Estradas: Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	61	75	83	87		pavimento permeável	72	82	87	89
Gravilho	57	72	81	86		pavimento impermeável	74	84	90	92
Terra	59	70	80	85		muito abertas ou de baixa transpiração	56	75	86	91
	31	68	79	84		abertas ou de baixa transpiração	46	68	78	84
	58	68	78	83		normal	36	60	70	76
	76	85	89	91		densas ou de alta transpiração	26	52	62	69
	72	82	87	89		muito densas ou de alta transpiração	15	44	54	61
						Superfície impermeável	100	100	100	100

**Anexo D – Valores de escoamento observados e simulados, previamente e após calibração, para o evento de precipitação registado a 2 de Janeiro de 2008 na foz da bacia de Valadares.**

Hora	Precipitação Registada (mm)	Escoamento Observado (m <sup>3</sup> /s)	Escoamento simulado prévio a calibração (m <sup>3</sup> /s)	Escoamento simulado Após Calibração (m <sup>3</sup> /s)	Hora	Precipitação Registada (mm)	Escoamento Observado (m <sup>3</sup> /s)	Escoamento simulado prévio a calibração (m <sup>3</sup> /s)	Escoamento simulado Após Calibração (m <sup>3</sup> /s)
21:00	0	0	0,006	0,248	22:31	0,03	0,255	0,005	0,231
21:01	0,02	0	0,006	0,248	22:32	0,03	0,265	0,005	0,231
21:02	0,02	0	0,006	0,248	22:33	0,03	0,243	0,005	0,23
21:03	0,02	0	0,006	0,248	22:34	0,03	0,249	0,005	0,23
21:04	0,02	0	0,006	0,248	22:35	0,03	0,269	0,005	0,23
21:05	0,02	0	0,006	0,248	22:36	0,03	0,263	0,005	0,229
21:06	0,02	0	0,006	0,248	22:37	0,03	0,259	0,005	0,229
21:07	0,02	0	0,006	0,248	22:38	0,03	0,259	0,005	0,229
21:08	0,02	0	0,006	0,248	22:39	0,03	0,26	0,005	0,228
21:09	0,02	0	0,006	0,248	22:40	0,03	0,253	0,005	0,228
21:10	0,02	0	0,006	0,247	22:41	0,03	0,26	0,005	0,228
21:11	0,02	0	0,006	0,247	22:42	0,03	0,282	0,005	0,227
21:12	0,02	0	0,006	0,247	22:43	0,03	0,262	0,005	0,227
21:13	0,02	0	0,006	0,247	22:44	0,03	0,274	0,005	0,227
21:14	0,02	0	0,006	0,247	22:45	0,03	0,268	0,005	0,226
21:15	0,02	0	0,006	0,247	22:46	0,03	0,249	0,005	0,226
21:16	0,02	0	0,006	0,247	22:47	0,03	0,236	0,005	0,226
21:17	0,02	0	0,006	0,247	22:48	0,03	0,246	0,005	0,225
21:18	0,02	0	0,006	0,247	22:49	0,03	0,247	0,005	0,225
21:19	0,02	0	0,006	0,247	22:50	0,03	0,252	0,005	0,225
21:20	0,02	0	0,006	0,247	22:51	0,03	0,254	0,005	0,224
21:21	0,02	0	0,006	0,247	22:52	0,03	0,249	0,005	0,224
21:22	0,02	0,237	0,006	0,247	22:53	0,03	0,266	0,005	0,224
21:23	0,02	0,241	0,006	0,247	22:54	0,03	0,251	0,005	0,223
21:24	0,02	0,25	0,006	0,247	22:55	0,03	0,251	0,005	0,223
21:25	0,02	0,252	0,006	0,247	22:56	0,03	0,245	0,005	0,223
21:26	0,02	0,248	0,006	0,247	22:57	0,03	0,271	0,005	0,223
21:27	0,02	0,229	0,006	0,246	22:58	0,03	0,255	0,005	0,222
21:28	0,02	0,238	0,006	0,246	22:59	0,03	0,239	0,005	0,222
21:29	0,02	0,256	0,006	0,246	23:00	0,2	0,254	0,005	0,222
21:30	0,01	0,262	0,006	0,246	23:01	0,2	0,253	0,005	0,222
21:31	0,01	0,245	0,006	0,246	23:02	0,2	0,247	0,005	0,221
21:32	0,01	0,258	0,006	0,246	23:03	0,2	0,258	0,005	0,221
21:33	0,01	0,253	0,006	0,246	23:04	0,2	0,253	0,005	0,221
21:34	0,01	0,254	0,006	0,246	23:05	0,2	0,25	0,005	0,221
21:35	0,01	0,246	0,006	0,245	23:06	0,2	0,243	0,005	0,221
21:36	0,01	0,244	0,006	0,245	23:07	0,2	0,244	0,005	0,221
21:37	0,01	0,241	0,006	0,245	23:08	0,2	0,233	0,005	0,221
21:38	0,01	0,235	0,006	0,245	23:09	0,2	0,264	0,005	0,222
21:39	0,01	0,238	0,006	0,245	23:10	0,2	0,261	0,005	0,222
21:40	0,01	0,237	0,006	0,245	23:11	0,2	0,266	0,005	0,222
21:41	0,01	0,239	0,006	0,245	23:12	0,2	0,244	0,005	0,223
21:42	0,01	0,242	0,006	0,244	23:13	0,2	0,247	0,005	0,224
21:43	0,01	0,246	0,006	0,244	23:14	0,2	0,265	0,006	0,225
21:44	0,01	0,241	0,006	0,244	23:15	0,2	0,231	0,006	0,226
21:45	0,01	0,255	0,006	0,244	23:16	0	0,234	0,006	0,227
21:46	0,01	0,258	0,006	0,244	23:17	0	0,238	0,006	0,229
21:47	0,01	0,256	0,006	0,244	23:18	0	0,244	0,006	0,231
21:48	0,01	0,244	0,006	0,244	23:19	0	0,286	0,006	0,232
21:49	0,01	0,246	0,006	0,244	23:20	0	0,285	0,006	0,234
21:50	0,01	0,238	0,006	0,243	23:21	0	0,281	0,006	0,236
21:51	0,01	0,232	0,006	0,243	23:22	0	0,268	0,006	0,238
21:52	0,01	0,229	0,006	0,243	23:23	0	0,273	0,007	0,24
21:53	0,01	0,228	0,006	0,243	23:24	0	0,268	0,007	0,243
21:54	0,01	0,235	0,006	0,243	23:25	0	0,265	0,007	0,245
21:55	0,01	0,232	0,006	0,243	23:26	0	0,265	0,007	0,248
21:56	0,01	0,233	0,006	0,243	23:27	0	0,27	0,007	0,25
21:57	0,01	0,254	0,006	0,243	23:28	0	0,251	0,007	0,253
21:58	0,01	0,251	0,006	0,242	23:29	0	0,258	0,008	0,256
21:59	0,01	0,244	0,006	0,242	23:30	0	0,243	0,008	0,258
22:00	0,1	0,246	0,006	0,242	23:31	0	0,248	0,008	0,261
22:01	0,1	0,247	0,006	0,242	23:32	0	0,257	0,008	0,264
22:02	0,1	0,235	0,006	0,241	23:33	0	0,244	0,008	0,268
22:03	0,1	0,239	0,006	0,241	23:34	0	0,253	0,009	0,271
22:04	0,1	0,248	0,006	0,241	23:35	0	0,287	0,009	0,274
22:05	0,1	0,25	0,006	0,24	23:36	0	0,278	0,009	0,278
22:06	0,1	0,224	0,006	0,24	23:37	0	0,286	0,009	0,281
22:07	0,1	0,228	0,006	0,24	23:38	0	0,241	0,01	0,285
22:08	0,1	0,242	0,006	0,239	23:39	0	0,276	0,01	0,289
22:09	0,1	0,24	0,006	0,239	23:40	0	0,273	0,01	0,292
22:10	0,1	0,25	0,006	0,239	23:41	0	0,288	0,01	0,296
22:11	0,1	0,252	0,006	0,238	23:42	0	0,293	0,011	0,3
22:12	0,1	0,248	0,006	0,238	23:43	0	0,315	0,011	0,305
22:13	0,1	0,254	0,006	0,237	23:44	0	0,294	0,011	0,309
22:14	0,1	0,253	0,006	0,237	23:45	0	0,307	0,012	0,313
22:15	0,1	0,25	0,006	0,237	23:46	0	0,303	0,012	0,318
22:16	0,1	0,258	0,006	0,236	23:47	0	0,279	0,012	0,322
22:17	0,1	0,254	0,006	0,236	23:48	0	0,292	0,013	0,327
22:18	0,1	0,248	0,005	0,236	23:49	0	0,295	0,013	0,332
22:19	0,1	0,259	0,005	0,235	23:50	0	0,314	0,013	0,337
22:20	0,1	0,24	0,005	0,235	23:51	0	0,3	0,014	0,342
22:21	0,1	0,241	0,005	0,235	23:52	0	0,312	0,014	0,347
22:22	0,1	0,248	0,005	0,234	23:53	0	0,357	0,014	0,351
22:23	0,1	0,25	0,005	0,234	23:54	0	0,327	0,015	0,356
22:24	0,1	0,248	0,005	0,233	23:55	0	0,323	0,015	0,36
22:25	0,1	0,246	0,005	0,233	23:56	0	0,328	0,015	0,363
22:26	0,1	0,24	0,005	0,233	23:57	0	0,325	0,016	0,366
22:27	0,1	0,253	0,005	0,232	23:58	0	0,365	0,016	0,369
22:28	0,1	0,241	0,005	0,232	23:59	0	0,361	0,016	0,371
22:29	0,1	0,255	0,005	0,232	0,00	0	0,357	0,017	0,373
22:30	0,03	0,26	0,005	0,231	0,01	0	0,351	0,017	0,375

Hora	Precipitação Registrada (mm)	Escoamento Observado (m3/s)	Escoamento simulado prévio a calibração (m3/s)	Escoamento simulado Após Calibração (m3/s)	Hora	Precipitação Registrada (mm)	Escoamento Observado (m3/s)	Escoamento simulado prévio a calibração (m3/s)	Escoamento simulado Após Calibração (m3/s)
0:02	0	0,343	0,018	0,377	1:33	0	0,613	0,104	0,668
0:03	0	0,38	0,018	0,38	1:34	0	0,624	0,104	0,666
0:04	0	0,359	0,018	0,383	1:35	0	0,642	0,104	0,663
0:05	0	0,335	0,019	0,386	1:36	0	0,631	0,104	0,66
0:06	0	0,366	0,019	0,392	1:37	0	0,622	0,104	0,658
0:07	0	0,367	0,02	0,399	1:38	0	0,59	0,103	0,655
0:08	0	0,383	0,02	0,411	1:39	0	0,584	0,103	0,652
0:09	0	0,38	0,021	0,429	1:40	0	0,575	0,103	0,65
0:10	0	0,384	0,021	0,454	1:41	0	0,579	0,103	0,647
0:11	0	0,37	0,021	0,488	1:42	0	0,568	0,102	0,645
0:12	0	0,354	0,022	0,525	1:43	0	0,544	0,102	0,642
0:13	0	0,349	0,022	0,557	1:44	0	0,548	0,102	0,64
0:14	0	0,362	0,023	0,583	1:45	0	0,541	0,102	0,637
0:15	0	0,351	0,023	0,604	1:46	0	0,539	0,101	0,635
0:16	0	0,383	0,024	0,62	1:47	0	0,544	0,101	0,632
0:17	0	0,375	0,024	0,633	1:48	0	0,554	0,101	0,63
0:18	0	0,358	0,025	0,644	1:49	0	0,553	0,101	0,628
0:19	0	0,389	0,025	0,654	1:50	0	0,549	0,101	0,625
0:20	0	0,394	0,026	0,664	1:51	0	0,547	0,1	0,623
0:21	0	0,401	0,026	0,673	1:52	0	0,551	0,1	0,62
0:22	0	0,428	0,027	0,683	1:53	0	0,546	0,1	0,618
0:23	0	0,453	0,027	0,692	1:54	0	0,547	0,1	0,616
0:24	0	0,57	0,028	0,703	1:55	0	0,542	0,099	0,613
0:25	0	0,551	0,028	0,712	1:56	0	0,544	0,099	0,611
0:26	0	0,572	0,029	0,721	1:57	0	0,539	0,099	0,608
0:27	0	0,557	0,029	0,729	1:58	0	0,542	0,099	0,606
0:28	0	0,567	0,03	0,737	1:59	0	0,541	0,099	0,604
0:29	0	0,557	0,03	0,744	2:00	0	0,538	0,098	0,601
0:30	0	0,564	0,031	0,751	2:01	0	0,536	0,098	0,599
0:31	0	0,566	0,031	0,756	2:02	0	0,54	0,098	0,597
0:32	0	0,544	0,032	0,761	2:03	0	0,534	0,098	0,594
0:33	0	0,572	0,032	0,765	2:04	0	0,538	0,097	0,592
0:34	0	0,603	0,033	0,769	2:05	0	0,533	0,097	0,589
0:35	0	0,615	0,033	0,772	2:06	0	0,533	0,097	0,587
0:36	0	0,618	0,034	0,775	2:07	0	0,528	0,097	0,585
0:37	0	0,632	0,034	0,778	2:08	0	0,525	0,096	0,582
0:38	0	0,648	0,035	0,78	2:09	0	0,532	0,096	0,58
0:39	0	0,701	0,036	0,782	2:10	0	0,542	0,096	0,578
0:40	0	0,731	0,036	0,784	2:11	0	0,531	0,096	0,576
0:41	0	0,782	0,037	0,785	2:12	0	0,535	0,096	0,573
0:42	0	0,745	0,037	0,786	2:13	0	0,54	0,095	0,571
0:43	0	0,752	0,038	0,787	2:14	0	0,548	0,095	0,569
0:44	0	0,744	0,038	0,787	2:15	0	0,532	0,095	0,566
0:45	0	0,728	0,038	0,787	2:16	0	0,537	0,095	0,564
0:46	0	0,734	0,039	0,786	2:17	0	0,54	0,094	0,562
0:47	0	0,735	0,039	0,785	2:18	0	0,539	0,094	0,56
0:48	0	0,722	0,039	0,784	2:19	0	0,552	0,094	0,557
0:49	0	0,719	0,039	0,783	2:20	0	0,554	0,094	0,555
0:50	0	0,732	0,039	0,781	2:21	0	0,558	0,094	0,553
0:51	0	0,741	0,039	0,78	2:22	0	0,552	0,093	0,551
0:52	0	0,742	0,039	0,778	2:23	0	0,549	0,093	0,549
0:53	0	0,736	0,039	0,776	2:24	0	0,542	0,093	0,546
0:54	0	0,744	0,039	0,774	2:25	0	0,537	0,093	0,544
0:55	0	0,728	0,039	0,772	2:26	0	0,542	0,093	0,542
0:56	0	0,734	0,039	0,77	2:27	0	0,539	0,092	0,54
0:57	0	0,736	0,039	0,768	2:28	0	0,541	0,092	0,538
0:58	0	0,734	0,039	0,766	2:29	0	0,545	0,092	0,536
0:59	0	0,728	0,039	0,763	2:30	0	0,548	0,092	0,534
1:00	0	0,723	0,039	0,761	2:31	0	0,547	0,092	0,532
1:01	0	0,724	0,039	0,759	2:32	0	0,538	0,091	0,529
1:02	0	0,71	0,039	0,756	2:33	0	0,524	0,091	0,527
1:03	0	0,721	0,039	0,754	2:34	0	0,537	0,091	0,525
1:04	0	0,714	0,039	0,751	2:35	0	0,539	0,091	0,523
1:05	0	0,705	0,039	0,749	2:36	0	0,538	0,09	0,521
1:06	0	0,703	0,039	0,746	2:37	0	0,533	0,09	0,519
1:07	0	0,707	0,039	0,743	2:38	0	0,526	0,09	0,518
1:08	0	0,705	0,039	0,741	2:39	0	0,529	0,09	0,516
1:09	0	0,698	0,039	0,738	2:40	0	0,528	0,089	0,514
1:10	0	0,7	0,039	0,735	2:41	0	0,524	0,089	0,512
1:11	0	0,684	0,039	0,732	2:42	0	0,528	0,088	0,51
1:12	0	0,679	0,039	0,729	2:43	0	0,518	0,088	0,508
1:13	0	0,681	0,039	0,726	2:44	0	0,516	0,088	0,506
1:14	0	0,672	0,041	0,723	2:45	0	0,522	0,087	0,504
1:15	0	0,669	0,039	0,72	2:46	0	0,536	0,087	0,503
1:16	0	0,659	0,102	0,718	2:47	0	0,512	0,086	0,501
1:17	0	0,664	0,103	0,715	2:48	0	0,513	0,086	0,499
1:18	0	0,661	0,104	0,712	2:49	0	0,511	0,085	0,497
1:19	0	0,658	0,104	0,709	2:50	0	0,513	0,085	0,496
1:20	0	0,655	0,104	0,706	2:51	0	0,507	0,084	0,494
1:21	0	0,652	0,105	0,703	2:52	0	0,503	0,084	0,492
1:22	0	0,653	0,105	0,7	2:53	0	0,498	0,083	0,491
1:23	0	0,659	0,105	0,697	2:54	0	0,478	0,083	0,489
1:24	0	0,649	0,105	0,694	2:55	0	0,482	0,082	0,487
1:25	0	0,652	0,105	0,691	2:56	0	0,476	0,082	0,486
1:26	0	0,651	0,105	0,688	2:57	0	0,477	0,081	0,484
1:27	0	0,65	0,105	0,685	2:58	0	0,468	0,081	0,483
1:28	0	0,654	0,105	0,682	2:59	0	0,459	0,08	0,481
1:29	0	0,658	0,105	0,679	3:00	0	0,455	0,08	0,48
1:30	0	0,564	0,105	0,677	3:01	0	0,461	0,079	0,478
1:31	0	0,597	0,104	0,674	3:02	0	0,447	0,078	0,476
1:32	0	0,611	0,104	0,671	3:03	0	0,449	0,078	0,475

Hora	Precipitação Registrada (mm)	Escoamento Observado (m3/s)	Escoamento simulado prévio a calibração (m3/s)	Escoamento simulado Após Calibração (m3/s)	Hora	Precipitação Registrada (mm)	Escoamento Observado (m3/s)	Escoamento simulado prévio a calibração (m3/s)	Escoamento simulado Após Calibração (m3/s)
3:04	0	0,442	0,077	0,473	4:35	0	0,256	0,042	0,346
3:05	0	0,445	0,077	0,472	4:36	0	0,255	0,041	0,345
3:06	0	0,438	0,076	0,47	4:37	0	0,253	0,041	0,344
3:07	0	0,435	0,076	0,469	4:38	0	0,263	0,041	0,342
3:08	0	0,436	0,075	0,467	4:39	0	0	0,041	0,341
3:09	0	0,422	0,075	0,466	4:40	0	0	0,04	0,34
3:10	0	0,418	0,074	0,464	4:41	0	0	0,04	0,339
3:11	0	0,428	0,074	0,462	4:42	0	0	0,04	0,338
3:12	0	0,416	0,073	0,461	4:43	0	0	0,04	0,337
3:13	0	0,421	0,073	0,459	4:44	0	0	0,039	0,335
3:14	0	0,417	0,072	0,458	4:45	0	0	0,039	0,334
3:15	0	0,404	0,072	0,456	4:46	0	0	0,039	0,333
3:16	0	0,428	0,071	0,455	4:47	0	0	0,039	0,332
3:17	0	0,415	0,071	0,453	4:48	0	0	0,039	0,331
3:18	0	0,412	0,07	0,451	4:49	0	0	0,038	0,33
3:19	0	0,407	0,07	0,45	4:50	0	0	0,038	0,328
3:20	0	0,411	0,069	0,448	4:51	0	0	0,038	0,327
3:21	0	0,412	0,068	0,447	4:52	0	0	0,038	0,326
3:22	0	0,418	0,068	0,445	4:53	0	0	0,038	0,325
3:23	0	0,405	0,067	0,444	4:54	0	0	0,037	0,324
3:24	0	0,408	0,067	0,442	4:55	0	0	0,037	0,323
3:25	0	0,416	0,066	0,44	4:56	0	0	0,037	0,322
3:26	0	0,401	0,066	0,439	4:57	0	0	0,037	0,32
3:27	0	0,395	0,065	0,437	4:58	0	0	0,037	0,319
3:28	0	0,39	0,065	0,436	4:59	0	0	0,036	0,318
3:29	0	0,403	0,064	0,434	5:00	0	0	0,036	0,317
3:30	0	0,393	0,064	0,433	5:01	0	0	0,036	0,316
3:31	0	0,404	0,063	0,431	5:02	0	0	0,036	0,315
3:32	0	0,382	0,063	0,429	5:03	0	0	0,036	0,314
3:33	0	0,398	0,062	0,428	5:04	0	0	0,036	0,312
3:34	0	0,395	0,062	0,427	5:05	0	0	0,035	0,311
3:35	0	0,387	0,062	0,425	5:06	0	0	0,035	0,31
3:36	0	0,389	0,061	0,424	5:07	0	0	0,035	0,309
3:37	0	0,39	0,061	0,422	5:08	0	0	0,035	0,308
3:38	0	0,401	0,06	0,421	5:09	0	0	0,035	0,307
3:39	0	0,388	0,06	0,419	5:10	0	0	0,035	0,306
3:40	0	0,374	0,059	0,418	5:11	0	0	0,034	0,305
3:41	0	0,378	0,059	0,417	5:12	0	0	0,034	0,304
3:42	0	0,38	0,058	0,415	5:13	0	0	0,034	0,303
3:43	0	0,371	0,058	0,414	5:14	0	0	0,034	0,302
3:44	0	0,356	0,058	0,412	5:15	0	0	0,034	0,3
3:45	0	0,362	0,057	0,411	5:16	0	0	0,034	0,299
3:46	0	0,326	0,057	0,41	5:17	0	0	0,033	0,298
3:47	0	0,353	0,056	0,408	5:18	0	0	0,033	0,297
3:48	0	0,342	0,056	0,407	5:19	0	0	0,033	0,296
3:49	0	0,356	0,056	0,405	5:20	0	0	0,033	0,295
3:50	0	0,359	0,055	0,404	5:21	0	0	0,033	0,294
3:51	0	0,369	0,055	0,403	5:22	0	0	0,033	0,293
3:52	0	0,37	0,054	0,401	5:23	0	0	0,033	0,292
3:53	0	0,372	0,054	0,4	5:24	0	0	0,032	0,291
3:54	0	0,378	0,054	0,399	5:25	0	0	0,032	0,29
3:55	0	0,351	0,053	0,397	5:26	0	0	0,032	0,289
3:56	0	0,35	0,053	0,396	5:27	0	0	0,032	0,288
3:57	0	0,307	0,053	0,395	5:28	0	0	0,032	0,287
3:58	0	0,347	0,052	0,393	5:29	0	0	0,032	0,286
3:59	0	0,35	0,052	0,392	5:30	0	0	0,032	0,285
4:00	0	0,339	0,052	0,391	5:31	0	0	0,031	0,284
4:01	0	0,33	0,051	0,389	5:32	0	0	0,031	0,283
4:02	0	0,335	0,051	0,388	5:33	0	0	0,031	0,282
4:03	0	0,333	0,051	0,387	5:34	0	0	0,031	0,281
4:04	0	0,326	0,05	0,385	5:35	0	0	0,031	0,28
4:05	0	0,336	0,05	0,384	5:36	0	0	0,031	0,279
4:06	0	0,336	0,05	0,383	5:37	0	0	0,031	0,278
4:07	0	0,335	0,049	0,381	5:38	0	0	0,03	0,277
4:08	0	0,341	0,049	0,38	5:39	0	0	0,03	0,277
4:09	0	0,332	0,049	0,379	5:40	0	0	0,03	0,276
4:10	0	0,336	0,048	0,378	5:41	0	0	0,03	0,275
4:11	0	0,337	0,048	0,376	5:42	0	0	0,03	0,274
4:12	0	0,327	0,048	0,375	5:43	0	0	0,03	0,273
4:13	0	0,329	0,047	0,374	5:44	0	0	0,03	0,272
4:14	0	0,321	0,047	0,372	5:45	0	0	0,03	0,271
4:15	0	0,325	0,047	0,371	5:46	0	0	0,03	0,27
4:16	0	0,318	0,046	0,37	5:47	0	0	0,029	0,269
4:17	0	0,319	0,046	0,368	5:48	0	0	0,029	0,268
4:18	0	0,294	0,046	0,367	5:49	0	0	0,029	0,268
4:19	0	0,285	0,046	0,366	5:50	0	0	0,029	0,267
4:20	0	0,276	0,045	0,364	5:51	0	0	0,029	0,266
4:21	0	0,283	0,045	0,363	5:52	0	0	0,029	0,265
4:22	0	0,299	0,045	0,362	5:53	0	0	0,029	0,264
4:23	0	0,279	0,045	0,361	5:54	0	0	0,029	0,263
4:24	0	0,303	0,044	0,359	5:55	0	0	0,028	0,262
4:25	0	0,332	0,044	0,358	5:56	0	0	0,028	0,262
4:26	0	0,35	0,044	0,357	5:57	0	0	0,028	0,261
4:27	0	0,32	0,043	0,355	5:58	0	0	0,028	0,26
4:28	0	0,342	0,043	0,354	5:59	0	0	0,028	0,259
4:29	0	0,332	0,043	0,353	6:00	0	0	0,028	0,258
4:30	0	0,285	0,043	0,352	6:01	0	0	0,028	0,257
4:31	0	0,275	0,042	0,351	6:02	0	0	0,028	0,257
4:32	0	0,238	0,042	0,35	6:03	0	0	0,028	0,256
4:33	0	0,23	0,042	0,348	6:04	0	0	0,028	0,255
4:34	0	0,202	0,042	0,347	6:05	0	0	0,027	0,254

Hora	Precipitação Registrada (mm)	Escoamento Observado (m3/s)	Escoamento simulado prévio a calibração (m3/s)	Escoamento simulado Após Calibração (m3/s)	Hora	Precipitação Registrada (mm)	Escoamento Observado (m3/s)	Escoamento simulado prévio a calibração (m3/s)	Escoamento simulado Após Calibração (m3/s)
6:06	0	0	0.027	0.253	7:37	0	0	0.021	0.197
6:07	0	0	0.027	0.253	7:38	0	0	0.021	0.196
6:08	0	0	0.027	0.252	7:39	0	0	0.021	0.196
6:09	0	0	0.027	0.251	7:40	0	0	0.021	0.195
6:10	0	0	0.027	0.25	7:41	0	0	0.021	0.195
6:11	0	0	0.027	0.25	7:42	0	0	0.02	0.194
6:12	0	0	0.027	0.249	7:43	0	0	0.02	0.194
6:13	0	0	0.027	0.248	7:44	0	0	0.02	0.193
6:14	0	0	0.027	0.247	7:45	0	0	0.02	0.193
6:15	0	0	0.027	0.247	7:46	0	0	0.02	0.193
6:16	0	0	0.026	0.246	7:47	0	0	0.02	0.192
6:17	0	0	0.026	0.245	7:48	0	0	0.02	0.192
6:18	0	0	0.026	0.244	7:49	0	0	0.02	0.191
6:19	0	0	0.026	0.244	7:50	0	0	0.02	0.191
6:20	0	0	0.026	0.243	7:51	0	0	0.02	0.19
6:21	0	0	0.026	0.242	7:52	0	0	0.02	0.19
6:22	0	0	0.026	0.241	7:53	0	0	0.02	0.19
6:23	0	0	0.026	0.241	7:54	0	0	0.02	0.189
6:24	0	0	0.026	0.24	7:55	0	0	0.02	0.189
6:25	0	0	0.026	0.239	7:56	0	0	0.02	0.188
6:26	0	0	0.026	0.239	7:57	0	0	0.02	0.188
6:27	0	0	0.025	0.238	7:58	0	0	0.019	0.187
6:28	0	0	0.025	0.237	7:59	0	0	0.019	0.187
6:29	0	0	0.025	0.237	8:00	0	0	0.019	0.187
6:30	0	0	0.025	0.236	8:01	0	0	0.019	0.186
6:31	0	0	0.025	0.235	8:02	0	0	0.019	0.186
6:32	0	0	0.025	0.235	8:03	0	0	0.019	0.185
6:33	0	0	0.025	0.234	8:04	0	0	0.019	0.185
6:34	0	0	0.025	0.233	8:05	0	0	0.019	0.185
6:35	0	0	0.025	0.233	8:06	0	0	0.019	0.184
6:36	0	0	0.025	0.232	8:07	0	0	0.019	0.184
6:37	0	0	0.025	0.231	8:08	0	0	0.019	0.183
6:38	0	0	0.025	0.231	8:09	0	0	0.019	0.183
6:39	0	0	0.025	0.23	8:10	0	0	0.019	0.183
6:40	0	0	0.024	0.229	8:11	0	0	0.019	0.182
6:41	0	0	0.024	0.229	8:12	0	0	0.019	0.182
6:42	0	0	0.024	0.228	8:13	0	0	0.019	0.181
6:43	0	0	0.024	0.227	8:14	0	0	0.018	0.181
6:44	0	0	0.024	0.227	8:15	0	0	0.018	0.181
6:45	0	0	0.024	0.226	8:16	0	0	0.018	0.18
6:46	0	0	0.024	0.225	8:17	0	0	0.018	0.18
6:47	0	0	0.024	0.225	8:18	0	0	0.018	0.179
6:48	0	0	0.024	0.224	8:19	0	0	0.018	0.179
6:49	0	0	0.024	0.224	8:20	0	0	0.018	0.179
6:50	0	0	0.024	0.223	8:21	0	0	0.018	0.178
6:51	0	0	0.024	0.222	8:22	0	0	0.018	0.178
6:52	0	0	0.024	0.222	8:23	0	0	0.018	0.177
6:53	0	0	0.024	0.221	8:24	0	0	0.018	0.177
6:54	0	0	0.024	0.221	8:25	0	0	0.018	0.177
6:55	0	0	0.023	0.22	8:26	0	0	0.018	0.176
6:56	0	0	0.023	0.219	8:27	0	0	0.018	0.176
6:57	0	0	0.023	0.219	8:28	0	0	0.018	0.176
6:58	0	0	0.023	0.218	8:29	0	0	0.018	0.175
6:59	0	0	0.023	0.218	8:30	0	0	0.017	0.175
7:00	0	0	0.023	0.217	8:31	0	0	0.017	0.174
7:01	0	0	0.023	0.216	8:32	0	0	0.017	0.174
7:02	0	0	0.023	0.216	8:33	0	0	0.017	0.174
7:03	0	0	0.023	0.215	8:34	0	0	0.017	0.173
7:04	0	0	0.023	0.215	8:35	0	0	0.017	0.173
7:05	0	0	0.023	0.214	8:36	0	0	0.017	0.173
7:06	0	0	0.023	0.213	8:37	0	0	0.017	0.172
7:07	0	0	0.023	0.213	8:38	0	0	0.017	0.172
7:08	0	0	0.023	0.212	8:39	0	0	0.017	0.171
7:09	0	0	0.023	0.212	8:40	0	0	0.017	0.171
7:10	0	0	0.022	0.211	8:41	0	0	0.017	0.171
7:11	0	0	0.022	0.211	8:42	0	0	0.017	0.17
7:12	0	0	0.022	0.21	8:43	0	0	0.017	0.17
7:13	0	0	0.022	0.21	8:44	0	0	0.017	0.17
7:14	0	0	0.022	0.209	8:45	0	0	0.017	0.169
7:15	0	0	0.022	0.208	8:46	0	0	0.017	0.169
7:16	0	0	0.022	0.208	8:47	0	0	0.016	0.169
7:17	0	0	0.022	0.207	8:48	0	0	0.016	0.168
7:18	0	0	0.022	0.207	8:49	0	0	0.016	0.168
7:19	0	0	0.022	0.206	8:50	0	0	0.016	0.168
7:20	0	0	0.022	0.206	8:51	0	0	0.016	0.167
7:21	0	0	0.022	0.205	8:52	0	0	0.016	0.167
7:22	0	0	0.022	0.205	8:53	0	0	0.016	0.166
7:23	0	0	0.022	0.204	8:54	0	0	0.016	0.166
7:24	0	0	0.022	0.204	8:55	0	0	0.016	0.166
7:25	0	0	0.022	0.203	8:56	0	0	0.016	0.165
7:26	0	0	0.021	0.203	8:57	0	0	0.016	0.165
7:27	0	0	0.021	0.202	8:58	0	0	0.016	0.165
7:28	0	0	0.021	0.201	8:59	0	0	0.016	0.164
7:29	0	0	0.021	0.201	9:00	0	0	0.016	0.164
7:30	0	0	0.021	0.2	9:01	0	0	0.016	0.164
7:31	0	0	0.021	0.2	9:02	0	0	0.016	0.163
7:32	0	0	0.021	0.199	9:03	0	0	0.016	0.163
7:33	0	0	0.021	0.199	9:04	0	0	0.016	0.163
7:34	0	0	0.021	0.198	9:05	0	0	0.015	0.162
7:35	0	0	0.021	0.198	9:06	0	0	0.015	0.162
7:36	0	0	0.021	0.197	9:07	0	0	0.015	0.162

Hora	Precipitação Registrada (mm)	Escoamento Observado (m3/s)	Escoamento simulado prévio a calibração (m3/s)	Escoamento simulado Após Calibração (m3/s)	Hora	Precipitação Registrada (mm)	Escoamento Observado (m3/s)	Escoamento simulado prévio a calibração (m3/s)	Escoamento simulado Após Calibração (m3/s)
9:08	0	0	0.015	0.161	10:39	0	0	0.011	0.135
9:09	0	0	0.015	0.161	10:40	0	0	0.011	0.135
9:10	0	0	0.015	0.161	10:41	0	0	0.011	0.135
9:11	0	0	0.015	0.16	10:42	0	0	0.011	0.134
9:12	0	0	0.015	0.16	10:43	0	0	0.011	0.134
9:13	0	0	0.015	0.16	10:44	0	0	0.011	0.134
9:14	0	0	0.015	0.159	10:45	0	0	0.011	0.134
9:15	0	0	0.015	0.159	10:46	0	0	0.011	0.133
9:16	0	0	0.015	0.159	10:47	0	0	0.011	0.133
9:17	0	0	0.015	0.158	10:48	0	0	0.011	0.133
9:18	0	0	0.015	0.158	10:49	0	0	0.011	0.133
9:19	0	0	0.015	0.158	10:50	0	0	0.011	0.132
9:20	0	0	0.015	0.157	10:51	0	0	0.011	0.132
9:21	0	0	0.015	0.157	10:52	0	0	0.011	0.132
9:22	0	0	0.015	0.157	10:53	0	0	0.011	0.132
9:23	0	0	0.015	0.157	10:54	0	0	0.011	0.131
9:24	0	0	0.015	0.156	10:55	0	0	0.011	0.131
9:25	0	0	0.014	0.156	10:56	0	0	0.011	0.131
9:26	0	0	0.014	0.156	10:57	0	0	0.011	0.131
9:27	0	0	0.014	0.155	10:58	0	0	0.011	0.13
9:28	0	0	0.014	0.155	10:59	0	0	0.011	0.13
9:29	0	0	0.014	0.155	11:00	0	0	0.011	0.13
9:30	0	0	0.014	0.154	11:01	0	0	0.011	0.13
9:31	0	0	0.014	0.154	11:02	0	0	0.011	0.129
9:32	0	0	0.014	0.154	11:03	0	0	0.01	0.129
9:33	0	0	0.014	0.153	11:04	0	0	0.01	0.129
9:34	0	0	0.014	0.153	11:05	0	0	0.01	0.129
9:35	0	0	0.014	0.153	11:06	0	0	0.01	0.129
9:36	0	0	0.014	0.152	11:07	0	0	0.01	0.128
9:37	0	0	0.014	0.152	11:08	0	0	0.01	0.128
9:38	0	0	0.014	0.152	11:09	0	0	0.01	0.128
9:39	0	0	0.014	0.152	11:10	0	0	0.01	0.128
9:40	0	0	0.014	0.151	11:11	0	0	0.01	0.127
9:41	0	0	0.014	0.151	11:12	0	0	0.01	0.127
9:42	0	0	0.014	0.151	11:13	0	0	0.01	0.127
9:43	0	0	0.014	0.15	11:14	0	0	0.01	0.127
9:44	0	0	0.014	0.15	11:16	0	0	0.01	0.126
9:45	0	0	0.013	0.15	11:17	0	0	0.01	0.126
9:46	0	0	0.013	0.149	11:18	0	0	0.01	0.126
9:47	0	0	0.013	0.149	11:19	0	0	0.01	0.126
9:48	0	0	0.013	0.149	11:20	0	0	0.01	0.125
9:49	0	0	0.013	0.149	11:21	0	0	0.01	0.125
9:50	0	0	0.013	0.148	11:22	0	0	0.01	0.125
9:51	0	0	0.013	0.148	11:23	0	0	0.01	0.125
9:52	0	0	0.013	0.148	11:24	0	0	0.01	0.124
9:53	0	0	0.013	0.147	11:25	0	0	0.01	0.124
9:54	0	0	0.013	0.147	11:26	0	0	0.01	0.124
9:55	0	0	0.013	0.147	11:27	0	0	0.01	0.124
9:56	0	0	0.013	0.147	11:28	0	0	0.01	0.124
9:57	0	0	0.013	0.146	11:29	0	0	0.01	0.123
9:58	0	0	0.013	0.146	11:30	0	0	0.01	0.123
9:59	0	0	0.013	0.146	11:31	0	0	0.01	0.123
10:00	0	0	0.013	0.145	11:32	0	0	0.01	0.123
10:01	0	0	0.013	0.145	11:33	0	0	0.01	0.122
10:02	0	0	0.013	0.145	11:34	0	0	0.01	0.122
10:03	0	0	0.013	0.145	11:35	0	0	0.01	0.122
10:04	0	0	0.013	0.144	11:36	0	0	0.009	0.122
10:05	0	0	0.013	0.144	11:37	0	0	0.009	0.122
10:06	0	0	0.013	0.144	11:38	0	0	0.009	0.121
10:07	0	0	0.013	0.144	11:39	0	0	0.009	0.121
10:08	0	0	0.012	0.143	11:40	0	0	0.009	0.121
10:09	0	0	0.012	0.143	11:41	0	0	0.009	0.121
10:10	0	0	0.012	0.143	11:42	0	0	0.009	0.121
10:11	0	0	0.012	0.142	11:43	0	0	0.009	0.121
10:12	0	0	0.012	0.142	11:44	0	0	0.009	0.12
10:13	0	0	0.012	0.142	11:45	0	0	0.009	0.12
10:14	0	0	0.012	0.142	11:46	0	0	0.009	0.12
10:15	0	0	0.012	0.141	11:47	0	0	0.009	0.12
10:16	0	0	0.012	0.141	11:48	0	0	0.009	0.12
10:17	0	0	0.012	0.141	11:49	0	0	0.009	0.119
10:18	0	0	0.012	0.141	11:50	0	0	0.009	0.119
10:19	0	0	0.012	0.14	11:51	0	0	0.009	0.119
10:20	0	0	0.012	0.14	11:52	0	0	0.009	0.119
10:21	0	0	0.012	0.14	11:53	0	0	0.009	0.119
10:22	0	0	0.012	0.139	11:54	0	0	0.009	0.118
10:23	0	0	0.012	0.139	11:55	0	0	0.009	0.118
10:24	0	0	0.012	0.139	11:56	0	0	0.009	0.118
10:25	0	0	0.012	0.139	11:57	0	0	0.009	0.118
10:26	0	0	0.012	0.138	11:58	0	0	0.009	0.118
10:27	0	0	0.012	0.138	11:59	0	0	0.009	0.117
10:28	0	0	0.012	0.138	12:00	0	0	0.009	0.117
10:29	0	0	0.012	0.138					
10:30	0	0	0.012	0.137					
10:31	0	0	0.012	0.137					
10:32	0	0	0.012	0.137					
10:33	0	0	0.012	0.137					
10:34	0	0	0.011	0.136					
10:35	0	0	0.011	0.136					
10:36	0	0	0.011	0.136					
10:37	0	0	0.011	0.136					
10:38	0	0	0.011	0.135					





Hora	Sub-Bacia 1				Sub-Bacia 2				Sub-Bacia 3				Sub-Bacia 4				Sub-Bacia 5				Sub-Bacia 6				Hidrologia na na Jangão N12 (m/s)	Hidrologia na na Jangão N13 (m/s)								
	Precipitação (mm)	Precipitação Efectiva (mm)	Perdas de Precipitação (mm)	Escoamento Directo (m/s)	Escoamento Base (m/s)	Escoamento Total (m/s)	Precipitação Efectiva (mm)	Perdas de Precipitação (mm)	Escoamento Directo (m/s)	Escoamento Base (m/s)	Escoamento Total (m/s)	Precipitação Efectiva (mm)	Perdas de Precipitação (mm)	Escoamento Directo (m/s)	Escoamento Base (m/s)	Escoamento Total (m/s)	Precipitação Efectiva (mm)	Perdas de Precipitação (mm)	Escoamento Directo (m/s)	Escoamento Base (m/s)	Escoamento Total (m/s)	Precipitação Efectiva (mm)	Perdas de Precipitação (mm)	Escoamento Directo (m/s)			Escoamento Base (m/s)	Escoamento Total (m/s)						
23.00	0.200	0.172	0.028	0.001	0.058	0.059	0.163	0.037	0.001	0.046	0.047	0.17	0.03	0.003	0.014	0.017	0.148	0.052	0.003	0.016	0.019	0.171	0.029	0	0.041	0.041	0.159	0.041	0.001	0.029	0.03	0.106	0.142	0.184
23.01	0.200	0.171	0.029	0.001	0.058	0.059	0.163	0.037	0.001	0.046	0.048	0.169	0.031	0.003	0.014	0.017	0.145	0.055	0.003	0.016	0.019	0.169	0.031	0	0.041	0.041	0.156	0.044	0.001	0.029	0.03	0.106	0.142	0.184
23.02	0.200	0.171	0.029	0.001	0.058	0.059	0.163	0.037	0.001	0.046	0.048	0.167	0.033	0.003	0.014	0.017	0.143	0.057	0.004	0.016	0.019	0.166	0.033	0	0.041	0.041	0.154	0.046	0.001	0.029	0.03	0.106	0.143	0.183
23.03	0.200	0.169	0.031	0.001	0.058	0.059	0.163	0.037	0.001	0.046	0.048	0.165	0.035	0.004	0.014	0.017	0.14	0.06	0.004	0.016	0.019	0.166	0.034	0	0.041	0.041	0.152	0.048	0.002	0.029	0.03	0.106	0.144	0.183
23.04	0.200	0.168	0.032	0.001	0.058	0.059	0.163	0.037	0.001	0.046	0.048	0.164	0.036	0.004	0.014	0.018	0.138	0.062	0.005	0.016	0.021	0.164	0.036	0	0.041	0.041	0.15	0.05	0.002	0.029	0.03	0.107	0.145	0.183
23.05	0.200	0.166	0.034	0.001	0.058	0.059	0.163	0.037	0.001	0.046	0.048	0.162	0.038	0.004	0.014	0.018	0.136	0.064	0.005	0.016	0.021	0.163	0.037	0	0.041	0.041	0.148	0.052	0.002	0.029	0.03	0.107	0.146	0.183
23.06	0.200	0.165	0.035	0.001	0.058	0.059	0.163	0.037	0.001	0.046	0.049	0.161	0.039	0.005	0.014	0.019	0.134	0.066	0.006	0.016	0.022	0.161	0.039	0	0.041	0.041	0.146	0.054	0.002	0.029	0.03	0.107	0.147	0.182
23.07	0.200	0.164	0.036	0.001	0.058	0.059	0.163	0.037	0.001	0.046	0.049	0.159	0.041	0.006	0.014	0.02	0.131	0.069	0.007	0.015	0.023	0.16	0.04	0	0.041	0.041	0.145	0.055	0.003	0.029	0.03	0.108	0.149	0.182
23.08	0.200	0.162	0.038	0.001	0.057	0.059	0.163	0.037	0.001	0.046	0.049	0.158	0.042	0.007	0.014	0.021	0.129	0.071	0.008	0.015	0.024	0.158	0.042	0	0.041	0.041	0.143	0.057	0.003	0.029	0.03	0.108	0.149	0.182
23.09	0.200	0.161	0.039	0.002	0.057	0.059	0.163	0.037	0.001	0.045	0.05	0.157	0.043	0.008	0.014	0.022	0.127	0.073	0.01	0.015	0.025	0.157	0.043	0.001	0.041	0.041	0.141	0.059	0.004	0.029	0.03	0.109	0.154	0.182
23.10	0.200	0.159	0.041	0.002	0.057	0.059	0.163	0.037	0.001	0.045	0.051	0.155	0.045	0.009	0.014	0.023	0.125	0.075	0.012	0.015	0.027	0.155	0.045	0.001	0.041	0.041	0.139	0.061	0.005	0.029	0.03	0.11	0.157	0.182
23.11	0.200	0.158	0.042	0.003	0.057	0.060	0.163	0.037	0.001	0.045	0.052	0.154	0.046	0.011	0.014	0.025	0.123	0.077	0.014	0.015	0.029	0.154	0.046	0.001	0.041	0.041	0.136	0.062	0.005	0.029	0.03	0.111	0.161	0.182
23.12	0.200	0.157	0.043	0.003	0.057	0.060	0.163	0.037	0.001	0.045	0.053	0.152	0.048	0.012	0.014	0.026	0.121	0.079	0.016	0.015	0.032	0.153	0.047	0.001	0.041	0.041	0.136	0.064	0.006	0.029	0.03	0.113	0.166	0.182
23.13	0.200	0.155	0.044	0.003	0.057	0.060	0.163	0.037	0.001	0.045	0.054	0.151	0.049	0.014	0.014	0.028	0.12	0.08	0.019	0.015	0.034	0.151	0.049	0.001	0.04	0.042	0.134	0.066	0.008	0.029	0.03	0.114	0.171	0.182
23.14	0.200	0.154	0.046	0.004	0.057	0.061	0.163	0.037	0.001	0.045	0.056	0.15	0.05	0.017	0.014	0.03	0.118	0.082	0.022	0.015	0.038	0.15	0.05	0.001	0.04	0.042	0.133	0.067	0.009	0.029	0.03	0.117	0.178	0.182
23.15	0.200	0.153	0.047	0.005	0.057	0.062	0.163	0.037	0.001	0.045	0.057	0.149	0.051	0.019	0.014	0.033	0.116	0.084	0.026	0.015	0.041	0.149	0.051	0.002	0.04	0.042	0.131	0.069	0.01	0.029	0.03	0.119	0.186	0.182
23.16	0.000	0.000	0.000	0.000	0.057	0.062	0	0	0.014	0.045	0.059	0	0	0.022	0.014	0.033	0	0	0.031	0.015	0.046	0	0	0.002	0.04	0.042	0	0	0.012	0.029	0.03	0.122	0.194	0.182
23.17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.057	0.063	0	0	0.017	0.045	0.062	0	0	0.024	0.014	0.038	0	0	0.035	0.015	0.05	0	0	0.002	0.04	0.042	0	0	0.014	0.029	0.04	0.125	0.203	0.182
23.18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.064	0	0	0.019	0.045	0.064	0	0	0.027	0.014	0.041	0	0	0.04	0.015	0.055	0	0	0.002	0.04	0.042	0	0	0.018	0.029	0.044	0.128	0.213	0.182
23.19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.065	0	0	0.022	0.045	0.066	0	0	0.029	0.014	0.043	0	0	0.046	0.015	0.061	0	0	0.003	0.04	0.043	0	0	0.018	0.028	0.046	0.131	0.223	0.182
23.20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.066	0	0	0.024	0.045	0.069	0	0	0.031	0.014	0.045	0	0	0.051	0.015	0.066	0	0	0.003	0.04	0.043	0	0	0.022	0.028	0.049	0.135	0.233	0.183
23.21	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.067	0	0	0.027	0.045	0.072	0	0	0.033	0.014	0.046	0	0	0.057	0.015	0.072	0	0	0.003	0.04	0.043	0	0	0.022	0.028	0.051	0.139	0.244	0.183
23.22	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.068	0	0	0.03	0.045	0.074	0	0	0.034	0.014	0.048	0	0	0.063	0.015	0.078	0	0	0.004	0.04	0.044	0	0	0.025	0.028	0.053	0.143	0.255	0.183
23.23	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.068	0	0	0.033	0.044	0.077	0	0	0.035	0.014	0.049	0	0	0.069	0.015	0.084	0	0	0.004	0.04	0.044	0	0	0.027	0.028	0.056	0.147	0.265	0.184
23.24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.070	0	0	0.036	0.044	0.081	0	0	0.036	0.014	0.049	0	0	0.075	0.015	0.091	0	0	0.004	0.04	0.044	0	0	0.03	0.028	0.058	0.151	0.275	0.184
23.25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.072	0	0	0.039	0.044	0.084	0	0	0.036	0.014	0.05	0	0	0.082	0.015	0.097	0	0	0.005	0.04	0.045	0	0	0.033	0.028	0.061	0.155	0.287	0.184
23.26	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.073	0	0	0.043	0.044	0.087	0	0	0.036	0.014	0.05	0	0	0.088	0.015	0.103	0	0	0.005	0.04	0.045	0	0	0.035	0.028	0.064	0.16	0.298	0.185
23.27	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.074	0	0	0.046	0.044	0.09	0	0	0.037	0.013	0.05	0	0	0.094	0.015	0.109	0	0	0.006	0.04	0.045	0	0	0.038	0.028	0.066	0.165	0.308	0.185
23.28	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.076	0	0	0.05	0.044	0.094	0	0	0.037	0.013	0.05	0	0	0.101	0.015	0.115	0	0	0.006	0.04	0.046	0	0	0.041	0.028	0.069	0.17	0.318	0.186
23.29	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.077	0	0	0.054	0.044	0.098	0	0	0.037	0.013	0.05	0	0	0.105	0.015	0.12	0	0	0.007	0.039	0.046	0	0	0.044	0.028	0.072	0.175	0.329	0.187
23.30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.079	0	0	0.057	0.044	0.101	0	0	0.037	0.013	0.05	0	0	0.111	0.015	0.125	0	0	0.007	0.039	0.046	0	0	0.047	0.028	0.075	0.18	0.339	0.187
23.31	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.080	0	0	0.061	0.044	0.105	0	0	0.037	0.013	0.05	0	0	0.115	0.015	0.13	0	0	0.008	0.039	0.047	0	0	0.051	0.028	0.078	0.185	0.348	0.188
23.32	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.082	0	0	0.065	0.044	0.109	0	0	0.037	0.013	0.05	0	0	0.12	0.015	0.134	0	0	0.008	0.039	0.047	0	0	0.054	0.028	0.082	0.191	0.359	0.189
23.33	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.083	0	0	0.069	0.044	0.113	0	0	0.037	0.013	0.05	0	0	0.123	0.015	0.138	0	0	0.009	0.039	0.048	0	0	0.057	0.028	0.085	0.196	0.367	0.19
23.34	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.085	0	0	0.074	0.044	0.117	0	0	0.037	0.013	0.05	0	0	0.126	0.015	0.141	0	0	0.009	0.039	0.048	0	0	0.061	0.028	0.088	0.202	0.375	0.191
23.35	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.087	0	0	0.078	0.044	0.122	0	0	0.037	0.013	0.05	0	0																



Hora	Sub-Bacia 1				Sub-Bacia 2				Sub-Bacia 3				Sub-Bacia 4				Sub-Bacia 5				Sub-Bacia 6				Hidrologia na na Jangão N1 (mols)	Hidrologia na na Jangão N2 (mols)	Hidrologia na na Jangão N3 (mols)							
	Precipitaçãõ (mm)	Perdas de Precipitaçãõ (mm)	Precipitaçãõ Efectiva (mols)	Escoame nto de Base (mols)	Escoame nto Directo (mols)	Escoame nto Total (mols)	Perdas de Precipitaçãõ (mm)	Precipitaçãõ Efectiva (mols)	Escoame nto de Base (mols)	Escoame nto Directo (mols)	Escoame nto Total (mols)	Perdas de Precipitaçãõ (mm)	Precipitaçãõ Efectiva (mols)	Escoame nto de Base (mols)	Escoame nto Directo (mols)	Escoame nto Total (mols)	Perdas de Precipitaçãõ (mm)	Precipitaçãõ Efectiva (mols)	Escoame nto de Base (mols)	Escoame nto Directo (mols)	Escoame nto Total (mols)	Perdas de Precipitaçãõ (mm)	Precipitaçãõ Efectiva (mols)	Escoame nto de Base (mols)				Escoame nto Directo (mols)	Escoame nto Total (mols)					
1.00	0.000	0.000	0.000	0.096	0.048	0.144	0	0	0.155	0.038	0.193	0	0	0.008	0.012	0.020	0	0	0.083	0.013	0.096	0	0	0.055	0.034	0.089	0	0	0.135	0.024	0.159	0.337	0.451	0.577
1.01	0.000	0.000	0.000	0.096	0.048	0.144	0	0	0.155	0.038	0.193	0	0	0.008	0.012	0.020	0	0	0.083	0.013	0.096	0	0	0.055	0.034	0.089	0	0	0.134	0.024	0.158	0.337	0.451	0.577
1.02	0.000	0.000	0.000	0.096	0.048	0.144	0	0	0.154	0.038	0.192	0	0	0.008	0.012	0.020	0	0	0.081	0.013	0.093	0	0	0.055	0.034	0.089	0	0	0.132	0.024	0.157	0.336	0.449	0.574
1.03	0.000	0.000	0.000	0.096	0.048	0.144	0	0	0.154	0.038	0.192	0	0	0.008	0.012	0.020	0	0	0.079	0.013	0.089	0	0	0.055	0.034	0.089	0	0	0.131	0.024	0.155	0.336	0.448	0.572
1.04	0.000	0.000	0.000	0.096	0.048	0.144	0	0	0.154	0.038	0.192	0	0	0.008	0.012	0.019	0	0	0.077	0.013	0.089	0	0	0.055	0.034	0.089	0	0	0.13	0.024	0.154	0.336	0.445	0.57
1.05	0.000	0.000	0.000	0.096	0.048	0.144	0	0	0.154	0.038	0.192	0	0	0.008	0.012	0.019	0	0	0.076	0.013	0.089	0	0	0.055	0.034	0.089	0	0	0.129	0.024	0.153	0.336	0.445	0.568
1.06	0.000	0.000	0.000	0.096	0.048	0.144	0	0	0.154	0.038	0.192	0	0	0.008	0.012	0.019	0	0	0.075	0.013	0.088	0	0	0.055	0.034	0.089	0	0	0.127	0.024	0.151	0.335	0.443	0.567
1.07	0.000	0.000	0.000	0.096	0.047	0.144	0	0	0.154	0.038	0.191	0	0	0.008	0.012	0.019	0	0	0.074	0.013	0.086	0	0	0.055	0.034	0.089	0	0	0.126	0.024	0.15	0.335	0.441	0.565
1.08	0.000	0.000	0.000	0.096	0.047	0.143	0	0	0.154	0.038	0.191	0	0	0.008	0.012	0.019	0	0	0.072	0.013	0.085	0	0	0.055	0.034	0.089	0	0	0.125	0.024	0.149	0.335	0.441	0.563
1.09	0.000	0.000	0.000	0.096	0.047	0.143	0	0	0.153	0.038	0.191	0	0	0.008	0.011	0.019	0	0	0.071	0.013	0.084	0	0	0.055	0.034	0.089	0	0	0.123	0.024	0.147	0.334	0.438	0.561
1.10	0.000	0.000	0.000	0.096	0.047	0.143	0	0	0.153	0.037	0.19	0	0	0.007	0.011	0.019	0	0	0.07	0.013	0.083	0	0	0.055	0.034	0.089	0	0	0.122	0.024	0.146	0.334	0.436	0.559
1.11	0.000	0.000	0.000	0.096	0.047	0.143	0	0	0.153	0.037	0.19	0	0	0.007	0.011	0.019	0	0	0.069	0.013	0.082	0	0	0.055	0.034	0.089	0	0	0.121	0.024	0.145	0.333	0.435	0.558
1.12	0.000	0.000	0.000	0.096	0.047	0.143	0	0	0.152	0.037	0.19	0	0	0.007	0.011	0.019	0	0	0.068	0.013	0.08	0	0	0.055	0.033	0.089	0	0	0.12	0.024	0.143	0.333	0.433	0.556
1.13	0.000	0.000	0.000	0.096	0.047	0.143	0	0	0.152	0.037	0.189	0	0	0.007	0.011	0.019	0	0	0.067	0.013	0.079	0	0	0.055	0.033	0.089	0	0	0.118	0.024	0.142	0.332	0.432	0.554
1.14	0.000	0.000	0.000	0.096	0.047	0.143	0	0	0.152	0.037	0.189	0	0	0.007	0.011	0.019	0	0	0.066	0.013	0.078	0	0	0.055	0.033	0.089	0	0	0.117	0.024	0.141	0.332	0.43	0.552
1.15	0.000	0.000	0.000	0.096	0.047	0.143	0	0	0.151	0.037	0.188	0	0	0.007	0.011	0.019	0	0	0.064	0.013	0.077	0	0	0.055	0.033	0.089	0	0	0.116	0.024	0.139	0.331	0.429	0.551
1.16	0.000	0.000	0.000	0.096	0.047	0.143	0	0	0.151	0.037	0.188	0	0	0.007	0.011	0.018	0	0	0.063	0.013	0.076	0	0	0.055	0.033	0.089	0	0	0.114	0.024	0.138	0.331	0.429	0.549
1.17	0.000	0.000	0.000	0.096	0.047	0.143	0	0	0.15	0.037	0.187	0	0	0.007	0.011	0.018	0	0	0.062	0.013	0.075	0	0	0.055	0.033	0.089	0	0	0.113	0.024	0.137	0.33	0.425	0.547
1.18	0.000	0.000	0.000	0.096	0.047	0.143	0	0	0.15	0.037	0.187	0	0	0.007	0.011	0.018	0	0	0.061	0.013	0.074	0	0	0.055	0.033	0.089	0	0	0.112	0.024	0.136	0.329	0.423	0.546
1.19	0.000	0.000	0.000	0.096	0.047	0.143	0	0	0.149	0.037	0.186	0	0	0.007	0.011	0.018	0	0	0.06	0.013	0.073	0	0	0.055	0.033	0.089	0	0	0.111	0.023	0.134	0.329	0.422	0.544
1.20	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.143	0	0	0.149	0.037	0.186	0	0	0.007	0.011	0.018	0	0	0.059	0.013	0.072	0	0	0.055	0.033	0.088	0	0	0.11	0.023	0.133	0.328	0.42	0.542
1.21	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.142	0	0	0.148	0.037	0.185	0	0	0.007	0.011	0.018	0	0	0.058	0.013	0.071	0	0	0.055	0.033	0.088	0	0	0.108	0.023	0.132	0.327	0.418	0.541
1.22	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.142	0	0	0.147	0.037	0.184	0	0	0.007	0.011	0.018	0	0	0.057	0.012	0.07	0	0	0.055	0.033	0.088	0	0	0.107	0.023	0.131	0.327	0.416	0.539
1.23	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.142	0	0	0.147	0.037	0.184	0	0	0.007	0.011	0.018	0	0	0.057	0.012	0.069	0	0	0.055	0.033	0.088	0	0	0.106	0.023	0.129	0.326	0.415	0.538
1.24	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.142	0	0	0.146	0.037	0.183	0	0	0.007	0.011	0.018	0	0	0.055	0.012	0.068	0	0	0.055	0.033	0.088	0	0	0.104	0.023	0.128	0.325	0.413	0.536
1.25	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.142	0	0	0.146	0.037	0.182	0	0	0.007	0.011	0.018	0	0	0.055	0.012	0.067	0	0	0.055	0.033	0.088	0	0	0.104	0.023	0.127	0.324	0.411	0.534
1.26	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.142	0	0	0.145	0.037	0.181	0	0	0.007	0.011	0.018	0	0	0.054	0.012	0.066	0	0	0.055	0.033	0.088	0	0	0.103	0.023	0.126	0.324	0.41	0.533
1.27	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.142	0	0	0.144	0.036	0.181	0	0	0.007	0.011	0.018	0	0	0.053	0.012	0.065	0	0	0.055	0.033	0.088	0	0	0.101	0.023	0.125	0.323	0.408	0.531
1.28	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.142	0	0	0.143	0.036	0.18	0	0	0.007	0.011	0.018	0	0	0.052	0.012	0.064	0	0	0.055	0.033	0.088	0	0	0.1	0.023	0.123	0.322	0.406	0.529
1.29	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.142	0	0	0.143	0.036	0.179	0	0	0.006	0.011	0.018	0	0	0.051	0.012	0.064	0	0	0.055	0.033	0.088	0	0	0.099	0.023	0.122	0.321	0.404	0.528
1.30	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.142	0	0	0.142	0.036	0.178	0	0	0.006	0.011	0.017	0	0	0.051	0.012	0.063	0	0	0.055	0.033	0.088	0	0	0.098	0.023	0.121	0.32	0.403	0.526
1.31	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.142	0	0	0.141	0.036	0.177	0	0	0.006	0.011	0.017	0	0	0.05	0.012	0.062	0	0	0.055	0.032	0.088	0	0	0.097	0.023	0.119	0.319	0.401	0.525
1.32	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.142	0	0	0.14	0.036	0.177	0	0	0.006	0.011	0.017	0	0	0.049	0.012	0.061	0	0	0.055	0.032	0.088	0	0	0.096	0.023	0.118	0.318	0.399	0.523
1.33	0.000	0.000	0.000	0.096	0.046	0.142	0	0	0.14	0.036	0.176	0	0	0.006	0.011	0.017	0	0	0.048	0.012	0.061	0	0	0.055	0.032	0.088	0	0	0.095	0.023	0.118	0.317	0.398	0.521
1.34	0.000	0.000	0.000	0.096	0.045	0.142	0	0	0.139	0.036	0.175	0	0	0.006	0.011	0.017	0	0	0.048	0.012	0.06	0	0	0.055	0.032	0.088	0	0	0.094	0.023	0.117	0.316	0.396	0.52
1.35	0.000	0.000	0.000	0.096	0.045	0.141	0	0	0.138	0.036	0.174	0	0	0.006	0.011	0.017	0	0	0.047	0.012	0.059	0	0	0.055	0.032	0.088	0	0	0.093	0.023	0.116	0.316	0.394	0.518
1.36	0.000	0.000	0.000	0.096	0.045	0.141	0	0	0.137	0.036	0.173	0	0	0.006	0.011	0.017	0	0	0.046	0.012	0.058	0	0	0.055	0.032	0.088	0	0	0.092	0.023	0.115	0.315	0.393	0.516
1.37	0.000	0.000	0.000	0.																														





















**Anexo F** – Resultados do programa HEC-HMS, para o modelo de bacia calibrado, para o evento de precipitação de projecto. Valores relativos às Junções e foz da bacia de Valadares.

Hora	Precipitação (mm)	Perdas de Precipitação (mm)	Escoamento Junção N°1 (m <sup>3</sup> /s)	Escoamento Junção N°2 (m <sup>3</sup> /s)	Escoamento Junção N°3 (m <sup>3</sup> /s)	Escoamento Foz (m <sup>3</sup> /s)
0:00	0.000	0.000	0.126	0.162	0.213	0.248
0:05	0.000	0.000	0.125	0.162	0.212	0.248
0:10	0.000	0.000	0.124	0.161	0.212	0.247
0:15	0.000	0.000	0.123	0.159	0.211	0.247
0:20	0.000	0.000	0.122	0.158	0.211	0.247
0:25	0.000	0.000	0.121	0.157	0.211	0.246
0:30	0.000	0.000	0.120	0.156	0.210	0.246
0:35	0.000	0.000	0.119	0.154	0.208	0.245
0:40	0.000	0.000	0.119	0.153	0.207	0.244
0:45	0.000	0.000	0.118	0.152	0.205	0.244
0:50	0.000	0.000	0.117	0.151	0.203	0.243
0:55	0.000	0.000	0.116	0.149	0.202	0.241
1:00	0.000	0.000	0.115	0.148	0.200	0.240
1:05	0.000	0.000	0.114	0.147	0.199	0.238
1:10	0.000	0.000	0.113	0.146	0.197	0.236
1:15	0.000	0.000	0.112	0.145	0.196	0.234
1:20	0.000	0.000	0.111	0.144	0.194	0.232
1:25	0.000	0.000	0.110	0.142	0.193	0.231
1:30	0.000	0.000	0.109	0.141	0.191	0.229
1:35	0.000	0.000	0.109	0.140	0.190	0.227
1:40	0.000	0.000	0.108	0.139	0.188	0.225
1:45	0.000	0.000	0.107	0.138	0.187	0.224
1:50	0.000	0.000	0.106	0.137	0.185	0.222
1:55	0.000	0.000	0.105	0.136	0.184	0.220
2:00	0.000	0.000	0.104	0.135	0.182	0.218
2:05	0.906	0.906	0.103	0.134	0.181	0.217
2:10	0.906	0.906	0.106	0.134	0.180	0.216
2:15	0.906	0.883	0.108	0.137	0.179	0.215
2:20	0.906	0.847	0.110	0.140	0.178	0.214
2:25	0.906	0.814	0.112	0.144	0.178	0.213
2:30	0.906	0.783	0.117	0.152	0.177	0.212
2:35	0.906	0.753	0.122	0.168	0.177	0.215
2:40	0.906	0.725	0.134	0.196	0.183	0.222
2:45	0.906	0.699	0.166	0.245	0.190	0.228
2:50	0.906	0.674	0.231	0.355	0.200	0.257
2:55	0.906	0.650	0.353	0.560	0.228	0.299
3:00	2.682	1.797	0.591	0.992	0.275	0.384
3:05	2.682	1.627	1.098	1.917	0.419	0.670
3:10	2.682	1.481	2.234	3.710	0.834	1.207
3:15	2.682	1.353	3.915	6.269	2.439	2.148
3:20	2.682	1.242	6.410	9.767	6.358	3.763
3:25	2.682	1.143	9.367	13.727	11.330	9.442
3:30	2.682	1.056	13.206	18.241	16.845	18.179
3:35	2.682	0.978	17.106	22.717	22.730	25.658
3:40	2.682	0.909	20.947	26.972	28.602	32.898
3:45	2.682	0.847	24.595	30.966	34.206	39.671
3:50	2.682	0.791	27.404	34.023	39.311	45.667
3:55	0.666	0.188	27.514	33.878	42.212	49.582
4:00	0.666	0.185	25.294	30.925	41.320	49.692

Hora	Precipitação (mm)	Perdas de Precipitação (mm)	Escoamento Junção N°1 (m³/s)	Escoamento Junção N°2 (m³/s)	Escoamento Junção N°3 (m³/s)	Escoamento Foz (m³/s)
4:05	0.666	0.182	22.591	27.503	38.153	46.670
4:10	0.666	0.179	20.086	24.396	34.619	42.442
4:15	0.666	0.177	17.909	21.749	31.312	38.284
4:20	0.666	0.174	15.927	19.453	28.346	34.558
4:25	0.666	0.171	14.285	17.585	25.716	31.306
4:30	0.666	0.168	13.079	16.227	23.493	28.509
4:35	0.666	0.166	12.154	15.206	21.771	26.236
4:40	0.666	0.163	11.327	14.330	20.413	24.468
4:45	0.666	0.161	10.619	13.575	19.241	23.040
4:50	0.000	0.000	9.840	12.675	18.094	21.704
4:55	0.000	0.000	8.809	11.484	16.769	20.254
5:00	0.000	0.000	7.755	10.240	15.180	18.610
5:05	0.000	0.000	6.873	9.310	13.600	16.793
5:10	0.000	0.000	6.109	8.509	12.385	15.245
5:15	0.000	0.000	5.700	8.025	11.306	14.069
5:20	0.000	0.000	5.510	7.782	10.543	13.041
5:25	0.000	0.000	5.466	7.671	10.029	12.304
5:30	0.000	0.000	5.423	7.594	9.701	11.788
5:35	0.000	0.000	5.380	7.471	9.417	11.451
5:40	0.000	0.000	5.337	7.360	9.191	11.160
5:45	0.000	0.000	5.294	7.267	9.066	10.926
5:50	0.000	0.000	5.252	7.147	8.956	10.784
5:55	0.000	0.000	5.210	7.024	8.829	10.660
6:00	0.000	0.000	5.169	6.955	8.694	10.520
6:05	0.000	0.000	5.128	6.849	8.603	10.375
6:10	0.000	0.000	5.087	6.760	8.491	10.268
6:15	0.000	0.000	5.046	6.662	8.386	10.145
6:20	0.000	0.000	5.006	6.596	8.278	10.027
6:25	0.000	0.000	4.966	6.497	8.193	9.907
6:30	0.000	0.000	4.927	6.416	8.089	9.807
6:35	0.000	0.000	4.887	6.349	7.992	9.692
6:40	0.000	0.000	4.848	6.279	7.910	9.583
6:45	0.000	0.000	4.810	6.198	7.829	9.488
6:50	0.000	0.000	4.772	6.127	7.739	9.394
6:55	0.000	0.000	4.734	6.065	7.654	9.293
7:00	0.000	0.000	4.696	6.011	7.578	9.196