

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

**A Influência da Urbanização no Regime Hidrológico
de Pequenas Ribeiras Urbanas**

Ana Cristina Ferreira Padilha

Licenciada em Microbiologia
pela Escola Superior de Biotecnologia da Universidade Católica

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, Novembro de 2009

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Doutor Paulo Monteiro, pela orientação e sugestões na realização deste trabalho.

Ao Mestre Daniel Silva, por todas as sugestões, incentivo, disponibilidade e auxílio prestado no decurso do trabalho.

Aos meus pais, pela paciência, continua compreensão e incentivo.

Ao meu noivo, Sérgio, por toda a paciência, incentivo e compreensão.

RESUMO

A crescente pressão a que os recursos hídricos estão submetidos tem particular expressão em meio urbano e encontra-se associada a factores como os resultantes do crescimento populacional e da consequente artificialização dos solos. Simultaneamente, tem-se verificado uma maior ocorrência de cheias nessas áreas, o que sugere uma relação directa entre os fenómenos físicos relacionados com a alteração dos regimes hidrológicos e a ocorrência de cheias em pequenos cursos de água.

A previsão dos regimes hidrológicos decorrentes de determinados eventos de precipitação e de diferentes cenários de uso do solo, torna-se então uma capacidade de grande utilidade para se poder instaurar eventuais medidas de mitigação de cheias. Para tal, a integração de Sistemas de Informação Geográfica com os sistemas de modelação hidrológicos, demonstrou ser uma ferramenta de grande utilidade na constituição de uma base de apoio à decisão na gestão dos recursos hídricos.

O objecto de estudo deste documento é a bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares que se insere na malha urbana periférica do Concelho de Vila Nova de Gaia. Com a modelação efectuada simularam-se regimes hidrológicos de acordo com o tipo de uso de solo, tendo sido considerados dois cenários distintos. No primeiro cenário, foi efectuada a simulação para a situação actual da bacia, enquanto no segundo caso se contempla um cenário hipotético para o ano de 1964. Através da análise das fotografias aéreas de 1964 torna-se evidente o aumento da urbanização desde então para a actualidade. Como tal, os regimes hidrológicos simulados reflectem as alterações inerentes às diferenças verificadas.

As ferramentas utilizadas permitem a construção de cenários para avaliação das alterações urbanísticas introduzidas, e disponibilizam informação relativa ao efeito prático de possíveis medidas que venham a ser implementadas. Como tal, estes modelos de simulação podem ser considerados uma boa base para a tomada de decisões relativas ao desenvolvimento e gestão dos recursos hídricos, assim como uma ferramenta de suporte ao planeamento urbano.

ABSTRACT

The growing pressure to which water resources are submitted is especially notorious in urban areas, and it is associated to certain factors as the ones resulting from the population growth and soil artificialization. Simultaneously there has been a higher rate of floods in those areas, suggesting a direct link between the physical phenomena related to the changing of the hydrologic behaviour and the floods in small urban rivers.

The prediction of hydrologic behaviour resulting from certain precipitation events e different scenarios of soil uses has become a very useful ability to implement possible measures of flood mitigation. In order to serve this purpose, the integration of Geographic Information Systems (GIS) with hydrologic modelling systems, has shown to be a very useful tool to provide an informed basis for sound decision making regarding water resource management.

The present document has for its study object the watershed of Ribeira de Valadares located at Vila Nova de Gaia Municipal suburban tissue. There were simulated hydrologic regimes according to the uses of soil considering two distinct scenarios. In the first scenario, was modelled the hydrologic behaviour of the present watershed, and in the second scenario was considered a hypothetical scenario for the year of 1964. By the analysis of the aerial photos from 1964 is quite evident the increasing urbanization since then to the present days. As expected, the simulated hydrological regimes reflect the changes associated to the verified differences.

The used tools allow the construction of scenarios to evaluate urban changes and provide information related to the practical effect of eventual measures that may be implemented. These models can be considered as a good basis for decisions regarding the development and management of water resources, as well as a supporting tool to urban planning.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xv
CONCEITOS E ABREVIATURAS	xvii
1. INTRODUÇÃO	3
2. GEODESIA	
2.1 Introdução à Geodesia	7
2.2 A Terra e os Seus Modelos	8
2.2.1 Os Data Geodésicos	10
2.2.2 Rede Geodésica.....	11
2.2.3 Projecções Cartográficas	12
2.2.4 Princípios Geométricos das Projecções Cartográficas	14
2.3 Sistemas de Coordenadas	15
2.3.1 Coordenadas Planas ou Rectangulares	15
2.3.2 Coordenadas Polares.....	16
2.4 A Geometria da Esfera e as suas Coordenadas Geográficas	16
2.5 A Geometria do Elipsóide e as suas Coordenadas Geográficas	18
2.6 Sistemas de Referenciação	20
2.6.1 Grades Geográficas	20
2.6.1.1 Sistema GEOREF.....	20
2.6.1.2 Grade Geográfica UTM	20
2.6.2 Quadrículas Cartográficas.....	20
2.6.3 Sistemas de Projecção.....	21
2.7 A Cartografia Portuguesa Actual	22

3. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

3.1 Introdução	25
3.2 Modelação de Dados	27
3.2.1 Dados Alfanuméricos	27
3.2.2 Dados Geográficos.....	28
3.2.2.1 Modelo <i>Raster</i>	29
3.2.2.2 Modelo Vectorial	30
3.3 Georreferenciação.....	31
3.3.1 Etapas do Processo	34
3.3.1.1 Ajuste do <i>Raster</i> com os Pontos de Controlo	34
3.3.1.2 Transformação do <i>Raster</i>	35
3.4 Visualização	38
3.5 Análise Espacial	38
3.6 Considerações Finais	40

4. MODELAÇÃO HIDROLÓGICA

4.1 Introdução	43
4.2 Breve Considerações Sobre Modelação.....	43
4.3 Classificação dos Modelos Hidrológicos	45
4.4 Aplicação da Modelação Hidrológica à Análise de Cheias	47
4.4.1 Componentes de um Hidrograma	48
4.4.2 Forma do Hidrograma e Factores Condicionantes	50
4.4.3 Modelos para a Separação do Escoamento de Base e do Escoamento Directo	51
4.4.4 Precipitação.....	52
4.4.5 Hietograma das Precipitações	57
4.4.6 Precipitação Útil e Modelação das Perdas por Precipitação	60
4.4.6.1 Modelo de Perdas de Intensidade Constante	62
4.4.6.2 Modelo de Perdas do Soil Conservation Service	63
4.4.7 Modelo de Escoamento Directo	70
4.4.7.1 Modelo do Hidrograma Unitário.....	70
4.4.7.2 Modelo da Onda Cinemática	74
4.4.8 Propagação de Hidrogramas de Cheias em Trechos de Canal	82
4.4.9 Resumo das Componentes do Hidrograma de Cheia e do Correspondente Hietograma da Precipitação Total.....	85

5. INTEGRAÇÃO DOS SIG NA MODELAÇÃO HIDROLÓGICA

5.1 Introdução	89
5.2 Definição de Modelo Digital do Terreno	90
5.3 O Relevo e a sua Representação	90
5.4 Construção de um Modelo Digital do Terreno	92
5.4.1 Triangulação.....	92
5.4.1.1 Varrimento Radial.....	93
5.4.1.2 Triangulação de Delaunay.....	93
5.5 Finalidade dos Modelos Digitais do Terreno	95
5.6 Modelos Digitais do Terreno e Modelação Hidrológica.....	96
5.7 Considerações Finais	97

6. APLICAÇÃO AO ESTUDO DA BACIA HIDROGRÁFICA DA BACIA DE VALADARES

6.1 Introdução	101
6.2 <i>Softwares</i> Utilizados	102
6.3 Área de Estudo	102
6.3.1 Localização	103
6.3.2 Geologia	105
6.3.3 Tipo Hidrológico de Solos	106
6.3.4 Ocupação do Solo e Coberto Vegetal.....	107
6.3.5 Clima	108
6.3.6 Demografia e Urbanização	109
6.3.7 Resumo	111
6.4 Caracterização Fisiográfica.....	112
6.4.1 Modelo Digital do Terreno (MDT).....	112
6.4.2 Caracterização do Relevo	115
6.5 Delineamento de Sub-Bacias Hidrográficas e Rede de Drenagem.....	117
6.5.1 <i>Software</i> utilizado	118
6.5.2 Processamento	118
6.6 Elaboração do Modelo Hidrológico	122
6.6.1 <i>Software</i> utilizado	122
6.6.2 Estruturação do Modelo Hidrológico	123
6.6.3 Modelo Hidrológico.....	125
6.6.3.1 Modelo de Bacia	125

6.6.3.1.1 Modelo de Escoamento Directo	126
6.6.3.1.2 Modelo de Perdas de Precipitação	130
6.6.3.1.3 Modelo de Escoamento de Base	131
6.6.3.1.4 Modelo de Propagação do Escoamento em Canal	134
6.6.3.2 Modelo de Precipitação	135
6.6.3.3 Especificações de Controlo	139
6.6.4 Calibração	139
6.6.5 Resultados	140
 7. APLICAÇÃO AO ESTUDO DA BACIA HIDROGRÁFICA DA BACIA DE VALADARES PARA O ANO DE 1964	
7.1 Introdução	145
7.2 Softwares Utilizados	145
7.3 Georreferenciação das Fotografias Aéreas de 1964	145
7.4 Área de Estudo	147
7.4.1 Ocupação do Solo e Coberto Vegetal.....	147
7.5 Caracterização dos Restantes Parâmetros	149
7.6 Resultados.....	152
 8. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	155
 9. BIBLIOGRAFIA	159
 ANEXOS	
Anexo A - Valores do coeficiente de rugosidade do modelo da onda cinemática (N) para diferentes tipos de superfícies	165
Anexo B - Valores do coeficiente de rugosidade de Manning (n) para canais a céu aberto	166
Anexo C - Valores do número de escoamento (CN) para zonas urbanas, suburbanas e rurais (extraído de Correia, 1984).....	167
Anexo D - Séries temporais de escoamento gerado pelo software HEC-HMS, para as diferentes secções terminais da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, para o cenário actual.....	168
Anexo E - Séries temporais de escoamento gerado pelo software HEC-HMS, para as diferentes secções terminais da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, para o cenário de 1964	169

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Representação gráfica das ondulações do geóide (imagem retirada da internet)	7
Figura 2.2 - Projecção de uma pequena secção da superfície da Terra sobre uma superfície de referência (adaptado de Gaspar, 2000)	9
Figura 2.3 - Triangulação de uma rede geodésica no terreno e na superfície de referência (adaptado de Gaspar, 2000)	11
Figura 2.4 - Vértice geodésico de Melriça (imagem retirada da internet).....	12
Figura 2.5 - As duas fases de uma projecção cartográfica: em I, a redução do modelo da Terra à escala natural da projecção (μ); em II, a planificação deste modelo reduzido (adaptado de Gaspar, 2000)	13
Figura 2.6 – Alguns exemplos de projecções geométricas	15
Figura 2.7 – Exemplo da marcação de um ponto (4,3) no sistema de coordenadas cartesiano	15
Figura 2.8 – Sistema de coordenadas polares (adaptado de Gaspar, 2000)	16
Figura 2.9 – Esquematização dos paralelos e meridianos na superfície terrestre.....	17
Figura 2.10 – Esquematização da latitude e longitude na superfície terrestre	18
Figura 2.11 - A: Elipse meridiana; B: Raios e centros de curvatura segundo o meridiano (R e OR), segundo o primeiro vertical (N e ON) e segundo o paralelo (r e OR).....	18
Figura 2.12 – As coordenadas geográficas no elipsóide: φ é a latitude geodésica, Ψ é a latitude geocêntrica e λ é a longitude	19
Figura 2.13 - Sistemas de projecção utilizados no território do continente: A, <i>Bessel-Bonne-Lisboa</i> , <i>Hayford-Gauss-Lisboa</i> ; C, <i>Hayford-Gauss-Melriça</i> ; e D, <i>Hayford-Gauss-Militar</i> . PC designa o Ponto Central da projecção, o triângulo assinala o ponto de fixação do <i>datum</i> , a letra O designa a origem das coordenadas cartográficas; os números I a IV identificam os quadrantes em cada sistema.....	21

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Evolução dos SIG a partir de várias áreas do saber de aplicações computacionais para o registo e análise do espaço (adaptado de Burrough, 1986)	26
Figura 3.2 – Relação entre os SIG e os outros sistemas (adaptado de Maguire, 1991)	27
Figura 3.3 – Esquema da localização de mapas relativamente à superfície terrestre.....	32
Figura 3.4 – Esquema da sobreposição das várias camadas de informação.....	33
Figura 3.5 – Ilustração de um alinhamento	35
Figura 3.6 – Esquema ilustrativo da metodologia de transformação de um <i>raster</i>	36
Figura 3.7 – Esquema ilustrativo de alguns tipos de transformação de um <i>raster</i>	37

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Diagrama de fluxo numa bacia hidrográfica (adaptado de HEC, 2000 b)	44
Figura 4.2 – Classificação de modelos hidrológicos (adaptado de Quintela e Portela, 2000)	45
Figura 4.3 – Componentes de um hidrograma	49
Figura 4.4 – Características de um hidrograma tipo (extraído de Lencastre e Franco, 1984)	51
Figura 4.5 – Modelo de recessão do escoamento de base (extraído de Lencastre e Franco, 1984)	52
Figura 4.6 - 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)	54
Figura 4.7 - Valores máximos de precipitação horária para diferentes frequências estatísticas (extraído de Lencastre e Franco, 1984)	55
Figura 4.8 - 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)	57
Figura 4.9 - a) Hietograma da precipitação e b) distribuição temporal adimensional da precipitação (extraído de Hipólito, 1985)	58
Figura 4.10 - Representação dos padrões de distribuição de blocos de precipitação em hietogramas (extraído de Portela, 2006 a)	59
Figura 4.11 - 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)	59
Figura 4.12 - Representação das variáveis e funções do modelo do SCS para determinação das perdas de precipitação (extraído de Portela et al., 2000 a)	64
Figura 4.13 - Carta dos solos de Portugal Continental classificados pelas suas características hidrológicas (adaptado de Lencastre e Franco, 1984)	67
Figura 4.14 - Grupos hidrológicos correspondentes às classes de solo representadas na Tabela 4.5 (adaptado de Portela et al., 2000 a)	68
Figura 4.15 - Primeiro princípio básico do hidrograma unitário: Princípio da proporcionalidade (extraído de Lencastre e Franco, 1984)	71
Figura 4.16 - Segundo princípio básico do hidrograma unitário: Princípio da sobreposição (extraído de Lencastre e Franco, 1984)	72
Figura 4.17 - Hidrograma em S (extraído de Paulo, 1998)	73
Figura 4.18 - Elementos usados no processo de cálculo do modelo da onda cinemática (adaptado de HEC, 1993)	78
Figura 4.19 - Relação entre os elementos representativos do escoamento numa bacia hidrográfica de acordo com o modelo da onda cinemática (adaptado de HEC, 1993)	78
Figura 4.20 - Padrão de drenagem urbano típico (adaptado de HEC, 1993)	81

Figura 4.21 - Representação esquemática de um modelo de propagação (extraído de Portela, 2006 a)	82
Figura 4.22 - Modelo de Muskingum. Armazenamento prismático e em cunha (extraído de Portela, 2006 a)	83
Figura 4.23 - Modelo de Muskingum. Efeito do parâmetro x na atenuação da onda de cheia ao propagar-se num trecho de canal (adaptado de HEC, 2000 b).....	84
Figura 4.24 - Componentes do hidrograma de cheia e do correspondente hietograma da precipitação (extraído de Quintela, 1996).....	85

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Linhas de interpolação entre pontos cotados.....	91
Figura 5.2 – Formas de relevo	92
Figura 5.3 – Representação da utilização de linhas de ruptura na geração de um MDT (adaptado de Matos, 2007).....	94

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 - Representação da delimitação da bacia de Valadares e dos limites administrativos do concelho e da cidade de Vila Nova de Gaia (fontes: Gaiurb, IGeoE e IGP).....	103
Figura 6.2 - Cartogramas representativos das Cartas Militares referidas e da delimitação administrativa, a nível da freguesia, da bacia de Valadares (fonte: Gaiurb, IGeoE e IGP)	104
Figura 6.3 - Cartograma representativo da litologia da bacia de Valadares (fonte: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente)	105
Figura 6.4 - Representação do tipo Hidrológico de solos da bacia de Valadares (fonte: Lencastre e Franco, 1984)	106
Figura 6.5 - Cartograma representativo da ocupação do solo da bacia de Valadares (fonte: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente)	107
Figura 6.6 - Cartogramas representativos dos parâmetros considerados para a caracterização climática da bacia de Valadares	109
Figura 6.7 - Cartograma representativo da distribuição da população por subsecção estatística para a bacia de Valadares (fonte: Instituto Nacional de Estatística)	110
Figura 6.8 - Cartograma representativo da distribuição do edificado na bacia de Valadares (fonte: Gaiurb)	111
Figura 6.9 - Representação do MDT do da bacia da Ribeira de Valadares na sua forma TIN.....	114
Figura 6.10 - 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 (extraído de Granado, 1996)	114
Figura 6.11 - Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares	115
Figura 6.12 - Perfil longitudinal da Ribeira de Valadares	116

Figura 6.13- Carta de declives da bacia da Ribeira de Valadares	117
Figura 6.14 - Representação da rede de drenagem (gerada e cedida) e respectivas subunidades hidrológicas, em formato vectorial, para a bacia de Valadares	121
Figura 6.15 - Representação da conectividade entre os diferentes elementos hidrológicos que compõem a bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares.....	124
Figura 6.16 - Esquematisação da estrutura do modelo hidrológico	125
Figura 6.17 - Representação da divisão em planos das sub-bacias da Ribeira de Valadares	127
Figura 6.18 - 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)	133
Figura 6.19 - Representação no programa HEC-HMS da estrutura hidrológica da bacia da Ribeira de Valadares	134
Figura 6.20 - Representação da distribuição espacial da precipitação diária máxima anual para Portugal Continental (fonte: SNIRH).....	136
Figura 6.21 - Hietograma de projecto para a bacia de Valadares, para um período de retorno de 100 anos, considerando três blocos alternados	138
Figura 6.22 - Esquematisação da localização das secções terminais (ST), correspondentes aos hidrogramas	140
Figura 6.23 - Hidrogramas de cheia resultantes da simulação efectuada para cada secção terminal	141

CAPÍTULO 7

Figura 7.1 - Imagem aérea da bacia de Valadares, para o ano de 1964	146
Figura 7.2 - Cartograma representativo da ocupação do solo da bacia de Valadares, para o ano de 1964.....	147
Figura 7.3 - Hietograma de projecto para a bacia de Valadares, para um período de retorno de 100 anos, considerando três blocos alternados, para o ano de 1964	151
Figura 7.4 - Hidrogramas de cheia resultantes da simulação efectuada para cada secção terminal, para o ano de 1964.....	152

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Data geodésicos utilizados em Portugal	10
---	----

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 - Definições de SIG e os grupos de pessoas para quem são úteis	25
---	----

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Parâmetros da curva IDF para a Região do Porto (Serra do Pilar), para diferentes períodos de retorno (fonte: SNIRH)	55
Tabela 4.2 - Valores medianos da intercepção pela copa como percentagem da precipitação total anual ou sazonal (adaptado de Lencastre e Franco, 1984).....	61
Tabela 4.3 - Intercepção por diversas culturas tidas, pelo seu porte, como pertencentes ao estrato herbáceo (adaptado de Lencastre e Franco, 1984).....	61
Tabela 4.4 - 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)	63
Tabela 4.5 - Propriedades hidrológicas dos solos consoante a respectiva textura (extraído de Portela et al., 2000 a)	68

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 - Valor das áreas de intercepção da bacia de Valadares com as freguesias do concelho de Vila Nova de Gaia e respectivas fracções percentuais da sua área total	104
Tabela 6.2 - Valores das áreas de cada uma das classes litológicas compreendidas na bacia de Valadares e respectivas fracções percentuais da sua área total.....	106
Tabela 6.3 - 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	108
Tabela 6.4 - Representação sistemática da informação digital utilizada na caracterização da Bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares	112
Tabela 6.5 - Distribuição da área da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, seu valor de área acumulada e respectivas fracções percentuais da área total, por classes hipsométricas	116
Tabela 6.6 - Distribuição da área da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, seu valor de área acumulada e respectivas fracções percentuais da área total, por classes hipsométricas	121
Tabela 6.7 - Valores de alguns dos parâmetros integrantes do modelo da onda cinemática, na sua formulação para escoamento à superfície, para a bacia de Valadares	127
Tabela 6.8 - Valores definidos para a rugosidade cinemática média para cada plano das sub-bacias da Ribeira de Valadares	129

Tabela 6.9 - Valores dos parâmetros integrantes do modelo da onda cinemática, na sua formulação para escoamento em canal, para a bacia de Valadares	130
Tabela 6.10 - Valores da média do número de escoamento (CN) para cada um dos planos das subunidades hidrológicas, para a situação AMC III	131
Tabela 6.11 - Valores médios do número de escoamento, comprimento da linha de água principal, declive da totalidade da bacia da Ribeira de Valadares, e tempo de concentração para AMC III	136
Tabela 6.12 - Curva IDF: Porto (Serra do Pilar) (fonte: SNIRH)	136
Tabela 6.13 - 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	138
Tabela 6.14 - Processo de cálculo do método dos blocos alternados. Resultado da diferença entre os valores determinados para os instantes assinalados na Tabela 6.13, sua fracção percentual, e respectivo procedimento para disposição alternada	139
Tabela 6.15 - Valores máximos de escoamento para cada secção terminal, e tempo que demora a atingir esse pico	141

CAPÍTULO 7

Tabela 7.1 - 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, para o ano de 1964	148
Tabela 7.2 - Valores das fracções percentuais das áreas de cada uma das classes de ocupação do solo compreendidas na bacia de Valadares para o cenário actual e para o cenário de 1964	148
Tabela 7.3 - Valores definidos para a rugosidade cinemática média para cada plano das sub-bacias da Ribeira de Valadares, para o ano de 1964	149
Tabela 7.4 - Valores da média do número de escoamento (CN) para cada um dos planos das subunidades hidrológicas, para a situação AMC III, para o ano de 1964	149
Tabela 7.5 - Valores médios do número de escoamento, comprimento da linha de água principal, declive da totalidade da bacia da Ribeira de Valadares, e tempo de concentração para AMC III para o ano de 1964	150
Tabela 7.6 - 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 (ano de 1964)	150
Tabela 7.7 - Processo de cálculo do método dos blocos alternados. Resultado da diferença entre os valores determinados para os instantes assinalados na Tabela 7.6, sua fracção percentual, e respectivo procedimento para disposição alternada, para o ano de 196	151
Tabela 7.8 - Valores máximos de escoamento para cada secção terminal, e tempo que demora a atingir esse pico, para o ano de 1964	152

CONCEITOS E ABREVIATURAS

AMC – *Antecedent Moisture Conditions*

BGRI – Base Geográfica de Referenciação de Informação

CAD – *Computer Aided Design*

CGIS – *Canada Geographic Information System*

CN – *Curve Number*

DSS – *Data Storage System*

ESRI – *Environmental System Research Institute*

GEOREF – *World Geographic Reference System*

GPS – *Global Positioning System*

GUI – *Graphical User Interface*

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

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

IDF – Intensidade-duração-frequência

IGeoE – Instituto Geográfico do Exército

IGP – Instituto Geográfico Português

IH – Instituto Hidrográfico

INAG – Instituto Nacional da Água

INE – Instituto Nacional de Estatística

MDT – Modelo Digital do Terreno

MMQ – Método dos Mínimos Quadrados

SCS – *Soil Conservation Service*

SGBD – Sistema de Gestão de Base de Dados

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

TIN – *Triangular Irregular Network*

USDA – *United States Department of Agriculture*

UTM – *Universal Transverse Mercator*

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo tem havido uma crescente pressão urbanística, principalmente nos grandes centros urbanos. Simultaneamente, com o aumento da área urbana, temos assistido a uma maior ocorrência de cheias nessas áreas, sugerindo-se uma ligação directa entre os fenómenos físicos relacionados com a alteração dos regimes hidrológicos e a ocorrência de cheias em pequenos cursos de água, fruto da pressão urbanística. A crescente artificialização dos solos altera significativamente as condições de drenagem natural das águas pluviais, assim como, os processos de infiltração de água no solo.

Neste contexto, a gestão dos recursos hídricos em meio urbano adquire uma especial importância, tornando-se uma questão essencial na procura de uma relação mais harmoniosa entre a natureza e a sociedade, numa perspectiva de sustentabilidade.

Para tentar controlar ou prever estes problemas, torna-se cada vez mais evidente a necessidade da existência de modelos de simulação que possam servir como ferramentas de suporte ao planeamento. A modelação hidrológica é uma componente crucial, e que está na base de qualquer estudo que tenha como objectivo a caracterização de um determinado meio hídrico, independentemente da sua dimensão.

O presente trabalho de investigação foi desenvolvido no âmbito de um projecto que decorreu na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), que consistiu na caracterização das ribeiras litorais entre a barrinha de Esmoriz e o Rio Minho. Este projecto apresentou uma plataforma comum a todas as suas componentes constituída por um Sistema de Informação Geográfico (SIG), onde foi feito o armazenamento e gestão de todo o tipo de informação inerente às ribeiras em causa.

Após a conclusão do projecto, foi feita uma análise das potencialidades das metodologias desenvolvidas para futuras aplicações. Foi então utilizada a metodologia desenvolvida relativa à modelação hidrológica, num contexto de previsão dos efeitos que possam resultar da crescente pressão urbanística exercida em pequenas ribeiras costeiras. Para atingir esse objectivo, foi efectuada a modelação hidrológica da Ribeira de Valadares em duas situações distintas que evidenciassem uma diferença considerável relativamente ao grau de urbanização:

- A primeira situação considerada o cenário actual, simulando a situação que temos actualmente na bacia da Ribeira de Valadares;
- A segunda situação simulou o cenário para o ano de 1964, através da georreferenciação de imagens aéreas do ano de 1964, foi construída a respectiva carta de ocupação de solos de forma a simular as condições existentes nessa época, fazendo correr o respectivo modelo hidrológico.

Esta dissertação procura assim, demonstrar uma combinação de tecnologias, que permitem preparar o modelo para encontrar respostas adequadas, e demonstrar os efeitos da urbanização em canais naturais. As ferramentas utilizadas permitirão a construção de cenários para avaliar alterações urbanísticas introduzidas, e disponibilização de informação relativa ao efeito prático de possíveis medidas que venham a ser implementadas.

CAPÍTULO 2

GEODESIA

2.1 INTRODUÇÃO À GEODESIA

A Geodesia é actualmente uma disciplina do ramo da Geofísica, que integra os modelos da Física da Terra na Geometria convencional. Pode mesmo ser definida como a “ciência que se ocupa da medição do campo gravítico da Terra e da representação cartográfica da sua superfície”.

O geóide é um modelo físico da forma da Terra (Figura 2.1). Trata-se da superfície equipotencial (superfície de potencial gravitacional constante) e que, em média, coincide com o valor médio do nível médio das águas do mar.

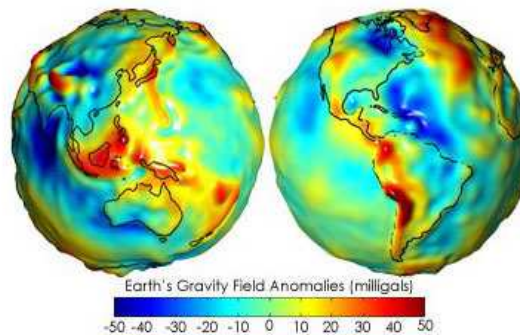


Figura 2.1 – Representação gráfica das ondulações do geóide (imagem retirada da internet).

A superfície do geóide é mais irregular que o elipsóide de revolução usado habitualmente para aproximar a forma do planeta, mas consideravelmente mais suave do que a própria superfície física terrestre. Enquanto esta última varia entre os 8.850m (Monte Everest) e -11.000m (Fossa das Marianas), o geóide varia apenas cerca de ± 199 m além da superfície do elipsóide de referência.

A exploração de todas as potencialidades do GPS num dado território exige um conhecimento detalhado das ondulações do geóide, relativamente ao WGS84, nesse território, uma vez que o GPS mede altitudes geodésicas relativas ao elipsóide de referência do WGS84 e não altitudes ortométricas. Pode-se assim afirmar que o geóide, tal como a rede geodésica, a rede de nivelamento geométrico e de precisão e a rede gravimétrica, faz parte da infra-estrutura cartográfica nacional.

Um dos problemas mais complexos da geodesia reside na determinação do geóide. Para tal, são estimadas as suas ondulações relativas a um *datum* geodésico. Enquanto a determinação global do geóide recomenda a utilização de um *datum* global, como o WGS84, a sua determinação no âmbito de uma região pode ser baseada em *data* geodésicos regionais ou locais: existem estimativas do geóide, relativas ao *Datum73* e ao ED50, no território de Portugal continental. O geóide pode ser representado em mapas e cartas, por intermédio das isolinhas que unem os pontos com a mesma ondulação. O facto de as ondulações serem relativas a um *datum* geodésico dá origem a uma grande variação das representações. Em Portugal continental, enquanto as ondulações do geóide relativas ao *Datum* Hayford-Melriça são inferiores a poucos metros, as suas ondulações relativas ao elipsóide do WGS84 atingem perto de sessenta metros.

2.2. A TERRA E OS SEUS MODELOS

A tarefa de representar a superfície da Terra numa folha de papel não é uma tarefa trivial. Ainda que aceitássemos, como alguns povos antigos, que o nosso planeta é plano, seríamos mesmo assim confrontados com o desafio de produzir a infinita complexidade dos seus montes, vales e ravinas numa carta. Contudo, a superfície da Terra é, de facto, aproximadamente esférica.

A forma de representação da superfície da Terra depende, de algum modo, da extensão da área que se pretende representar. De facto, para regiões suficientemente pequenas (alguns quilómetros de raio), o erro em se ignorar a forma esférica do nosso planeta é, em geral, residual. Por outro lado, quando se pretende cartografar grandes regiões, é necessário ter em conta a curvatura geral do planeta. Assim, em alguns casos bastará considerar a Terra esférica, enquanto noutros casos será necessário recorrer a uma melhor aproximação, o elipsóide de revolução.

Idealmente, uma carta deveria representar a superfície da Terra sem quaisquer deformações, isto é, as posições relativas de todos os lugares deveriam ser preservadas. Por outro lado, deveria também ser possível medir, sobre ela, as distâncias e direcções entre esses objectos. Contudo, e uma vez que a superfície esférica não é planificável, o primeiro requisito não pode ser satisfeito. Quanto ao segundo, e devido às irregularidades da superfície da Terra, este só poderá ser conseguido através de um compromisso, o de a substituir por uma superfície mais simples.

Chama-se, em geral, *superfície de referência* a uma superfície teórica destinada a servir de modelo à superfície da Terra. De acordo com o propósito a que se destinam, podem ser considerados os seguintes tipos:

- Superfície de referência geodésica (ou elipsóide de referência) é um modelo com forma e dimensões tão próximas quanto possível da Terra, destinado a estabelecer, com grande exactidão, as posições relativas entre os vários lugares. É sobre as superfícies de referência geodésicas, que são sempre elipsóides de revolução, que se definem as coordenadas geográficas dos lugares, a latitude e a longitude;
- Superfície de referência cartográfica é um modelo da superfície da Terra com base no qual se realizam os cálculos destinados a construir as projecções cartográficas. Poderão ser utilizados para este propósito o plano, a esfera e o elipsóide de revolução.

Ao substituir-se a superfície da Terra por um modelo mais simples, ter-se-á também de estabelecer um processo de, sistematicamente, representar cada um dos seus lugares sobre esse modelo. A Figura 2.2 mostra uma pequena porção da superfície da Terra e, sob ela, uma correspondente porção da superfície de referência que lhe irá servir de modelo. O processo consiste em cada ponto à superfície da Terra ser projectado sobre a superfície de referência através de um segmento de recta que lhe é perpendicular. As coordenadas geográficas desse ponto, *latitude* e *longitude*, serão então definidas como as coordenadas geográficas da sua projecção sobre a superfície de referência.

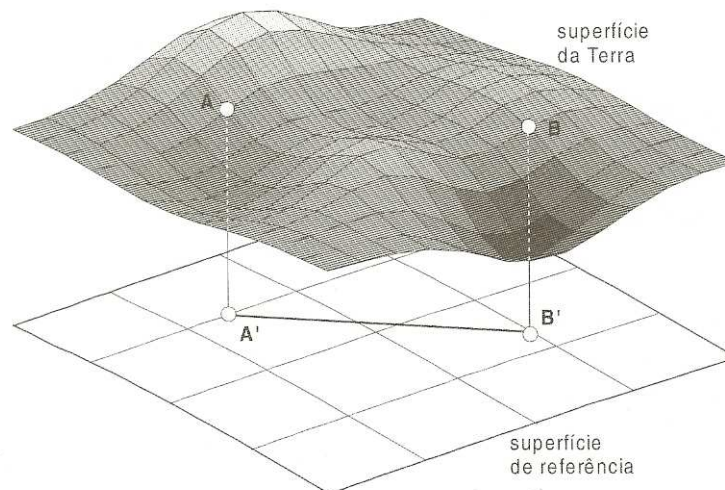


Figura 2.2 – Projecção de uma pequena secção da superfície da Terra sobre uma superfície de referência (adaptado de Gaspar, 2000).

No que respeita à definição da própria superfície de referência, será desejável que esta se aproxime, tanto quanto possível, da superfície natural da Terra (dita *superfície topográfica*), para que os erros na avaliação das posições relativas entre os lugares sejam pequenos. Entre a forma infinitamente complexa da Terra e a superfície teórica mais simples que se pode utilizar como modelo há, pelo menos em teoria, um vasto leque de escolha, sendo uma das hipóteses, o *geóide*.

As superfícies teóricas de facto utilizadas em cartografia são, por ordem crescente de complexidade, o *plano*, a *esfera* e o *elipsóide de revolução*.

A utilização da esfera como modelo da superfície da Terra é uma outra solução. De facto, a esfera é uma excelente superfície de referência para um grande número de aplicações, tendo em conta que a diferença entre os eixos polar e equatorial do nosso planeta é relativamente pequena (Gaspar, 2000).

Assim, na construção de uma projecção cartográfica, só se justificará substituir a esfera pelo elipsóide de revolução, se a diferença resultante for perceptível na escala da carta que se pretende construir.

O elipsóide de revolução é a superfície relativamente à qual são estabelecidas as coordenadas geográficas dos lugares da Terra e, também, a que é utilizada como superfície de referência cartográfica na construção de cartas de escala pequena.

A utilização do elipsóide de revolução como modelo para a determinação de ângulos e de distâncias sobre a superfície da Terra é evitado sempre que possível, devido à considerável complexidade dos cálculos e ao facto de as diferenças relativamente ao modelo esférico não terem, para grande parte das aplicações, significado apreciável. Mesmo em cálculos de Geodesia, onde é exigida grande exactidão, o elipsóide é frequentemente substituído por uma esfera tangente de raio apropriado, designada por *esfera local*.

2.2.1. Os Data Geodésicos

Em Geodesia, a expressão *datum geodésico* é utilizada para designar o conjunto dos parâmetros que constituem a referência de um determinado sistema de coordenadas geográficas, designadamente, o elipsóide de referência, definido através das medidas do semi-eixo maior e do semi-eixo menor, e a sua posição relativamente ao globo terrestre.

Existem dois tipos de *data geodésicos*:

- os *data* locais, nos quais a posição do elipsóide de referência é estabelecida através da latitude, longitude, altitude de um ponto de fixação, bem como de um azimute medido, a partir deste, para uma outra posição;
- e os *data* globais ou absolutos, cuja posição é escolhida de modo a, tanto quanto possível, fazer coincidir o centro da massa da Terra com o centro geométrico do elipsóide e o eixo da Terra com o eixo menor do elipsóide.

Os primeiros, normalmente estabelecidos pelas autoridades geodésicas ou cartográficas nacionais, são utilizados para a cobertura geodésica de países ou regiões, minimizando localmente as distâncias entre o elipsóide e o geóide; os segundos, em geral, estabelecidos por grandes países ou organizações supranacionais, destinam-se a servir de suporte a sistemas geodésicos, cartográficos ou de posicionamento globais e procuram minimizar as diferenças entre o elipsóide de referência e o geóide, em todo o globo. A Tabela 2.1 apresenta informação relativa a alguns *data* geodésicos utilizados em Portugal.

Tabela 2.1 – Data geodésicos utilizados em Portugal.

Designação comum	Elipsóide	Ponto de fixação	Utilização actual
Datum Puissant-Lisboa	Puissant	Castelo de S. Jorge	-
Datum Lisboa	Hayford	Castelo de S. Jorge	Cartografia topográfica e hidrográfica do continente
Datum 73	Hayford	Melriça	Topografia, cartografia e ortofotocartografia mais recente
Datum Porto Santo	Hayford	Porto Santo	Arquipélago da Madeira
Datum Base SW	Hayford	Base SW (Ilha Graciosa)	Arquipélago dos Açores, Grupo Central
Datum Selvagens	Clarke	Marco Astronómico (Selvagem Grande)	Cartografia náutica das Ilhas Selvagens
Datum Europeu ED50	Hayford	Potsdam (Alemanha)	Geodesia e Topografia, cartografia náutica do continente
WGS84	Hayford	Não tem (<i>datum</i> global)	Geodesia, sistemas de posicionamento globais

2.2.2. Rede Geodésica

Para além da determinação da forma e dimensões da Terra, objectivo principal da Geodesia, uma outra função desempenhada por esta ciência, é a construção das *redes geodésicas*.

Os levantamentos topográficos são apoiados num conjunto de pontos, cujas coordenadas geodésicas, relativas a vários data geodésicos, são conhecidos com rigor. Tal conjunto é representado graficamente por uma malha triangular, designada por rede geodésica, associada ao método utilizado na determinação das coordenadas dos vértices: a triangulação geodésica, que consiste na medição dos ângulos horizontais dos triângulos da malha e na propagação das coordenadas naturais do ponto de fixação do *datum* geodésico. As altitudes dos vértices são, normalmente, determinadas pelo método operativo designado por nivelamento trigonométrico (Figura 2.3).

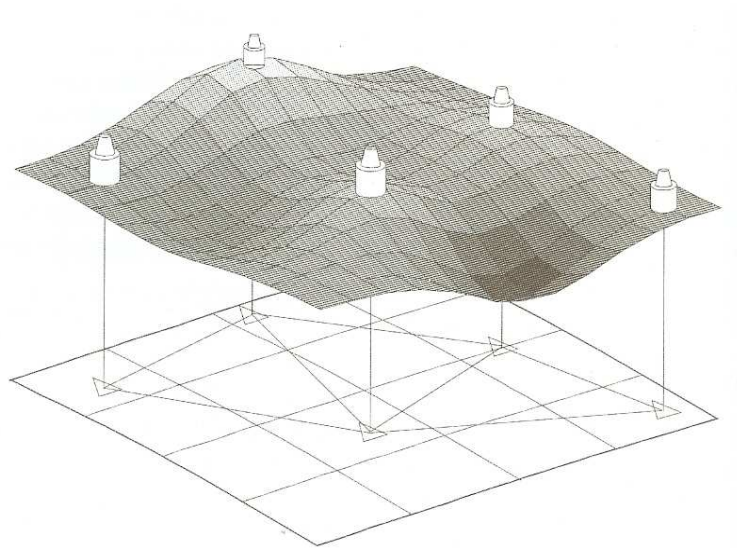


Figura 2.3 – Triangulação de uma rede geodésica no terreno e na superfície de referência (adaptado de Gaspar, 2000).

Por vezes, utiliza-se o termo *esqueleto* geodésico para designar esta malha, particularmente sugestivo, na medida em que ela desempenha um papel de suporte fundamental, como referência necessária a todos os levantamentos que visem a determinação de coordenadas, posições relativas ou dimensões sobre a superfície da Terra.

As redes geodésicas são materializadas, no terreno, por construções em alvenaria designadas por *vértices geodésicos*. Ao atravessar uma região rural, podem-se ver pequenos troncos de cone caídos de branco, normalmente postados no topo das colinas ou sobre os depósitos de água. Estas construções, conhecidas por *bolembreanos*, têm tamanhos e aspectos diferenciados consoante a *ordem* a que pertencem. Alguns deles, em menor número, são grandes pirâmides de secção quadrada, com cerca de 9m de altura, encimadas por outras pirâmides de menores dimensões. O vértice geodésico Melriça (Figura 2.4), situado no concelho de Vila de Rei, distrito de Castelo Branco, que foi construído em 1802, é um exemplo bem observado de um vértice de primeira ordem.

A rede geodésica de Portugal continental, cuja instalação e observação foi iniciada no final do século XVIII e ficou concluída somente em 1888, encontra-se dividida em três “ordens” e é constituída por cerca de oito mil vértices:

- 138 vértices de primeira ordem;
- 894 vértices de segunda ordem;
- 6.988 vértices de terceira ordem;
- Existem ainda várias redes insulares, com 122 vértices na Madeira e 508 vértices nos Açores.

Trata-se dos vértices da chamada rede geodésica *primordial*, ou de *1ª ordem*, que se encontram dispostos numa grande malha triangular, com lados que medem de 30 a 60Km, e cujas coordenadas geográficas são conhecidas com a maior exactidão possível. Esta malha é adensada por uma outra, a rede geodésica de *2ª ordem*, cujos vértices são materializados por cilindros encimados por troncos de cone, ambos com faixas pretas pintadas, e espaçados entre si de distâncias da ordem de 20 a 30Km. A adensar esta malha, está ainda constituída uma rede de *3ª ordem*, cujos vértices são semelhantes aos anteriores, embora não possuam as faixas pretas a envolver os cilindros. Os vértices de 3ª ordem encontram-se espaçados entre 5 e 10Km entre si e são mais numerosos.

A importância das redes geodésicas para a civilização humana é absolutamente preponderante. Delas depende toda a actividade que, de algum modo, utiliza informação georreferenciada, desde a engenharia e ordenamento do território, até às aplicações militares passando, obviamente, pela cartografia.



Figura 2.4 – Vértice geodésico de Melriça (imagem retirada da internet).

2.2.3. Projecções Cartográficas

Resolvido o problema de construir uma superfície de referência e de localizar cada ponto da superfície da Terra sobre ela, importa agora tratar da transformação desse modelo numa superfície plana.

Para conseguir obter uma forma plana da superfície da Terra, será necessário deformá-la ou dividi-la em várias secções. A primeira solução, a deformação da superfície de referência, é empregue em todas as projecções cartográficas, mesmo naquelas em que a segunda também é utilizada. A segunda solução, que consiste em seccionar a superfície de referência em várias parcelas, é utilizada num conjunto variado de projecções com aspecto descontínuo, as chamadas projecções *interrompidas* ou *recentradas*. As deformações inerentes a este processo são tanto menores quanto mais pequenas forem aquelas parcelas. No entanto, tornar as parcelas menores (e, portanto, mais numerosas) implicará forçosamente uma maior dificuldade na interpretação e utilização da carta resultante. Esta dificuldade leva, de facto, a que as projecções interrompidas constituam uma pequena minoria entre as projecções com utilização efectiva.

Projecção cartográfica é, no seu sentido mais geral, uma transformação que faz corresponder a cada ponto P numa superfície de referência um ponto P' no plano. O termo é utilizado, não só para designar este processo de transformação, mas também a sua materialização sobre as cartas, na forma de uma rede de meridianos e paralelos. Uma projecção cartográfica pode ser construída, quer através de métodos puramente geométricos, quer de expressões matemáticas designadas por *fórmulas de transformação*.

A construção de uma projecção cartográfica pode ser considerada como o conjunto de duas operações independentes:

1ª) A redução da superfície de referência cartográfica a dimensões apropriadas, através da aplicação de um factor de redução constante, designado por *escala natural* ou *principal* da projecção;

2ª) Planificação desse modelo reduzido através do processo geométrico ou das fórmulas de transformação característicos da projecção utilizada (Figura 2.5). Assim, dizer por exemplo que uma carta de Mercator tem a escala natural de 1 para 1 milhão, significa que, para construir essa carta, o modelo da Terra foi reduzido um milhão de vezes antes de lhe serem aplicadas as fórmulas de transformação da projecção de Mercator.

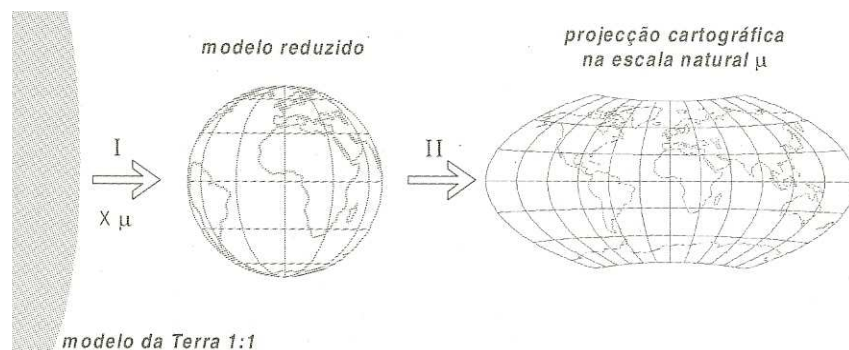


Figura 2.5 – As duas fases de uma projecção cartográfica: em I, a redução do modelo da Terra à escala natural da projecção (μ); em II, a planificação deste modelo reduzido (adaptado de Gaspar, 2000).

Relativamente ao primeiro passo – a redução uniforme da superfície de referência – não envolve qualquer deformação, as posições relativas de todos os pontos são preservadas e a escala natural constitui uma relação constante entre os comprimentos medidos na superfície de referência e na sua versão reduzida.

No caso do segundo passo do processo de construção, uma vez que nem a esfera nem o elipsóide são planificáveis, toda a transformação implicará deformações. Essas deformações irão afectar as propriedades geométricas da superfície de referência alterando, portanto, a forma e as dimensões dos objectos que nela estão projectados, bem como as posições relativas entre eles.

2.2.4. Princípios Geométricos das Projectões Cartográficas

As projectões cartográficas podem classificar-se, de acordo com critérios puramente geométricos, em projectões geométricas, projectões *geométricas* modificadas e projectões convencionais.

Poucas são as projectões cartográficas que se baseiam, exclusivamente, em princípios geométricos de construção. No entanto, uma grande parte das projectões de uso comum apoia-se no conceito de *superfície de projecção*, superfície teórica que é colocada em determinada posição relativamente ao modelo da Terra, e na qual são *projectados* os seus pontos, de acordo com as regras ou princípios a estabelecer.

Assim, é usual agrupar estas projectões cartográficas, ditas *projectões geométricas*, em três grandes *classes*, de acordo com a superfície de projecção em que se baseiam. Em seguida são caracterizadas essas classes, quando o eixo da superfície de superfície de projecção coincide com o eixo do modelo da Terra.

A Figura 2.6 ilustra algumas das formas como um cone, um plano ou um cilindro podem ser ajustados à superfície de referência.

A superfície de projecção pode assumir várias orientações em relação ao eixo da Terra, dando origem às seguintes modalidades ou aspectos:

- Projectões cónicas, quando a superfície de projecção é um cone;
- Projectões azimutais ou planas, quando a superfície de projecção é um plano;
- Projectões cilíndricas, quando a superfície de projecção é um cilindro.

Dentro destas três categorias, as projectões podem ainda ser polares (ou normais), transversais (ou meridianas), ou oblíquas, dependendo do posicionamento do eixo da Terra relativamente ao plano de projecção.

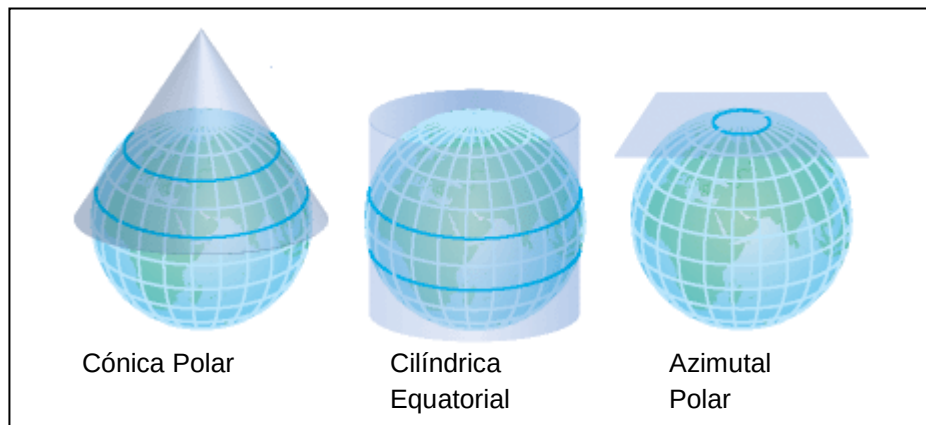


Figura 2.6 – Alguns exemplos de projecções geométricas.

2.3. SISTEMAS DE COORDENADAS

Um sistema de coordenadas é um meio de referenciar posições no espaço através de medidas de comprimento, de ângulos, ou de ambos, tomadas a partir de origens determinadas.

2.3.1. Coordenadas Planas ou Rectangulares

Um sistema de coordenadas planas é todo aquele que se destina a referenciar posições sobre uma superfície plana. Destes salientam-se os sistemas de coordenadas rectangulares, e os sistemas de coordenadas polares, ambos com vasta utilidade em cartografia, topografia e navegação.

Um sistema de coordenadas cartesianas rectangulares planas ou, simplesmente, um sistema de *coordenadas rectangulares*, é todo aquele que utiliza duas medidas de distância rectilínea a dois eixos perpendiculares entre si, denominados *eixos coordenados*, para referenciar a posição de um ponto. A Figura 2.7 mostra dois eixos coordenados XX' (x-axis) e YY' (y-axis), que se intersectam na origem segundo um ângulo recto, e um ponto genérico, representado por uma circunferência azul, que se pretende referenciar. Chama-se coordenada x , ou *abscissa*, à distância medida sobre o eixo XX' entre a origem e o ponto e a projecção ortogonal desse ponto sobre XX' ; e coordenada y , ou *ordenada*, à distância medida sobre YY' entre a origem e a projecção ortogonal do ponto sobre YY' . As coordenadas da origem serão, por conseguinte, $x_0=0$ e $y_0=0$.

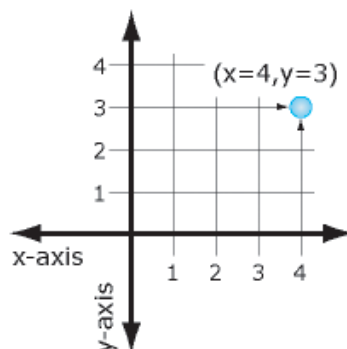


Figura 2.7 – Exemplo da marcação de um ponto (4,3) no sistema de coordenadas cartesiano.

2.3.2. Coordenadas Polares

As coordenadas polares são uma forma alternativa de referenciar posições no plano, através de uma distância e de um ângulo. Enquanto no sistema de coordenadas rectangulares se utilizam dois eixos coordenados, no sistema de coordenadas polares utiliza-se um único, designado por *eixo polar*. Um ponto P no plano é, assim, referenciado através de uma distância ρ à origem ou *pólo*, do eixo polar (O), e de um ângulo θ , formado entre o eixo polar e a linha OP , designada por um *raio vector* (Figura 2.8).

A orientação do eixo polar e o sentido de medição dos ângulos são variáveis com o propósito do sistema e com o âmbito em que este é utilizado.

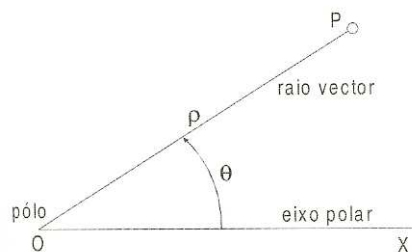


Figura 2.8 – Sistema de coordenadas polares (adaptado de Gaspar, 2000).

Enquanto as coordenadas rectangulares constituem um sistema natural na definição e construção das projecções cartográficas, em que os meridianos e os paralelos são rectilíneos e perpendiculares entre si, as coordenadas polares são mais apropriadas ao estudo e utilização das projecções cónicas e azimutais, em que os meridianos são rectilíneos e concorrentes num ponto, e os paralelos são circunferências concêntricas nesse mesmo ponto.

2.4. A GEOMETRIA DA ESFERA E AS SUAS COORDENADAS GEOGRÁFICAS

A esfera é uma figura geométrica sólida que goza da propriedade de todos os pontos da sua superfície serem equidistantes do centro, o que é equivalente a dizer que o seu raio de curvatura é constante.

Quando um plano intersecta uma esfera, a figura resultante dessa intersecção é sempre um círculo: *círculo máximo*, quando o plano contém o centro da esfera; *círculo menor*, quando não o contém.

A Figura 2.9 ilustra vários tipos de linhas sobre um modelo esférico da Terra. Designa-se por *equador* o círculo máximo que é perpendicular ao eixo de rotação da Terra, intersectando a superfície em dois pólos geográficos: o *Pólo Norte* e o *Pólo Sul*. *Meridianos* são círculos máximos que contêm ambos os pólos geográficos sendo, portanto, perpendiculares ao equador. *Paralelos* são círculos menores perpendiculares ao eixo de rotação da Terra e a todos os meridianos sendo, portanto, paralelos ao equador. O raio r dos paralelos varia entre um valor máximo igual ao valor do raio da Terra, no equador, e um valor nulo nos pólos.

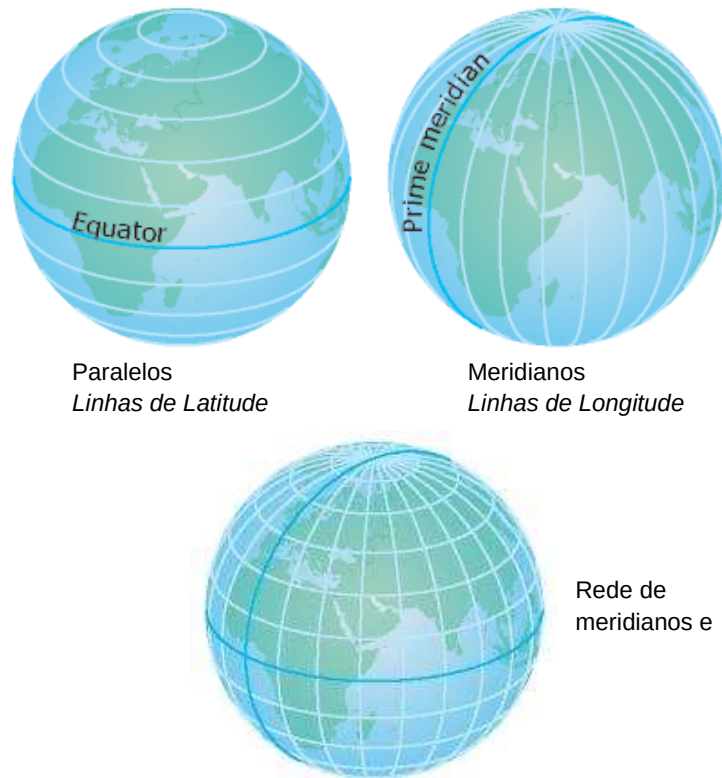


Figura 2.9 – Esquematisação dos paralelos e meridianos na superfície terrestre.

Quando se utiliza a esfera como modelo, o sistema de coordenadas geográficas é idêntico àquele que, em matemática, se designa por sistema de *coordenadas esféricas polares*, no qual a posição de um ponto no espaço tridimensional é definida através de dois ângulos e uma distância. Uma vez que todos os pontos à superfície do modelo esférico da Terra são equidistantes do centro, bastarão, neste caso, dois ângulos para definir a sua posição. Os ângulos utilizados para exprimir as coordenadas geográficas medem-se em graus ($^{\circ}$), minutos ($'$) e segundos ($''$), valendo cada grau 60 minutos e cada minuto 60 segundos.

Chama-se *latitude* φ de um lugar, sobre o modelo esférico da Terra, ao ângulo que o raio que passa por esse lugar faz com o plano do equador. Devido ao facto de o raio de curvatura da esfera ser constante, a latitude pode ser também definida como a medida do arco do meridiano entre o equador e o lugar, expressa em unidades angulares. A latitude dos lugares à superfície da Terra mede-se para norte e para sul do equador, variando entre noventa graus sul (90°S), no Pólo Sul, e noventa graus norte (90°N), no Pólo Norte. A latitude no equador é igual a 0° .

Chama-se *longitude* λ de um lugar ao ângulo entre o plano do meridiano desse lugar e o plano de um meridiano tomado como referência. A longitude é também, frequentemente, definida como a medida do arco de equador entre o semi-meridiano superior do lugar e o semi-meridiano superior tomado como referência, expressa em unidades angulares. A longitude mede-se de 0 a 180° , para leste e para oeste desse meridiano de referência que é, por convenção internacional, o meridiano de Greenwich.

Apesar da latitude e longitude poderem localizar posições exactas na superfície do globo terrestre (Figura 2.10), não são unidades de medida uniformes. Apenas ao longo do Equador é que a distância representada por um grau de longitude se aproxima da distância representada por um grau de latitude. Isto deve-se ao facto do Equador ser o único paralelo tão grande como um meridiano.

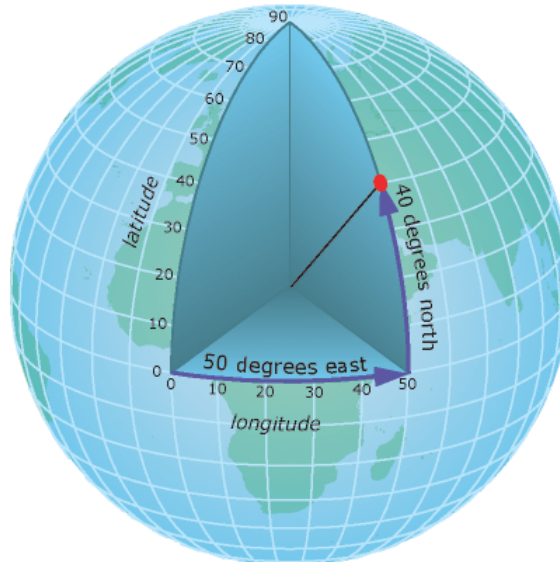


Figura 2.10 – Esquematização da latitude e longitude na superfície terrestre.

2.5. A GEOMETRIA DO ELIPSÓIDE E AS SUAS COORDENADAS GEOGRÁFICAS

O elipsóide de revolução é a figura resultante da rotação de uma elipse em torno de um dos seus eixos. Os elipsóides utilizados como modelos da Terra resultam da rotação de uma elipse, dita *elipse meridiana*, em torno do seu eixo menor, o qual representa o eixo de rotação da Terra (Figura 2.11). Um elipsóide pode ser definido de forma inequívoca através de dois parâmetros, que são os valores do semi-eixo maior, a , e do semi-eixo menor, b , da elipse meridiana.

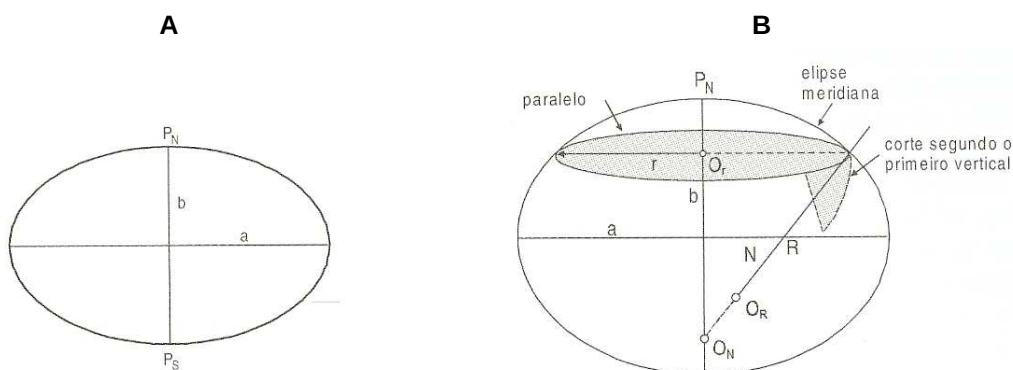


Figura 2.11 – A: Elipse meridiana; B: Raios e centros de curvatura segundo o meridiano (R e O_R), segundo o primeiro vertical (N e O_N) e segundo o paralelo (r e O_R).

Outros parâmetros de utilização comum, definidos pelas expressões que se seguem, são o *achatamento* (μ) e a *excentricidade* (e), ambos caracterizadores do maior ou menor grau de “elipicidade” da figura.

Ao contrário da superfície esférica, cujo raio de curvatura é constante, o elipsóide de revolução tem graus de curvatura variáveis, quer com a posição, quer com a direcção considerada. Os raios de curvatura que interessa aqui considerar são o *raio de curvatura da elipse meridiana*, R , definido no plano do meridiano, e o *raio de curvatura segundo o primeiro vertical*, N , definido num plano que é perpendicular ao plano do meridiano e à elipse meridiana.

Ambos os raios de curvatura variam com a latitude e são, geralmente, diferentes entre si. Com excepção do caso particular dos pólos, sobre os quais R e N têm o mesmo valor.

As definições de *equador*, *meridiano* e *paralelo* são, no elipsóide, semelhantes às da esfera, salvaguardando o facto de, no elipsóide, o plano do meridiano intersectar a superfície segundo uma elipse. A geometria do elipsóide é, contudo, consideravelmente mais complexa, do que resulta uma maior dificuldade na determinação de ângulos e distâncias. Uma diferença significativa é a que diz respeito ao caminho mais curto entre dois pontos, ou *geodésica*. No elipsóide, ao contrário do que acontece na esfera, a geodésica não é um arco de circunferência, nem sequer está contida na intersecção de um plano que passa pelo centro com a superfície. Em geral é uma linha torça, isto é, não pode ser assente em nenhum plano.

As coordenadas geográficas *latitude* e *longitude* são também definidas no elipsóide, sob o nome de *latitude geodésica* e de *longitude geodésica* (Figura 2.12). Contudo, a definição de latitude terá, neste caso, de ser reformulada devido ao facto de os meridianos serem elípticos.

Chama-se *latitude geodésica* de um lugar ao ângulo formado entre a normal ao elipsóide nesse lugar e o plano do equador. Um outro parâmetro por vezes utilizado é a *latitude geocêntrica*, Ψ , definida como o ângulo entre o plano do equador e a linha que une o centro do elipsóide com a posição à superfície.

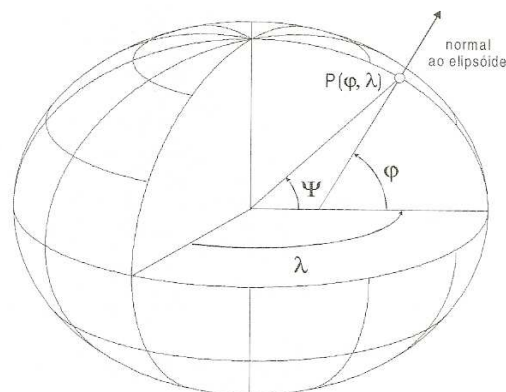


Figura 2.12 – As coordenadas geográficas no elipsóide: φ é a latitude geodésica, Ψ é a latitude geocêntrica e λ é a longitude.

2.6. SISTEMAS DE REFERENCIAÇÃO

O sistema de coordenadas geográficas, latitude e longitude, não é a única forma de referenciar posições à superfície da Terra. Outros sistemas há que o complementam ou substituem, por vezes com vantagens. Serão considerados dois grandes grupos: as grades geográficas e as quadrículas cartográficas.

2.6.1. Grades Geográficas

Grade geográfica é todo o sistema destinado a referenciar e designar áreas e posições à superfície da Terra, com base na rede de meridianos e paralelos. De entre a grande variedade de grades geográficas utilizadas por organizações internacionais ou nacionais, somente serão referidas as universais, designadas por sistemas GEOREF e UTM.

2.6.1.1. Sistema GEOREF

O sistema *GEOREF* (*World Geographic Reference System*) é uma grade geográfica constituída por uma malha de meridianos e paralelos que divide a Terra em quadriláteros de 15° de latitude por 15° de longitude, designados por *áreas*. O sistema GEOREF foi concebido para ser utilizado em operações militares, estando, contudo, difundido noutras áreas de actividade.

2.6.1.2. Grade geográfica UTM

O sistema *UTM* (*Universal Transverse Mercator*) é, na realidade, um sistema que utiliza ambos os conceitos aqui apresentados, o de grade geográfica e o de quadrícula cartográfica. A Terra é dividida em 60 fusos representados na projecção UTM, sobre esta representação é estabelecido um sistema de coordenadas rectangulares. Os fusos são, por sua vez, subdivididos em *zonas* com 8° de extensão em latitude, identificados por uma letra. Em cada zona é constituída uma quadrícula básica, com quadrados de 100Km de lado, designados por um conjunto de duas letras.

A referenciação das posições no sistema UTM é feita através de duas coordenadas rectangulares, X e Y, e pela designação do fuso a que pertencem.

2.6.2. Quadrículas Cartográficas

Quadrícula cartográfica é um sistema de coordenadas rectangulares, que se sobrepõe a determinada projecção cartográfica, com o intuito de facilitar a leitura e a marcação de posições, e o cálculo de azimutes e distâncias.

As quadrículas são, na prática, constituídas por uma malha quadrada de *meridianas* (linhas de abscissa constante) e de *paralelas* (linhas de ordenada constante), que se sobrepõe a uma projecção cartográfica, de modo a que o eixo das ordenadas (designado por *meridiana origem*)

coincida com o meridiano central da projecção, e o eixo das abcissas (designado por *perpendicular origem*) lhe seja normal num ponto designado por *Ponto Central* da quadrícula.

2.6.3. Sistemas de projecção

Para a construção de uma carta é necessário definir qual a projecção cartográfica a utilizar, qual o datum geodésico a que as coordenadas geográficas se referem, e a quadrícula cartográfica que será implantada. Chama-se sistema de projecção aos parâmetros que, associados a uma determinada projecção cartográfica, estabelecem inequivocamente as coordenadas geodésicas e cartográficas dos lugares representados numa carta. Esses parâmetros são os seguintes:

- O *datum* geodésico, incluindo a definição da superfície de referência e as coordenadas do seu *ponto de fixação*;
- O Ponto Central (PC) da quadrícula cartográfica, definido pelo cruzamento da meridiana origem e da perpendicular origem;
- A origem das coordenadas cartográficas, nem sempre coincidentes com o PC;
- A localização das linhas padrão ou, em alguns sistemas, o valor módulo linear sobre o meridiano central (ou *factor de escala*).

Nas cartas topográficas publicadas em Portugal têm sido utilizados diferentes sistemas de projecção (Figura 2.13).

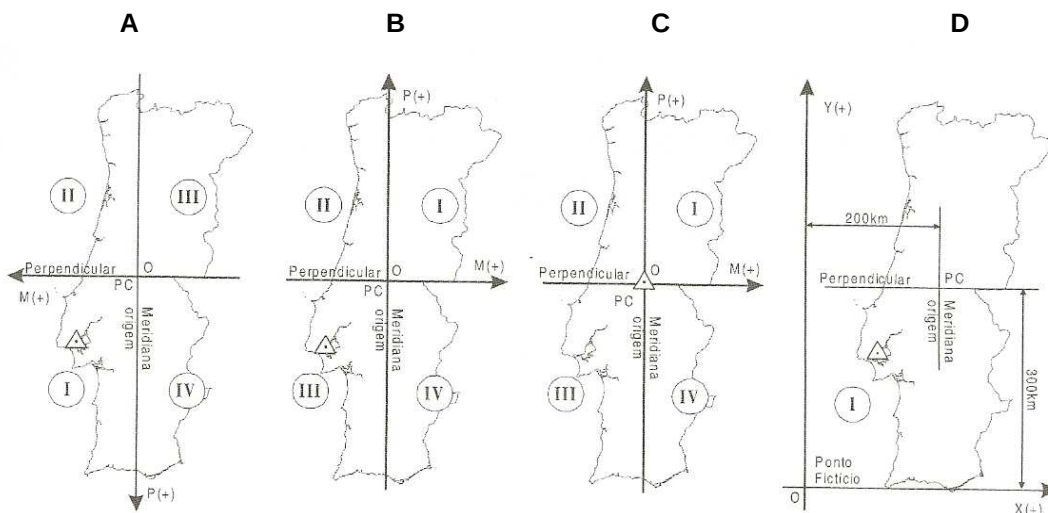


Figura 2.13 – Sistemas de projecção utilizados no território do continente: A, *Bessel-Bonne-Lisboa*, *Hayford-Gauss-Lisboa*; C, *Hayford-Gauss-Melriça*; e D, *Hayford-Gauss-Militar*. PC designa o Ponto Central da projecção, o triângulo assinala o ponto de fixação do *datum*, a letra O designa a origem das coordenadas cartográficas; os números I a IV identificam os quadrantes em cada sistema.

2.7. A CARTOGRAFIA PORTUGUESA ACTUAL

Existem três instituições em Portugal com atribuições legais no âmbito da produção cartográfica: o Instituto Português de Cartografia e Cadastro, IPCC (ex-Instituto Geográfico e Cadastral), o Instituto Geográfico do Exército, IGeoE (ex-Serviço Cartográfico do Exército) e o Instituto Hidrográfico.

O IPCC é o organismo público responsável pela satisfação das necessidades fundamentais do país em matéria de informação geográfica de base, para instituições civis, nos domínios da Geodesia, Cartografia e Cadastro. Produz cartas topográficas e ortofotocartografia em escalas compreendidas entre 1:10 000 e 1:2 500 000.

O IGeoE é o organismo do Exército Português ao qual está atribuída a cobertura topográfica militar do país. Produz cartas topográficas e ortofotocartografia em escalas compreendidas entre 1:10 000 e 1:2 500 000. O seu principal produto, a Carta Militar de Portugal na escala 1:25 000, é ainda a principal carta topográfica do território nacional. O IGeoE foi o primeiro instituto cartográfico português a automatizar a sua produção.

O IH é um organismo da Marinha Portuguesa, ao qual está atribuída a produção da cartografia hidrográfica de base nacional e da cartografia náutica respeitante às áreas marítimas de interesse nacional.

CAPÍTULO 3

SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

3.1. INTRODUÇÃO

Foram sugeridas muitas definições para os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ao longo dos anos, mas nenhuma delas é inteiramente satisfatória. Actualmente o termo SIG está associado a muitas coisas: entre elas, a um produto de software que se pode adquirir para levar a cabo certas funções bem definidas (software SIG); representações digitais de vários aspectos do mundo geográfico, na forma de bases de dados (dados SIG); uma comunidade de pessoas que utiliza estas ferramentas para variados propósitos (a comunidade SIG); e a actividade de utilizar um SIG para solucionar problemas ou ciência avançada. O termo básico funciona em todas estas formas, e o seu significado depende certamente do contexto em que é utilizado.

Algumas definições são particularmente úteis (Tabela 3.1). Dizer que SIG é uma base de mapas na forma digital, é uma definição particularmente útil para dar a alguém que procura uma explicação simples. Os SIG são também uma ferramenta computacional para solucionar problemas geográficos, esta é uma definição que se refere mais ao propósito dos SIG do que à sua função ou forma física – uma ideia que é expressa numa outra definição, um sistema espacial de suporte à decisão.

Tabela 3.1 – Definições de SIG e acordo com os grupos utilizadores.

Definição	Grupo
Uma base de mapas em forma digital	O público em geral
Uma ferramenta computacional para solucionar problemas geográficos	Pessoas com poder de decisão, grupos comunitários, planeamento
Um sistema espacial de suporte à decisão	Cientistas em postos de gestão, investigadores de operações
Um inventário mecanizado de características e instalações geograficamente distribuídas	Gestores de instalações, oficiais de transportes, gestores de recursos
Uma ferramenta para revelar o que seria invisível na informação geográfica	Cientistas, investigadores
Uma ferramenta para fazer operações nos dados geográficos que são demasiado caras, entediantes, ou pouco precisas se forem executadas manualmente	Gestores de recursos, planeamento, cartografia

Na sua forma mais habitual pode-se definir o termo SIG como os sistemas de informação que permitem realizar operações de análise espacial com dados georreferenciados, ou seja, dados referenciados em relação à superfície da terra. Este termo tem sido objecto de várias definições por parte de diferentes autores. Estas diferentes definições privilegiam determinadas características em detrimento de outras, apontando também para a multidisciplinaridade dos SIG. Um SIG pode ser definido como um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georreferenciados (Aronoff, 1989) ou como um sistema de suporte à decisão que integra dados referenciados espacialmente num ambiente de respostas a problemas (Cowen, 1988).

Relativamente à cartografia tradicional, os Sistemas de Informação Geográfica introduziram a capacidade 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 à investigação baseada na obtenção de dados cruzados (Goodchild, 2005).

Só a partir de 1960, com a introdução de computadores digitais, é que os métodos conceptuais de análise espacial tiveram verdadeiras possibilidades de se desenvolver. Nessa época destaca-se o *Canada Geographic Information System* (CGIS). Estes pioneiros, embora com potenciais vantagens na manipulação de informação geográfica, apresentavam problemas decorrentes da falta de equipamento informático adequado para suportar o elevado volume de processamento requerido para operações de informação geográfica (Matos, 2001).

Já na década de 80, surgem os primeiros SIG comerciais, que ofereciam a possibilidade de cálculo de simples medidas de área e comprimento, transformação do formato de dados, análises estatísticas simples, 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 (Melo e Silva, 2008).

A Figura 3.1 mostra a evolução que houve a partir do desenvolvimento em paralelo de várias áreas do saber de aplicações computacionais para o registo e a análise do espaço.

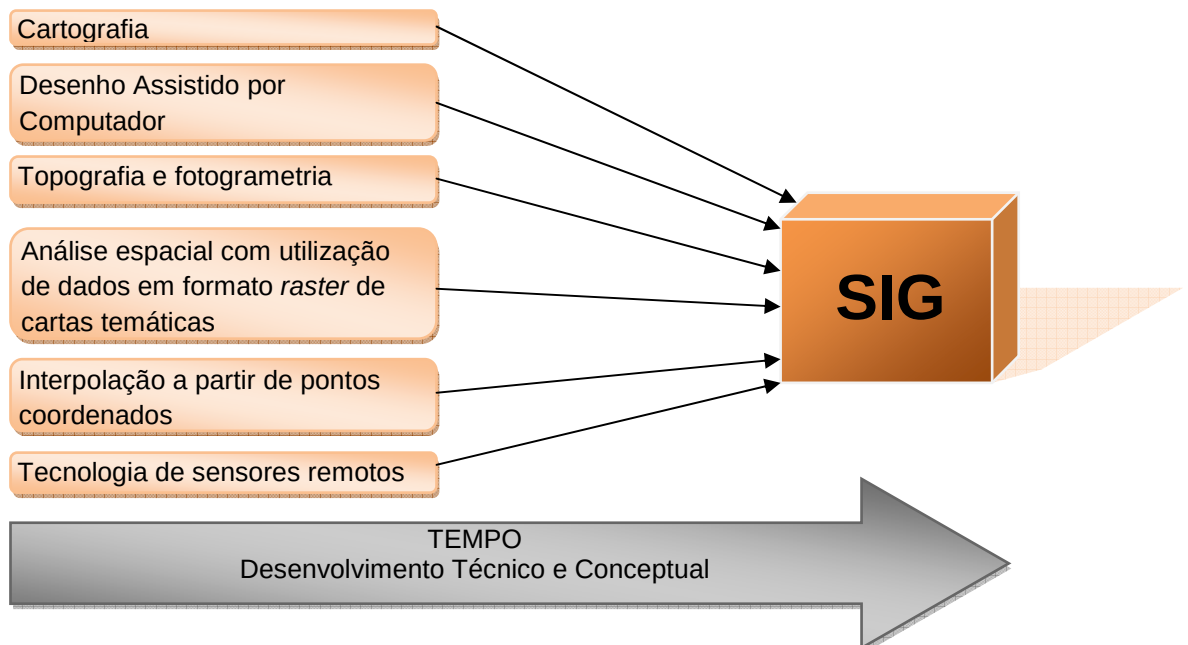


Figura 3.1 – Evolução dos SIG a partir de várias áreas do saber de aplicações computacionais para o registo e análise do espaço (adaptado de Burrough, 1986).

Para poder definir os SIG é importante estabelecer a relação entre estes sistemas e os outros sistemas computacionais, nomeadamente, o desenho assistido por computador (CAD), a cartografia automática, a gestão de bases de dados e a detecção remota. Assim, é muitas vezes

afirmado que os SIG são um subconjunto ou super conjunto de todos estes sistemas (Maguire, 1991). A Figura 3.2 exemplifica a relação entre os SIG e os outros sistemas.

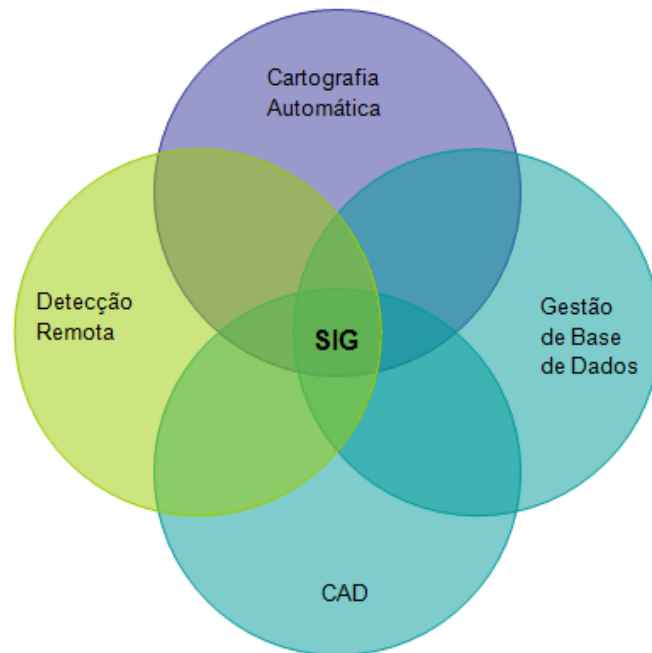


Figura 3.2 – Relação entre os SIG e os outros sistemas (adaptado de Maguire, 1991).

Os SIG têm sofrido uma evolução significativa com a possibilidade de obtenção da informação digital através da internet para qualquer tipo de utilizador, e com o surgimento de aplicações que ultrapassam em muito a noção original de um assistente digital para o desempenho de tarefas meramente morosas e repetitivas. Assim, os SIG adquirem um novo estatuto, tratando-se de uma forma privilegiada de trabalhar a informação, com recurso a extensões cada vez mais desenvolvidas como a análise espacial que, de acordo com Goodchild, se pode definir como um conjunto de métodos pelos quais um operador de SIG adiciona valor à informação, tornando visível algo que de outro modo não o seria para outro utilizador dessa mesma base de dados.

Assim, os SIG adquirem um novo estatuto, tratando-se de uma forma privilegiada de trabalhar a informação, com recurso a extensões cada vez mais desenvolvidas como a análise espacial que, de acordo com Goodchild, se pode definir como um conjunto de métodos pelos quais um operador de SIG adiciona valor à informação, tornando visível algo que de outro modo não o seria para outro utilizador dessa mesma base de dados.

3.2. MODELAÇÃO DE DADOS

3.2.1. Dados Alfanuméricos

Num Sistema de Informação Geográfica, a informação do mundo real (que pode assumir diversas formas, dependendo do modo como é capturada e da forma de onde provém), depois de capturada, é armazenada, manuseada e actualizada, constituindo, assim, o que nós chamamos de base de dados.

Segundo R.G. Healey (1991), uma base de dados é uma colecção de um ou mais ficheiros de dados ou matrizes que estão armazenadas segundo uma estrutura que permite o manuseamento das relações existentes entre esses elementos, ou conjuntos de dados, através de um Sistema de Gestão de Bases de Dados (SGBD). Assim, os programas que permitem definir, aceder e actualizar a informação da base de dados são apelidados de SGBD. Estes programas têm vindo a conquistar uma crescente importância no desenvolvimento dos SIG: são cada vez mais utilizados para manusear dados cartográficos digitais e oferecem, cada vez mais, uma maior interactividade com os utilizadores (linguagens mais transparentes e amigáveis que dão uma maior facilidade de uso aos utilizadores, possibilitando-lhes realizar inquéritos às bases de dados e obter as correspondentes respostas).

As vantagens da utilização de bases de dados digitais são:

- Diminuição de redundância (aumenta a integridade e diminui o espaço ocupado);
- Partilha de informação;
- Controlo centralizado (mantém padrões de qualidade, integridade, segurança e gere a concorrência);
- Facilidade na implementação de novas aplicações;
- Acesso directo dos utilizadores (a utilização de “linguagens de inquérito” pelos utilizadores finais permite o acesso à informação por parte de utilizadores sem grandes conhecimentos informáticos. No entanto, é mantido o controlo dos acessos e manipulação de dados, conservando-se a consistência e protegendo-se a integridade);
- Independência entre dados e processos (os utilizadores e respectivos programas são independentes da estrutura lógica e da estrutura física da base de dados. Isto significa que quaisquer alterações à estrutura lógica – novos campos, novas tabelas, etc. – ou física – armazenamento – da base de dados, deixa inalteráveis os programas).

As desvantagens são:

- Custo (este software acarreta normalmente grandes custos, sobretudo na manutenção);
- Maior complexidade (pode levar a maior dificuldade na recuperação. No entanto, os SGBD actuais tendem a incorporar sistemas de recuperação e de backup).
- Risco centralizado (existe, teoricamente, um maior risco de perda ou corrupção da informação durante a sua utilização pelas aplicações, risco este minimizado pelas ferramentas de recuperação contra um mau funcionamento dos programas, utilizadores, máquinas ou comunicações incluídas nos SGBD).

3.2.2. Dados Geográficos

Não só a estrutura através da qual o Homem compreende os fenómenos geográficos não é a mesma da dos computadores, como também a forma como os dados geográficos são visualizados

pelo utilizador não é, na maior parte dos casos, aquela que é mais eficiente para estruturar a base de dados do computador. Para além disso, os dados têm de ser escritos e armazenados em dispositivos magnéticos que necessitam de ser endereçados de uma forma específica.

Os dois principais modelos que são empregues para estruturar os dados espaciais num Sistema de Informação geográfica são: o modelo *raster* e o modelo vectorial.

3.2.2.1 Modelo Raster

No modelo *raster*, cada ponto da matriz inicial (unidade elementar de informação) é designado por *pixel*, termo que resulta da expressão “picture element”. Cada *pixel* pode possuir várias características. No caso de ter apenas um bit de informação, apenas um dos valores é possível – ligado ou desligado. Se tiver mais do que um bit, são possíveis mais atributos – cor, brilho, etc. As figuras ou formas espaciais são, assim, representadas através de um conjunto de *pixels* numa matriz e o computador sabe que esse determinado conjunto de *pixels* representa um determinado objecto, através de um atributo dado a cada um deles (um valor de código).

Ora, a dimensão da célula (conjunto de *pixels*) que representa a forma espacial (informação) pode variar – no caso das imagens captadas pelo satélite *LANDSAT V*, a um quadrado no terreno com 30x30 metros corresponde uma única informação, ou seja, a cada célula corresponde uma área real de 30x30 metros, 0,3 milímetros na escala 1:100 000. Aqui, estamos a falar da capacidade de resolução do satélite (que só consegue trabalhar unidades com um mínimo de 30x30).

Deste modo, no modelo *raster* (modelo de dados em quadrícula) cada célula corresponde à resolução espacial (medida no terreno) da unidade mínima em que foi dividida a região aquando da sobreposição da quadrícula, sendo o seu limite mínimo o tamanho de um *pixel*. Também, cada tema ou entidade tem como forma de representação a totalidade do espaço modelado, que está dividido em células, podendo os valores associados a cada elemento variar consoante as condições que se verificam no interior de cada uma das respectivas células em relação ao tema ou entidade representada. A cada tema distinto corresponderá uma matriz diferente. Este modelo pode ser adoptado na manipulação de informação obtida por sensores remotos (imagens satélite, fotografias aéreas) ou quando se pretende analisar a variabilidade de determinado fenómeno, pois permite uma representação em *dégradé* (tipos de análise espacial que envolvem funções de espalhamento – *spread*). Em tais tipos de utilização, pode-se tentar explorar as vantagens da simplificação da estrutura da informação inerente ao modelo *raster* (embora o processamento dessa informação seja mais pesado) e, assim, obter uma elevada eficácia na condução da análise.

Este tipo de estrutura de dados é fácil de tratar no computador, pois é com grande facilidade que se consegue armazenar, manipular e visualizar conjuntos de matrizes de linhas e colunas de *pixels*. Esta estrutura de dados também significa que a superfície bidimensional sobre a qual os dados geográficos são representados não é contínua, isto é, os fenómenos geográficos são representados através de um grupo de *pixels* com o atributo desse fenómeno e, portanto, esse

fenómeno geográfico não é reconhecido como uma entidade. Tal facto pode ter uma grande importância para a estimativa de comprimento e áreas quando os *pixels* da sua matriz são de um tamanho excessivo em relação aos elementos que pretendem representar (Neto, 1998).

Por causa das discrepâncias que podem surgir devido à falta de precisão associada ao tamanho do *pixel*, em certas áreas como, por exemplo, a do processamento de imagens digitais, assume-se que as superfícies quantificadas podem ser tratadas como superfícies contínuas, de modo a permitir que as funções matemáticas com derivadas possam ser empregues (Burrough, 1986).

Importa referir que nos SIG com base *raster* está implícita a topologia das entidades representadas. Assim, algumas das operações de análise espacial que se desenvolvem com estes instrumentos são executadas em condições de grande eficácia, recorrendo às relações entre os dados contidos nas tabelas que definem a topologia da informação armazenada, sem necessidade de cálculos baseados nas coordenadas geográficas que definem as respectivas entidades espaciais.

3.2.2.2 Modelo vectorial

Os modelos vectoriais convencionais, utilizando-se este adjectivo no sentido em que reproduzem no essencial o modelo conceptual da cartografia impressa, são bidimensionais e compostos por objectos estáticos e com fronteiras bem definidas. A utilização de uma terceira dimensão torna-se possível mediante projecção no espaço bidimensional e representação com recurso a objectos bidimensionais.

O elemento básico da representação vectorial é o ponto, definido pelas suas coordenadas cartesianas. As linhas existem como linhas poligonais geradas a partir de uma sequência de pontos.

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, 1994).

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.

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).

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.

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.

3.3 GEORREFERENCIAÇÃO

Todos os elementos num mapa têm uma localização geográfica e extensão específicas que lhes permitem localizarem-se na superfície terrestre ou perto (Figura 3.3). A capacidade de atribuir um sistema de coordenadas a estes elementos é crítica tanto em mapeamento como em SIG. Este processo é denominado georreferenciação.

Ao contrário de outros tipos de dados que são tratados habitualmente pelos modernos sistemas de informação, os dados georreferenciados são um pouco mais complicados. A razão deste facto está na necessidade de eles incluírem informação acerca da sua posição, possíveis ligações topológicas e atributos das entidades que apresentam. Assim, esta informação, para além de estar relacionada com localizações específicas, é também composta por espaços bem

delimitados e definidos geograficamente (entidades), dados alfanuméricos, textos e atributos que os caracterizam.

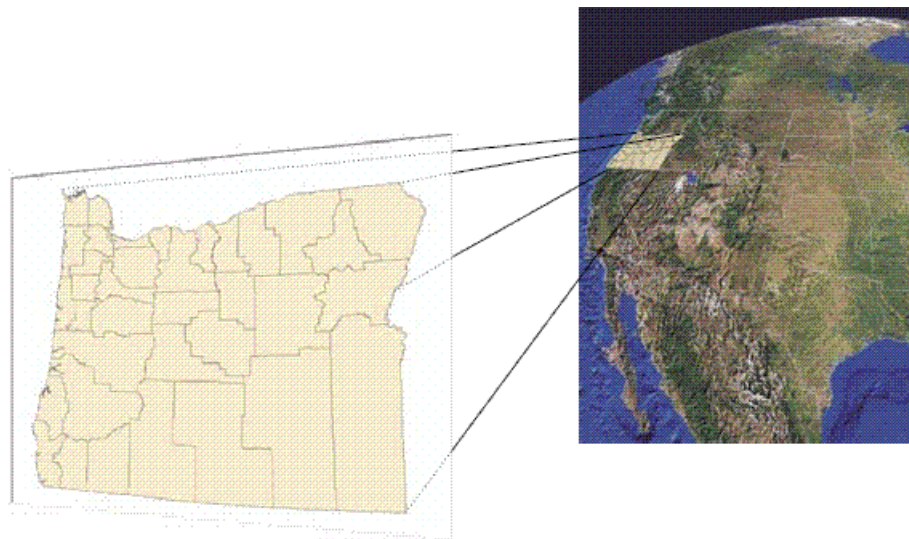


Figura 3.3 – Esquema da localização de mapas relativamente à superfície terrestre.

Podemos, na verdade, afirmar que a informação geográfica é composta por quatro elementos principais: a posição geográfica, os atributos, as relações espaciais e o tempo.

Esta característica da informação geográfica pode ser apelidada de atributos de primeiro nível, visto que é criada automaticamente pelo SIG. Assim, ela é referenciada pela sua localização na superfície terrestre através de um sistema de coordenadas padrão. Cada fenómeno tem uma localização que deve ser muito complexa, porque os fenómenos geográficos têm tendência para tomarem padrões complicados e irregulares.

Outra das características dos dados geográficos são os seus atributos de segundo nível, ou seja, aqueles que são da iniciativa do utilizador do sistema. A informação cartográfica tradicional inclui, em primeiro lugar, um conjunto de dados obrigatórios, considerados comuns a qualquer sistema de georreferenciação e que, por isso, são designados por informações básicas (divisões políticas, hidrografia, rede de estradas, etc.). Em segundo lugar, e para além destes dados básicos, há que incluir a representação do mundo vasto das informações temáticas correspondentes às múltiplas áreas do conhecimento. Estão incluídas, aqui, a localização no espaço de múltiplos objectos que podem ser conjuntos de pessoas, de bens, de actividades ou de simples entidades mais raras e notáveis, bem como as suas características: distribuição de infra-estruturas, dos edifícios, dos transportes, das características e usos do solo, da riqueza, do emprego, entre outros.

As relações espaciais entre os fenómenos, ou entidades geográficas, são outra das características principais dos dados georreferenciados. Estas relações não só são de uma grande importância – é crucial saber, por exemplo, a localização de um determinado rio de caudal variável e também a que distância desse rio se encontram localizadas as habitações para poder avaliar o

perigo de uma eventual cheia – como podem ser complexas e numerosas. Estas relações são referidas no SIG como a topologia dos seus elementos geográficos e é através da informação topológica explícita do modelo adoptado que é possível inferir as relações espaciais de vizinhança, hierarquia, etc.

A informação geográfica é sempre referente a um determinado ponto ou período de tempo. Ora, ter conhecimento sobre em que altura foram os dados geográficos recolhidos pode ser crítico para a utilização apropriada desses dados. Assim, é necessário estar atento à dinâmica dos fenómenos representados pelos dados geográficos e conseguir realizar as necessárias actualizações, quando tal seja necessário. Por exemplo, determinadas zonas urbanas são, por natureza, áreas onde ocorrem constantes mudanças e é necessário actualizar os dados do sistema, de forma a constituir um verdadeiro sistema de apoio à tomada de decisões e à gestão actualizada da zona urbana em causa.

A informação histórica também pode ser importante. Por exemplo, saber a localização geográfica anterior de uma série de fenómenos urbanos (traçados de vias, serviços, população, etc.) é essencial para a análise da evolução desse tecido urbano. Importa aqui, referir que a representação do tempo num SIG constitui um nível de complexidade acrescido e que, por isso, ele nem sempre tem sido tratado com a desejável profundidade nos Sistemas de Informação Geográficos. No entanto, actualmente, estão em curso vários trabalhos de investigação com o objectivo de explorar estas questões (tempo) nos SIG.

Os mapas representam locais na superfície terrestre utilizando grelhas e rótulos para esses locais, todos com medidas de latitude-longitude e com determinado sistema geográfico de coordenadas associado. Os sistemas de coordenadas permitem a integração dos conjuntos de dados nos mapas e permitem efectuar variadas operações analíticas integradas, como a sobreposição de camadas de dados provenientes de diversas fontes. Assim, os elementos geográficos contidos em várias camadas de um mapa são desenhados numa ordem específica (sobrepostas) conforme o mapa em questão (Figura 3.4).

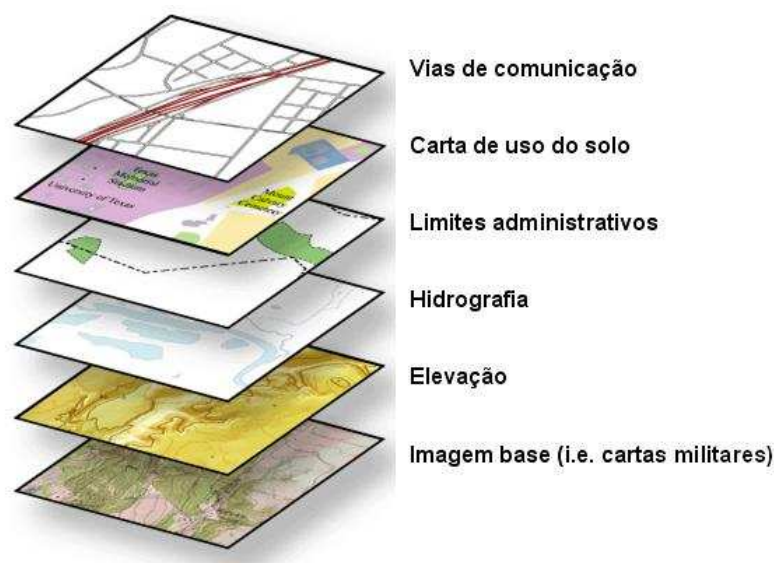


Figura 3.4 – Esquema da sobreposição das várias camadas de informação.

3.3.1. Etapas do Processo

Os dados raster são normalmente obtidos através do *scanning* de mapas ou adquirindo fotografias aéreas e imagens de satélite. Esses mapas não costumam conter informação relativa à referência espacial (quer incluída no ficheiro ou num ficheiro aparte). Por vezes, a informação relativa à localização associada às fotografias aéreas e imagens de satélite, é inadequada e os dados não ficam devidamente alinhados relativamente a outra informação que possa existir previamente. Assim, para utilizar dados raster em conjunção com outros dados espaciais de que já se disponha, pode ser necessário alinhá-los, ou referenciá-los, de acordo com o sistema de coordenadas de um mapa. O sistema de coordenadas de um mapa é definido utilizando uma projecção do mapa (um método, através do qual a superfície curva da terra é sobreposta numa superfície plana).

Quando se georreferencia os dados raster, define-se a sua localização utilizando as coordenadas do mapa e atribui-se um sistema de coordenadas. Georreferenciar dos dados permite que estes sejam visualizados, sistematizados, e analisados com outros dados geográficos.

As etapas básicas para georreferenciar os dados raster são:

- Adicionar os dados raster que se pretende alinhar com os dados projectados no ArcMap;
- Adicionar pontos de controlo que ligam posições conhecidas dos dados raster, a posições conhecidas nas coordenadas do mapa;
- Guardar a informação de georreferenciação quando o ajuste for satisfatório (também referido como registo);
- Opcionalmente, transformar permanentemente os dados raster.

3.3.1.1 Ajuste do *raster* com os pontos de controlo

Geralmente, a georreferenciação é feita utilizando dados espaciais já existentes (dados alvo) como classes de vectores, que residem no sistema de coordenadas desejado do mapa. O processo envolve a identificação de uma série de pontos de controlo – coordenadas X, Y conhecidas – que estabelecem uma ligação entre as localizações nos dados do raster com as dos dados espacialmente georreferenciados (dados alvo). Os pontos de controlo são localizações que podem ser identificadas com precisão nos dados raster e nas coordenadas reais. Existem muitos tipos de características diferentes que podem ser utilizadas como localizações identificáveis, como vias de comunicação, intersecções de linhas de água, nascentes, esquinas de terrenos bem delimitados, esquinas de ruas, ou intersecções de duas fileiras de vegetação.

Os pontos de controlo são utilizados para construir uma transformação polinomial que irá converter os dados raster da sua localização existente para a localização espacialmente correcta. A conexão entre um ponto de controlo nos dados raster (“the from point”) e o ponto de controlo correspondente nos dados alvo de ajuste (“to the point”) é um *link*.

O exemplo seguinte (Figura 3.5) mostra um ponto de controlo inicial (cruz amarela) colocado nos dados de vector alvo numa intersecção de vias de comunicação, e o ponto de controlo associado (cruz verde) colocada nos dados *raster*. O *link* associado é representado pela linha azul que une os pontos de controlo.

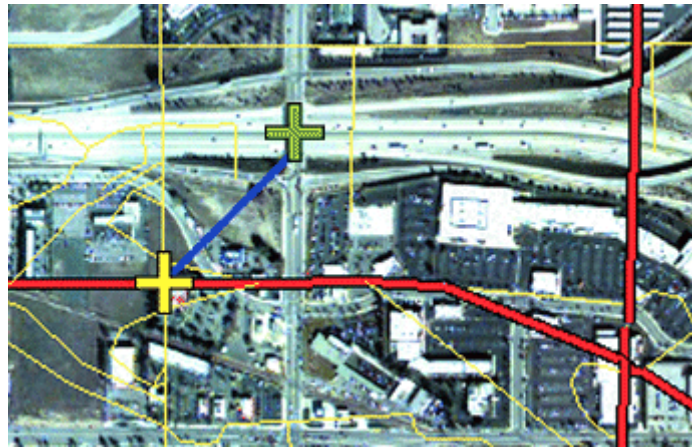


Figura 3.5 – Ilustração de um ajuste.

O número de *links* que são necessários criar depende da complexidade da transformação que se pretende utilizar para transformar os dados *raster* para as coordenadas do mapa. No entanto, o facto de adicionar mais *links* não significa necessariamente produzir um melhor registo. Se possível, os *links* devem estar espalhados ao longo de todo o *raster*, em vez de os concentrar numa única área. Normalmente, os melhores resultados são conseguidos quando se tem pelo menos um *link* perto de cada canto do *raster* e alguns dispersos pelo meio.

Geralmente, quanto maior for a sobreposição entre o *raster* e os dados alvo, melhor resulta o ajuste porque vão existir pontos mais espaçados com os quais se fará a georreferenciação. Por exemplo, se os dados alvo apenas ocuparem um quarto da área dos dados de origem, os pontos que se poderiam utilizar para alinhar os dados estariam confinadas a essa área de sobreposição. Assim, as áreas fora da área de sobreposição podem não ficar devidamente alinhadas.

Deve sempre ser tido em conta que a precisão da georreferenciação dos dados de origem, está dependente dos dados alvo onde é efectuado o ajuste. Para minimizar os erros, a georreferenciação deve ser feita em relação a dados alvo com a maior resolução e escala possíveis de acordo com as necessidades.

3.3.1.2 Transformação do *raster*

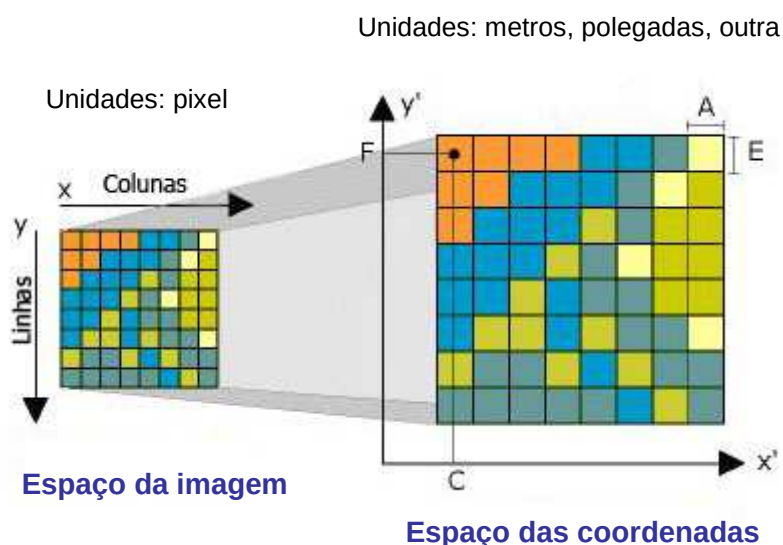
Após da criação de links suficientes, pode ser efectuada a transformação do *raster* para se encaixar permanentemente nas coordenadas do mapa dos dados alvo. Para tal, estão disponíveis três tipos de transformação para determinar a localização correcta de das coordenadas do mapa para cada célula do *raster*: polinomial, *spline*, e ajustada.

A transformação polinomial utiliza um polinómio construído a partir dos pontos de controlo e do algoritmo da média dos mínimos quadrados (MMQ). Esta transformação está optimizada para

uma precisão global, mas não garante uma precisão local. A transformação polinomial é constituída por duas fórmulas: uma para calcular a coordenada X a partir da uma localização (X,Y), e outra para calcular a coordenada Y a partir de uma localização (X,Y). O objectivo do MMQ é conseguir uma fórmula geral que possa ser aplicada a todos os pontos, normalmente necessitando apenas de pequenos movimentos dos pontos de controlo para as posições alvo. O número de pontos de controlo não correlacionados para este método tem de ser três para uma transformação de primeira ordem, seis para uma de segunda ordem, e dez para uma de terceira ordem. A transformação polinomial de primeira ordem é normalmente utilizada para georreferenciar uma imagem.

Na Figura 3.6 está ilustrada a equação para transformar um *raster* utilizando o método de transformação polinomial *affine* (1ª ordem). Pode-se verificar como seis parâmetros definem a forma como as colunas e linhas do um *raster* se transformam em coordenadas do mapa.

$$\begin{aligned} X' &= Ax + By + C \\ Y' &= Dx + Ey + F \end{aligned}$$



Legenda:

- X é a contagem de uma coluna no espaço da imagem
- Y é a contagem de uma linha no espaço da imagem
- X' é o valor horizontal no espaço das coordenadas
- Y' é o valor vertical para o espaço das coordenadas
- A é a largura de uma célula nas unidades do mapa
- B é um termo de rotação
- C é o valor X' do canto superior direito da célula central
- D é um termo de rotação
- E é o valor negativo da altura da célula em unidades do mapa
- F é o valor Y' do canto superior direito da célula central

Figura 3.6 – Esquema ilustrativo da metodologia de transformação de um *raster*.

Para alterar a escala, ou rodar o raster deve ser utilizada uma transformação de 1ª ordem (ou *affine*). Esta operação geralmente resulta em linhas rectas no raster mapeado como linhas rectas

na malha do raster. Assim, os quadrados e rectângulos no raster são normalmente alterados para paralelogramas com uma escala e ângulo de orientação arbitrários.

Com um mínimo de três *links*, a equação matemática utilizada com uma transformação de primeira ordem pode mapear com exactidão cada ponto do raster para a localização alvo. O quarto link irá introduzir erros, ou resíduos, que são distribuídos por todos os *links*. No entanto, deve-se adicionar mais de três *links* porque se um link tiver um posicionamento errado, tem um impacto muito superior na transformação. Assim, mesmo que o erro da transformação matemática possa ser superior à medida que se criam mais *links*, a precisão da transformação na sua globalidade irá aumentar.

Quanto maior for a ordem da transformação, mais complexo é o ajuste que pode ser corrigido. No entanto, as transformações superiores à terceira ordem são raramente necessárias. As transformações de ordens superiores requerem mais *links* e, por isso, envolvem progressivamente mais tempo de processamento. Geralmente, se o *raster* necessita de ser “esticado”, de alterar a escala, e rodado, utiliza-se uma transformação de primeira ordem. Mas, se houver a necessitar de dobrar ou curvar o *raster*, já será necessária uma transformação de segunda ou terceira ordem (Figura 3.7).

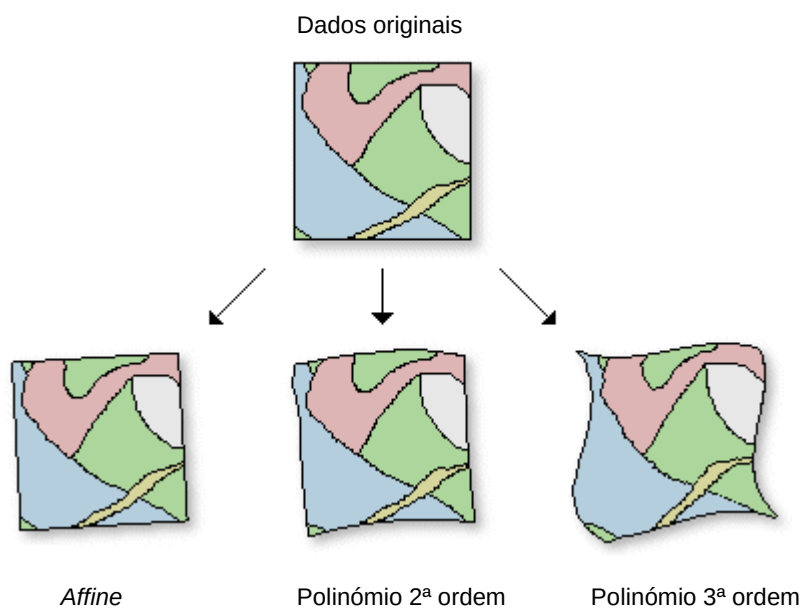


Figura 3.7 – Esquema ilustrativo de alguns tipos de transformação de um *raster*.

A transformação *spline* consiste em distorcer uma camada para permitir a sua união a uma base geográfica adjacente com imagens complementares. Este método proporciona uma optimização a nível da precisão local, mas não da precisão global. Esta transformação é baseada num função *spline*, que se trata de um polinómio que mantém a continuidade e suavidade entre os polinómios adjacentes. Este método transforma os pontos de controlo de origem exactamente nos pontos de controlo alvo, não garantindo que os pixéis que se encontrem mais afastados dos pontos de controlo sejam transformados com precisão. Esta transformação é útil quando os pontos de controlo são de grande importância e é crucial que eles sejam registados com extrema precisão.

Ao adicionar maior número de pontos de controlo pode-se aumentar a precisão global da transformação *spline* que requer um mínimo de três pontos.

A transformação ajustada permite uma optimização, tanto a nível da precisão global, como local. É construída com base num algoritmo que combina uma transformação polinomial com as técnicas de interpolação da TIN. Neste caso, é feita inicialmente uma transformação polinomial utilizando dois conjuntos de pontos de controlo, e depois é efectuado o ajuste desses pontos localmente para permitir uma melhor correspondência com os pontos alvo utilizando uma técnica de interpolação da TIN.

3.4 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).

3.5 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, 1994, 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, 1994).

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 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).

3.6 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 4

MODELAÇÃO HIDROLÓGICA

4.1 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 sub-superfície 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 disso, a hidrologia está profundamente ligada com as condições climáticas, troposféricas e biosféricas, e, como tal, modelos hidrológicos, atmosféricos e de outras naturezas deveriam estar acoplados, sendo que, na prática, esta ligação, se torna bastante difícil, uma vez que os modelos atmosféricos trabalham com dimensões da quadrícula maior do que as utilizadas na modelação hidrológica (Maidment, 1993).

Para melhor compreensão dos 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. Uma 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 (Melo e Silva, 2008).

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 4.1 ilustra o exposto ao nível de uma bacia hidrográfica.

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 modelação hidrológica é uma das partes cruciais da metodologia deste trabalho. Assim, neste capítulo são abordadas as componentes do ciclo hidrológico aprofundando o ponto de vista da sua modelação.

4.2 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.

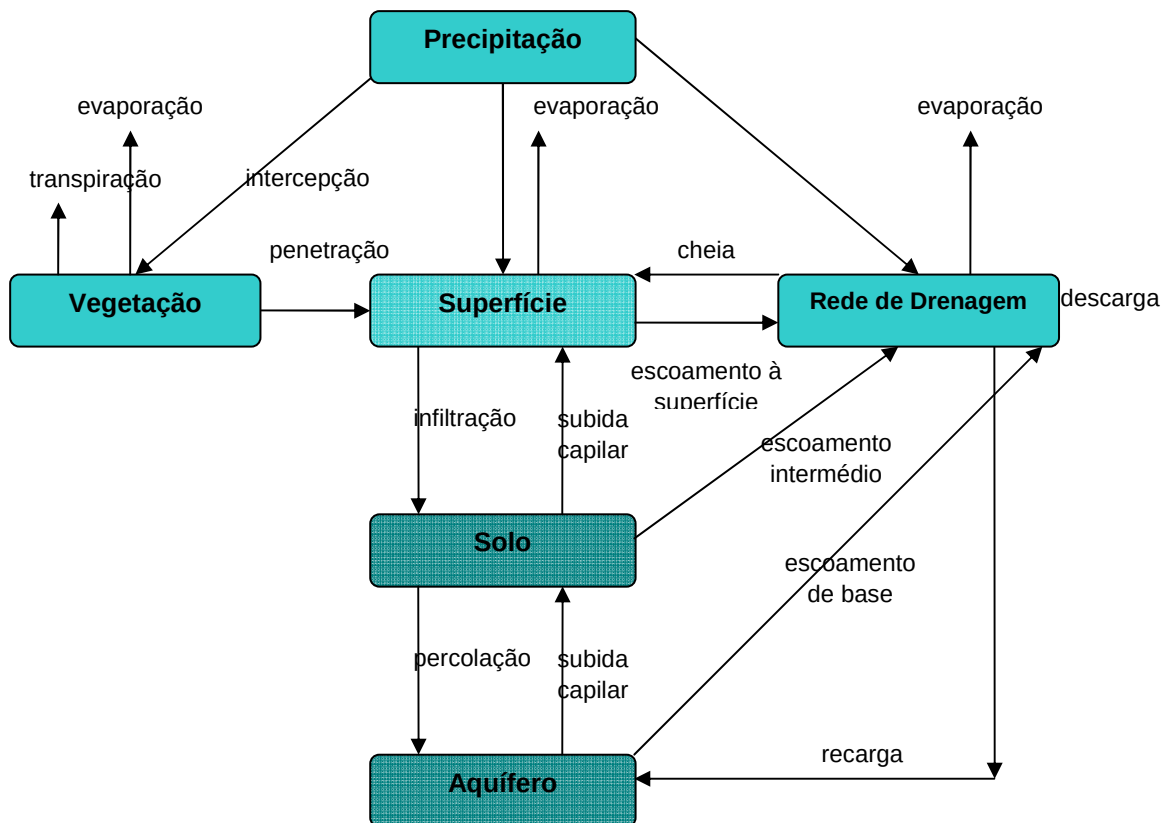


Figura 4.1 – Diagrama de fluxo numa bacia hidrográfica (adaptado de HEC, 2000 b).

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.

4.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Uma possível classificação para os modelos hidrológicos é apresentada na Figura 4.2 (Quintela e Portela, 2000).

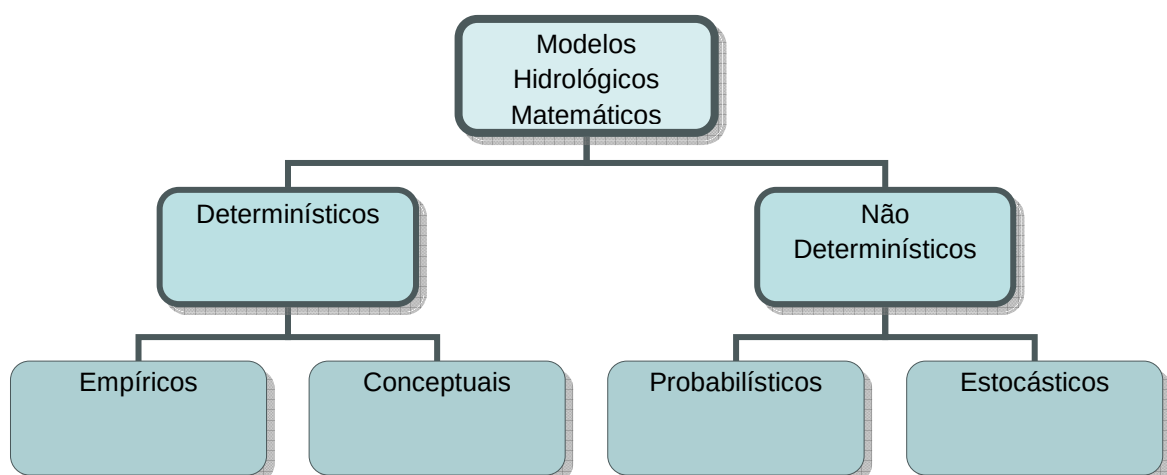


Figura 4.2 – Classificação de modelos hidrológicos (adaptado de Quintela e Portela, 2000).

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.

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 interações entre os processos e simular os efeitos de futuras mudanças no uso do solo, do que a fazer previsões 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.

4.4 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.

4.4.1 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 escoia 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 4.1).

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 antecidos 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 escoia 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 escoam 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 4.3 estão representadas as componentes do hidrograma, bem como, genericamente, a sua forma mais usual.

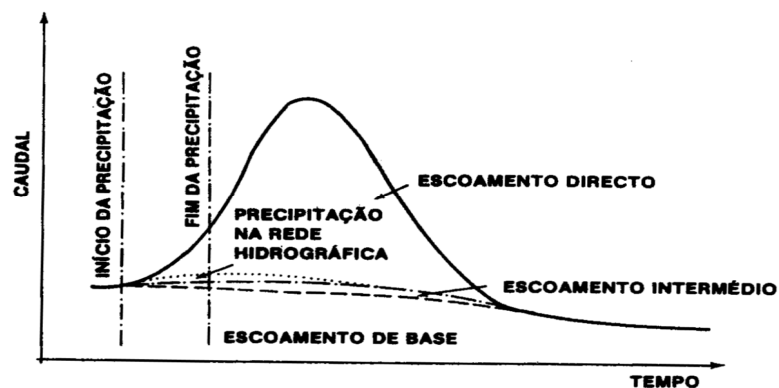


Figura 4.3 – Componentes de um hidrograma.

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).

4.4.2 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 (t_l), t_l , 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 4.4 procura representar graficamente as noções apresentadas.

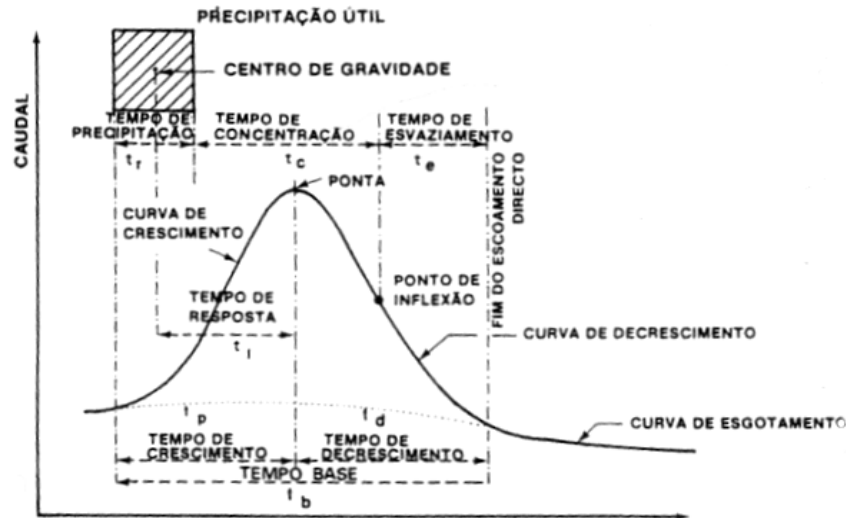


Figura 4.4 – Características de um hidrograma tipo (extraído de Lencastre e Franco, 1984).

4.4.3 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:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{\frac{t-t_0}{k}} \quad \text{Equação (4.1)}$$

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 4.5. Logaritmizando a expressão anterior:

$$\ln Q(t) = \ln Q_0 - \frac{t-t_0}{k} \quad \text{Equação (4.2)}$$

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

A tradução física da equação 4.1, 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).

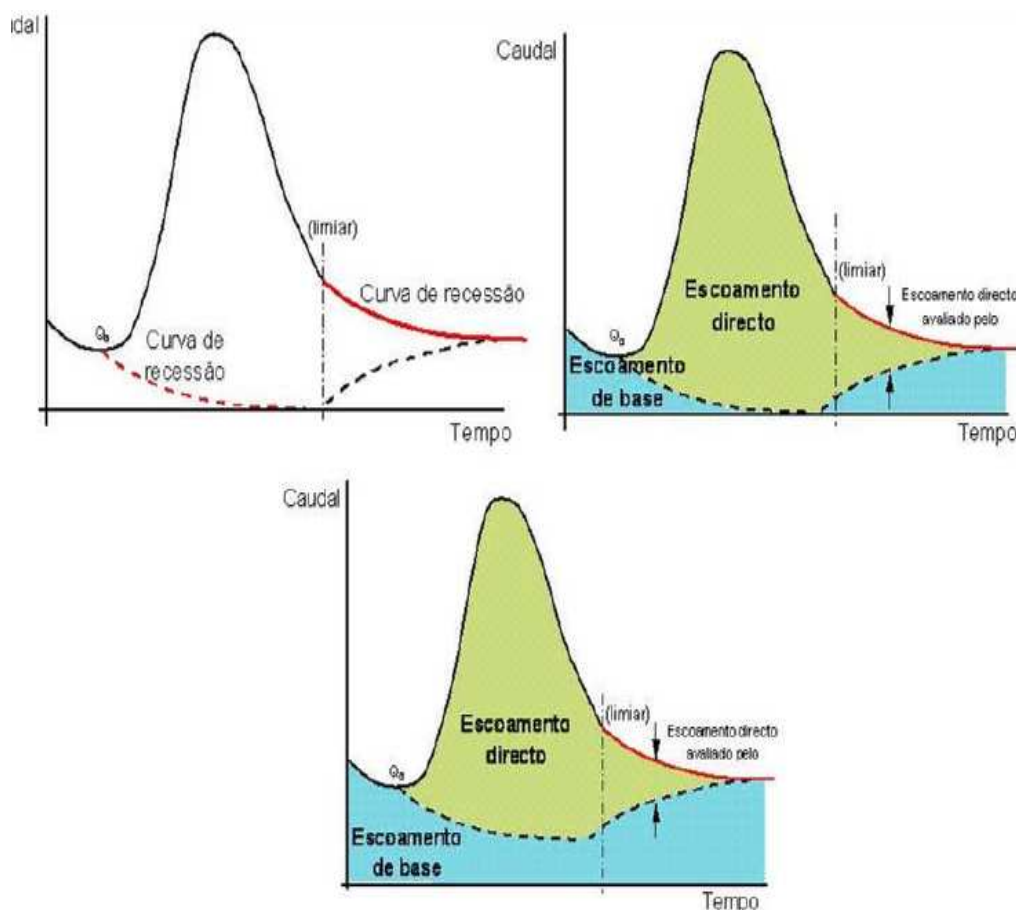


Figura 4.5 – Modelo de recessão do escoamento de base (extraído de Lencastre e Franco, 1984).

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.

4.4.4 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, consequentemente, 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):

$$(t_r)_{\text{crítica}} = 2 \cdot \sqrt{t_c} \quad \text{Equação (4.3)}$$

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:

$$P = \alpha \cdot t^m \quad \text{Equação (4.4)}$$

$$i = \beta \cdot t^n \quad \text{Equação (4.5)}$$

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 α e β e os expoentes m e n são função do período de retorno, T . A primeira expressão é referida como a linha de possibilidade udométrica (quando 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 4.6 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 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.

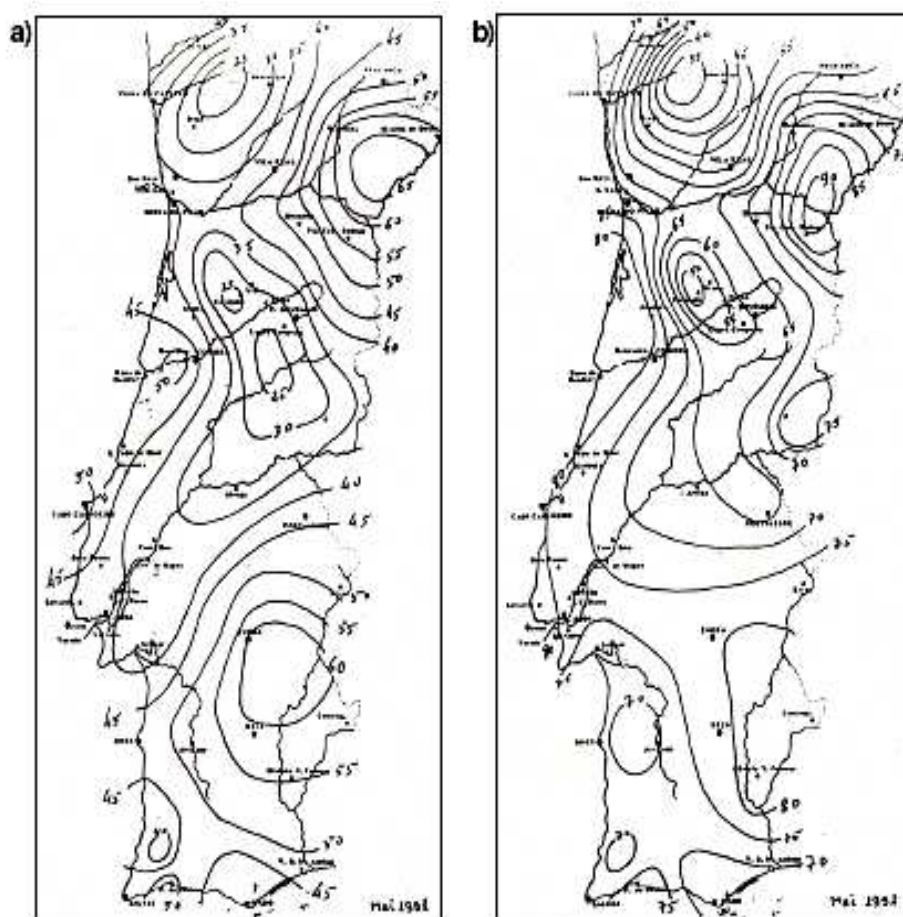


Figura 4.6 – Mapa de isolinhas dos valores máximos da precipitação em a) 60 minutos e em b) 6 horas, expressos em percentagem dos valores em 24 horas. Período de retorno de 100 anos (extraído de Portela, 2005).

A título exemplificativo são apresentados os valores desses mesmos parâmetros para a região do Porto (Tabela 4.1) de acordo com informação disponível no portal do SNIRH.

A Figura 4.7 apresenta alguns mapas de isolinhas de precipitação horária para diferentes frequências estatísticas.

Tabela 4.1 – 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
β	362	392	463	493
n	-0.583	-0.580	-0.576	-0.574

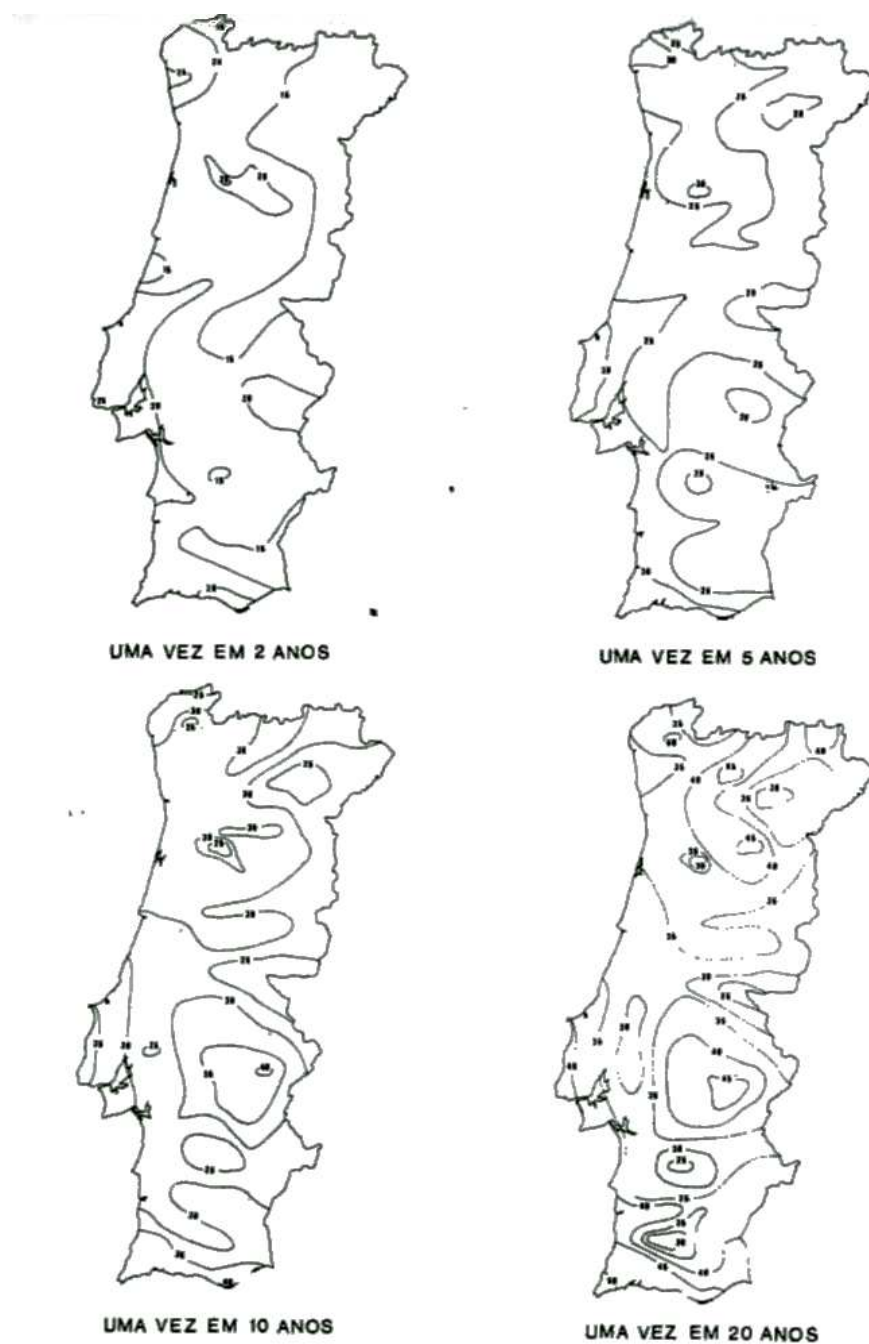


Figura 4.7 – Valores máximos de precipitação horária para diferentes frequências estatísticas (extraído de Lencastre e Franco, 1984).

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 curvas 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:

$$\frac{P_t}{P_{24}} = \frac{a \cdot (60 \cdot t)^b \cdot t}{a \cdot (60 \cdot 24)^b \cdot 24} \quad \text{Equação (4.6)}$$

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 4.8, 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 3) 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 possível de obter por recurso aos SIG, permite a estimativa 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.

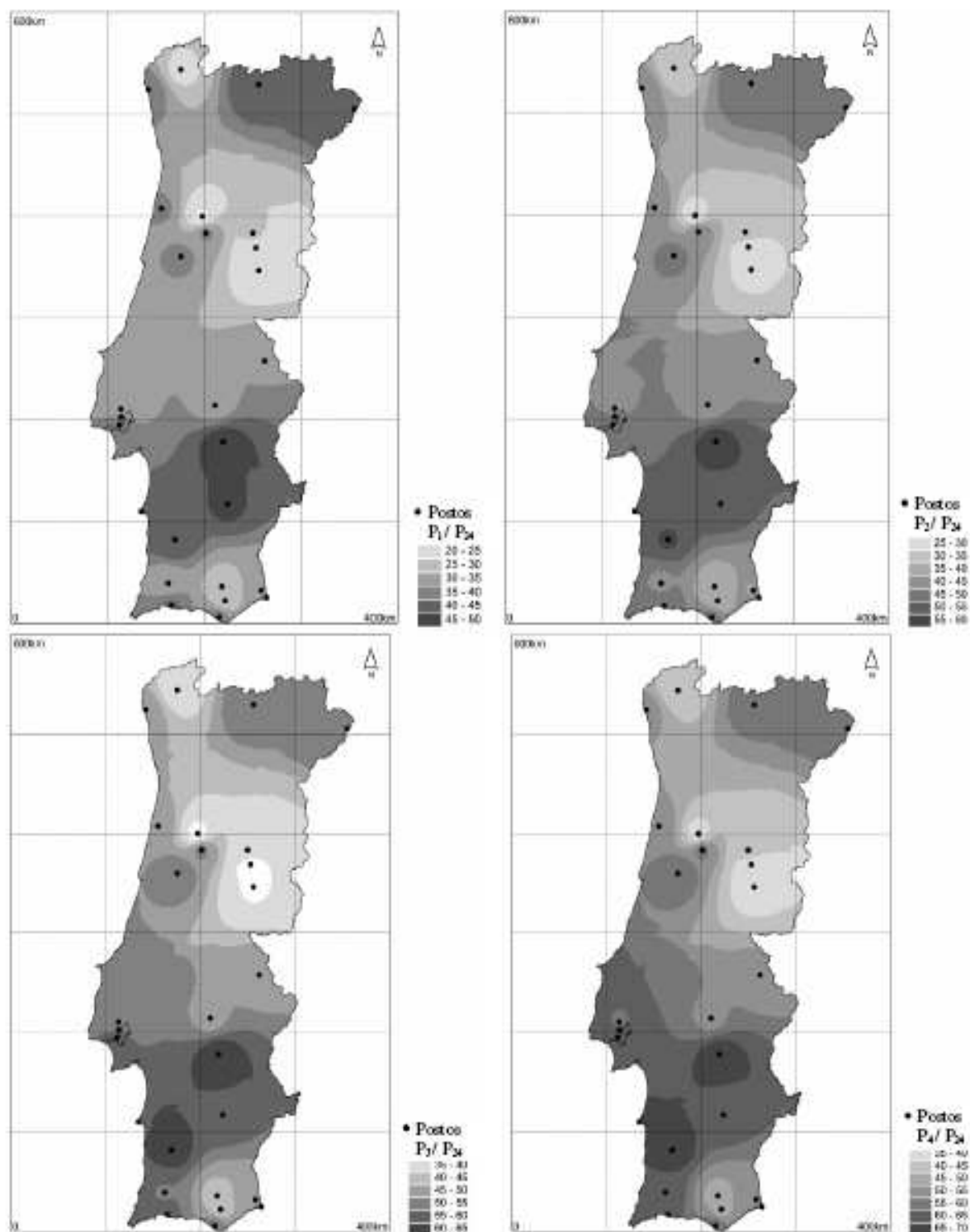


Figura 4.8 – Superfícies de valores do quociente P_t/P_{24} (%) entre duas precipitações com o mesmo período de retorno T , uma com duração t , P_t , e outra com duração de 24 h, P_{24} , (valores de t de 1, 2, 3 e 4 h) (extraído de Portela, 2005).

4.4.5 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 4.9).

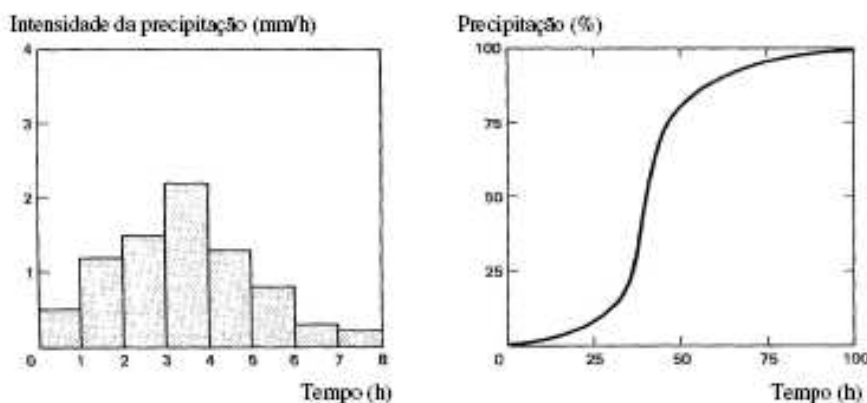


Figura 4.9 – a) Hietograma da precipitação e b) distribuição temporal adimensional da precipitação (extraído de Hipólito, 1985).

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 4.4.4, 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, Δt , pretendida para cada bloco do hietograma, terá de ser fixada *a 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 4.10) (Portela, 2006 a).

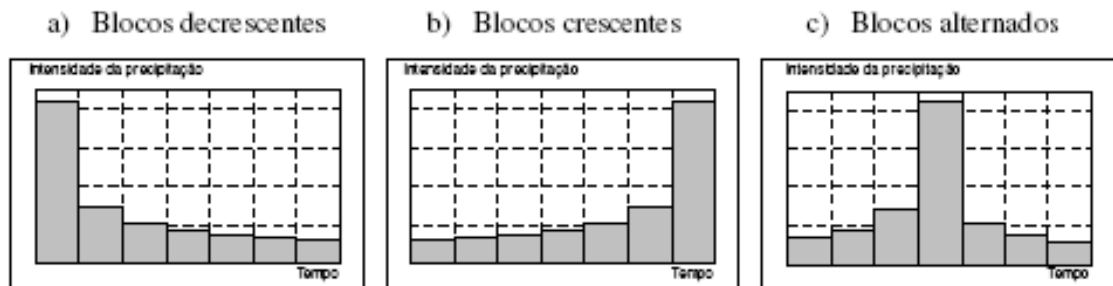


Figura 4.10 – Representação dos padrões de distribuição de blocos de precipitação em hietogramas (extraído de Portela, 2006 a).

Na Figura 4.11 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 Km²). 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.

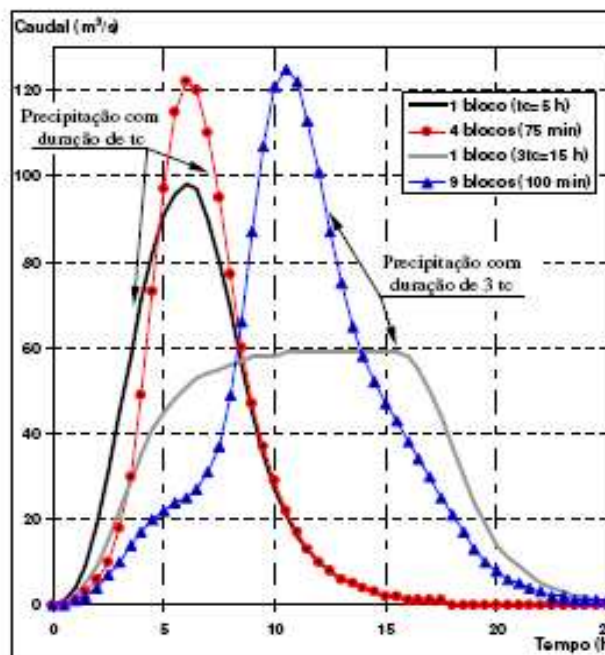


Figura 4.11 – Secção da barragem de Toulica. Hidrogramas das cheias afluentes para precipitações com duração igual e tripla do tempo de concentração e com intensidade uniforme e não uniforme (Portela, 2006 b).

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.

4.4.6 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 intercepção, a infiltração, o armazenamento em depressões do solo e, genericamente, a evapotranspiração.

A intercepção 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 intercepção 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 excepionalidade 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 4.2 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 4.3, encontrando-se estes mais condicionados a factores de ordem sazonal.

Tabela 4.2 – 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)
Florestas de Folhosas		
Todos os dados	10	13
Florestas de Resinosas		
Só chuva	11	22
Observações que incluem chuva e neve	26	28
Dados europeus, somente	9	35
Dados norte-americanos, somente	27	27
Formosa	1	8

Tabela 4.3 – 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 (subcapítulo 4.3), 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.

4.4.6.1. 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:

$$\begin{cases} p_e = p - f; p_t > f \\ p_e = 0; p_t < f \end{cases} \quad \text{Equação (4.7)}$$

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 4.4 apresentam-se valores publicados por Chow et al., 1988, para as constantes de perda de acordo com a natureza do solo.

Tabela 4.4 – 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

4.4.6.2 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:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{(P - I_a)}$$

Equação (4.8)

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

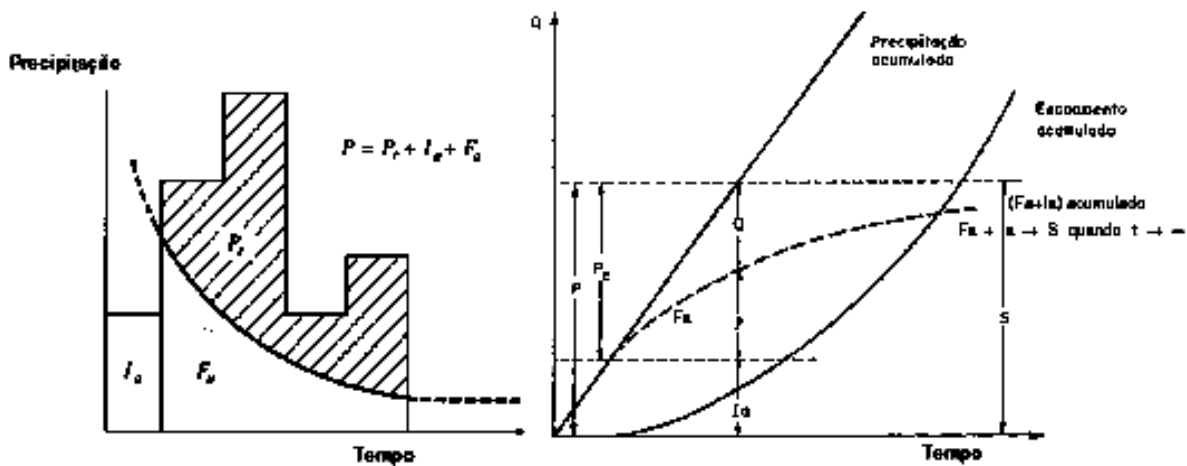


Figura 4.12 – Representação das variáveis e funções do modelo do SCS para determinação das perdas de precipitação (extraído de Portela et al., 2000 a).

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

$$P = P_e + I_a + F_a \quad \text{Equação (4.9)}$$

Resolvendo a equação 4.9 em ordem a F_a e introduzindo o resultado assim obtido na equação (4.8), obtém-se a equação do SCS para o escoamento superficial:

$$Q = P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \text{Equação (4.10)}$$

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:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad \text{Equação (4.11)}$$

Assim, atendendo a esta ultima expressão e substituindo:

$$Q = P_e = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S}; P > 0,2 \cdot S \quad \text{Equação (4.12)}$$

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):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Equação (4.13)}$$

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 4.13 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 4.5 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).

As classes texturais de solo apresentadas na Tabela 4.5 decorrem da classificação proposta pelo USDA, baseada nas percentagens de areia, sílica e argila. Na Figura 4.14 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 essas tabelas são apresentadas no Anexo C.

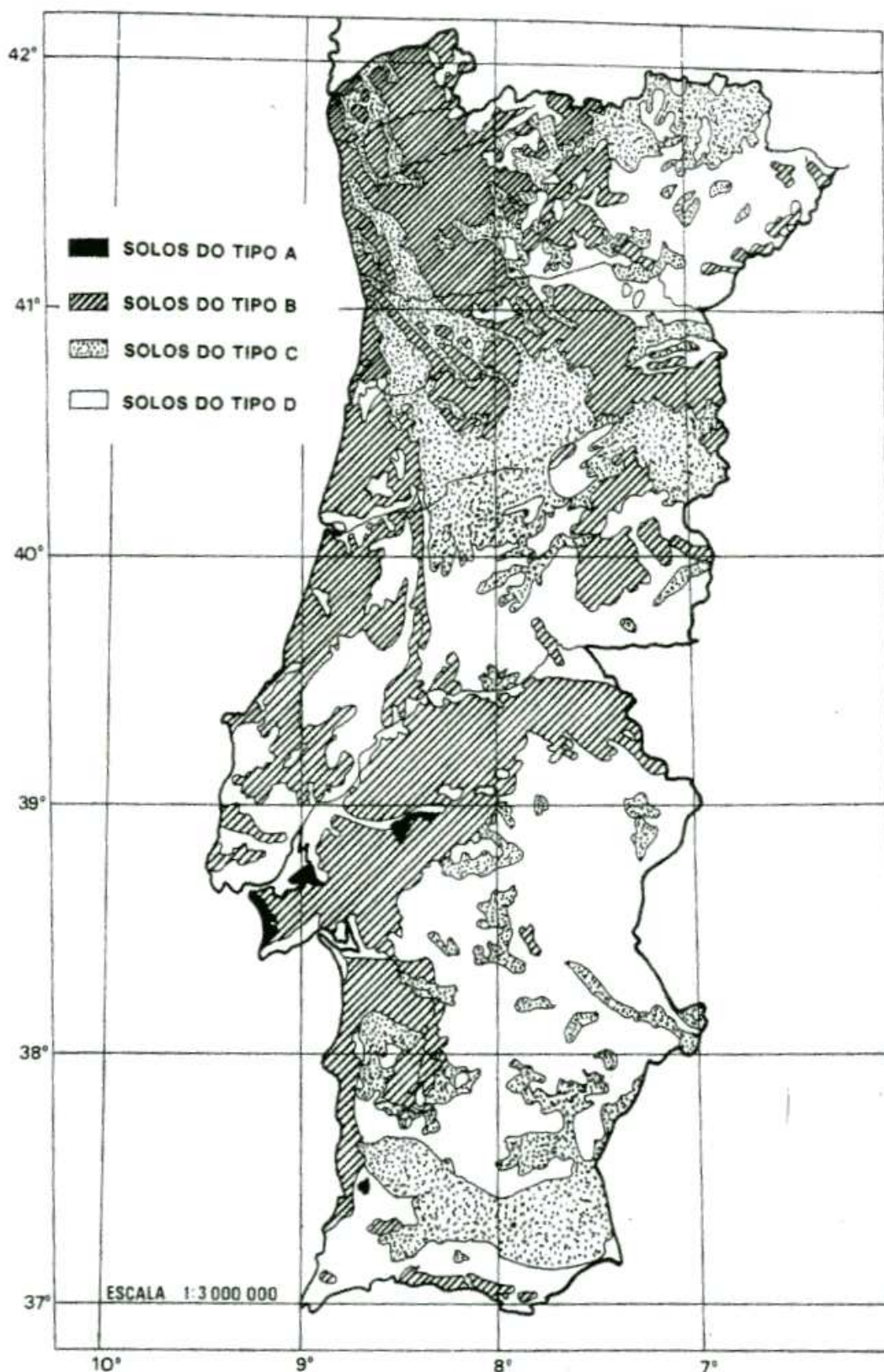


Figura 4.13 – Carta dos solos de Portugal Continental classificados pelas suas características hidrológicas (adaptado de Lencastre e Franco, 1984).

Tabela 4.5 – Propriedades hidrológicas dos solos consoante a respectiva textura (extraído de Portela *et al.*, 2000 a).

Classe de textura (designações)	Capacidade efectiva de água (in/in)	Taxa mínima de infiltração (in/hr)	Grupo hidrológico
Solo arenoso	0,35	8,27	A
Solo arenoso franco	0,31	2,41	A
Solo franco arenoso	0,25	1,02	B
Solo franco	0,19	0,52	B
Solo franco siltoso	0,17	0,27	C
Solo franco argiloso arenoso	0,14	0,17	C
Solo franco argiloso	0,14	0,09	D
Solo franco argiloso siltoso	0,11	0,06	D
Solo argiloso arenoso	0,09	0,05	D
Solo argiloso siltoso	0,09	0,04	D
Solo argiloso	0,08	0,02	D

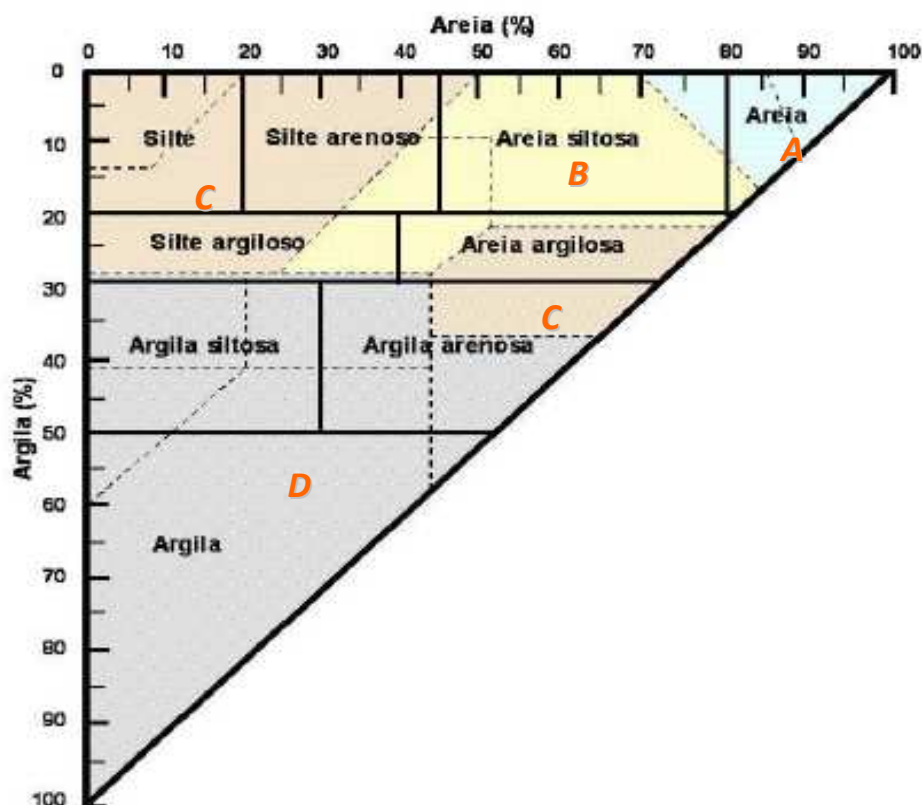


Figura 4.14 – Grupos hidrológicos correspondentes às classes de solo representadas na Tabela 4.5 (adaptado de Portela *et al.*, 2000 a).

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:

$$CN(AMCIII) = \frac{23 \cdot CN(AMCII)}{10 + 0.13CN(AMCII)} \quad \text{Equação (4.14)}$$

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 explanar da 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, consequentemente, 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:

$$t_c = \frac{100}{0,3048^{0,8}} \cdot \frac{L^{0,8} \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}}{1900 \cdot S_m^{0,5}} \quad \text{Equação (4.15)}$$

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.

4.4.7 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.

4.4.7.1 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 (1mm, 1cm 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 4.15);
- Princípio da sobreposição (Figura 4.16).

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 desfaseamento, dos hidrogramas que resultam de uma sucessão de vários acontecimentos de precipitação útil, cada um deles com igual duração.

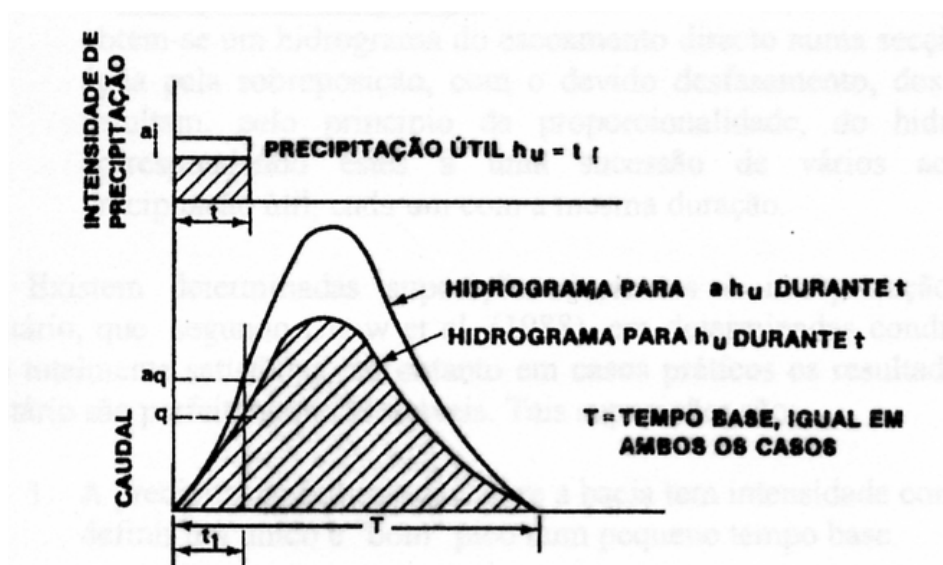


Figura 4.15 – Primeiro princípio básico do hidrograma unitário: Princípio da proporcionalidade (extraído de Lencastre e Franco, 1984).

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.

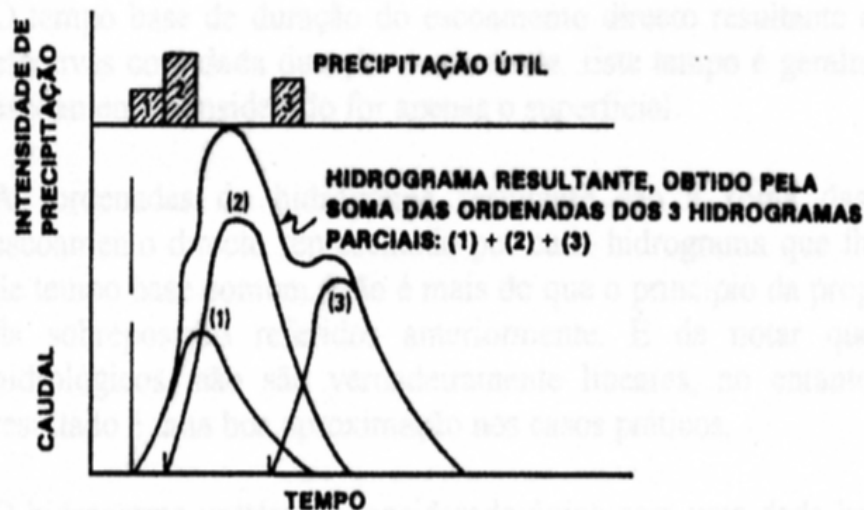


Figura 4.16 – Segundo princípio básico do hidrograma unitário: Princípio da sobreposição (extraído de Lencastre e Franco, 1984).

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 4.17) (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.

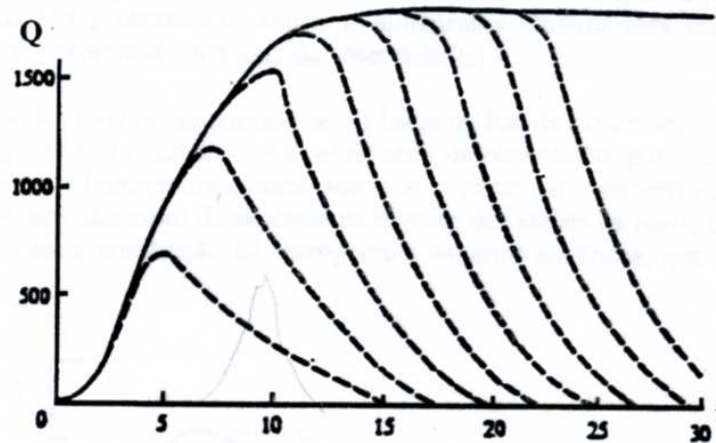


Figura 4.17 – Hidrograma em S (extraído de Paulo, 1998).

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.

4.4.7.2 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 resposta 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.

As principais particularidades deste modelo prendem-se com:

- Embora simples na sua formulação base é possível a sua adaptação às diferentes realidades que compõem uma bacia hidrográfica, mesmo que em permanente alteração;
- 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, α e m .

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 (30km^2), 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 compõe, 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 influências da massa e força, por contraste com a Dinâmica, onde estas influências 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 última 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:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S_o^{1/2} \cdot A \quad \text{Equação de Manning (4.16)}$$

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 $\text{m}^{2/3}$ e $\text{m}^{-1/3}\text{s}$, 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 (4.17)). O número de Froude quantifica a razão entre as forças de inércia e a força da gravidade.

$$F = \frac{U}{\sqrt{g \cdot y}} \quad \text{Equação (4.17)}$$

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. Trata-se de equações diferenciais derivadas dos princípios básicos da conservação de massa e momento.

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = q_l + I_{pe} \quad \text{Equação da continuidade (4.18)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial y}{\partial x} = g \cdot (S_o - S_t) - q_l \cdot \frac{(u - v)}{y} \quad \text{Eq. da quantidade de mov. (4.19)}$$

onde:

g = aceleração da gravidade (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 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$)

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 4.18). 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 4.19 sintetiza a relação entre os três diferentes tipos de elementos.

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).

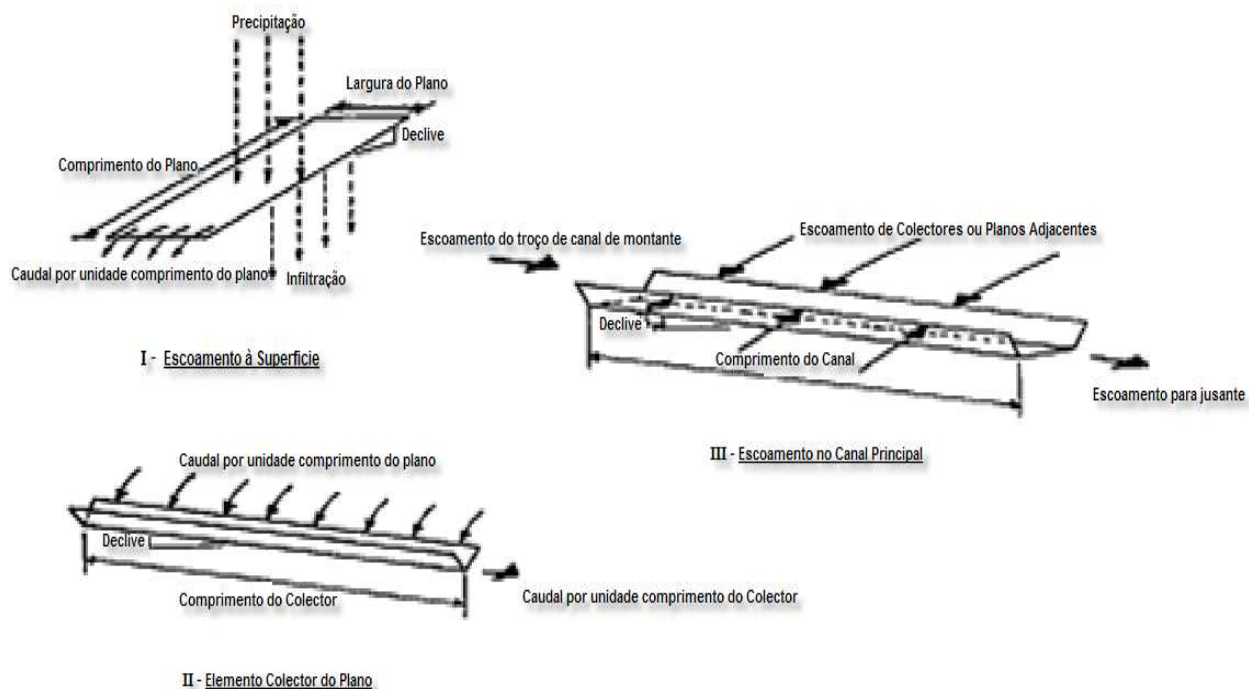


Figura 4.18 – Elementos usados no processo de cálculo do modelo da onda cinemática (adaptado de HEC, 1993).

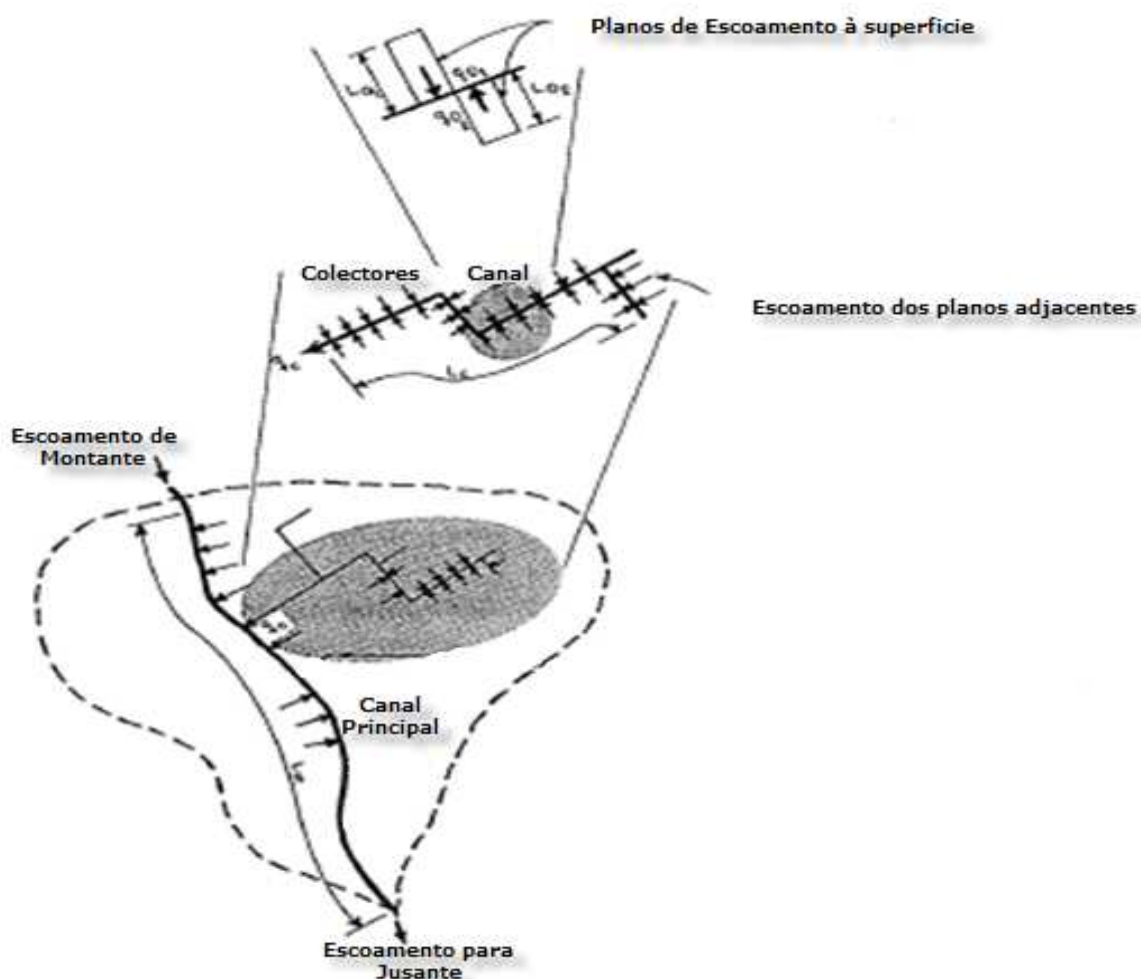


Figura 4.19 – Relação entre os elementos representativos do escoamento numa bacia hidrográfica de acordo com o modelo da onda cinemática (adaptado de HEC, 1993).

Recordando que as ondas cinemáticas ocorrem quando os termos dinâmicos da equação do momento 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:

$$Q = \alpha \cdot Y^m \quad \text{Equação (4.20)}$$

em que Q representa a descarga em m^3/s , α e m são parâmetros característicos do modelo, estando directamente relacionados com as características da bacia e do escoamento. De acordo com Singh, 2004, a componente dinâmica envolvida pode ser considerada como suficientemente atenuada se:

$$k = \frac{S_o \cdot L}{y \cdot F^2} > 10 \quad \text{Equação (4.21)}$$

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 (4.18) e (4.19). 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 (4.20)). 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, efêmero 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 (4.16)) admitindo o raio hidráulico e a secção, R e A , como sendo simplesmente $(y_o \times 1) / 1$ e $y_o \times 1$, dada a reduzida altura do escoamento e a elevada extensão dos planos, resulta a Equação (4.22), 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 (4.23)), sendo $\alpha_o = (\sqrt{S_o})/N$ e $m_o = 5/3$.

$$q_o = \frac{\sqrt{S_o}}{N} \cdot y_o^{5/3} \quad \text{Equação (4.22)}$$

$$q_o = \alpha_o \cdot y_o^{m_o} \quad \text{Equação (4.23)}$$

Uma vez que permanecem duas incógnitas nesta equação (Equação (4.23)), torna-se necessária a introdução de uma enunciação da equação da continuidade (Equação (4.18)) que estabeleça uma relação com a precipitação efectiva (valor conhecido), assim:

$$\frac{\partial y_o}{\partial t} + \frac{\partial q_o}{\partial x} = I_{pe} \quad \text{Equação (4.24)}$$

onde:

q_o - escoamento do plano por unidade de comprimento deste ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$);

y_o - corresponde à profundidade média do escoamento no plano;

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

x = comprimento da superfície em estudo (m);

t = tempo (s).

O sistema de Equações (4.23) e (4.24) constitui a formulação matemática do modelo da onda cinemática para o escoamento à superfície do terreno. Substituindo a Equação (4.23) na Equação (4.24) resulta a Equação (4.25).

$$\frac{\partial y_o}{\partial t} + \alpha_o m_o y_o^{(m_o-1)} \cdot \frac{\partial y_o}{\partial x} = I_{pe} \quad \text{Equação (4.25)}$$

Esta pode ser solucionada por forma a que se obtenha um valor de y_o em determinado ponto do espaço e num dado instante, e para uma determinada precipitação útil. Substituindo o valor de y_o obtido na Equação (4.22), é aproximado o valor da descarga, q_o , 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:

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{\partial Q_c}{\partial x} = q_o \quad \text{Equação (4.26)}$$

$$Q_c = \alpha_c \cdot A_c^{m_c} \quad \text{Equação (4.27)}$$

onde:

A_c – área da secção em estudo (m^2);

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

q_o – escoamento lateral proveniente dos planos adjacentes por unidade de comprimento do canal ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$);

t – tempo (s);

x – distância ao longo do talvegue (m);

α_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 4.18). 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 4.20 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.

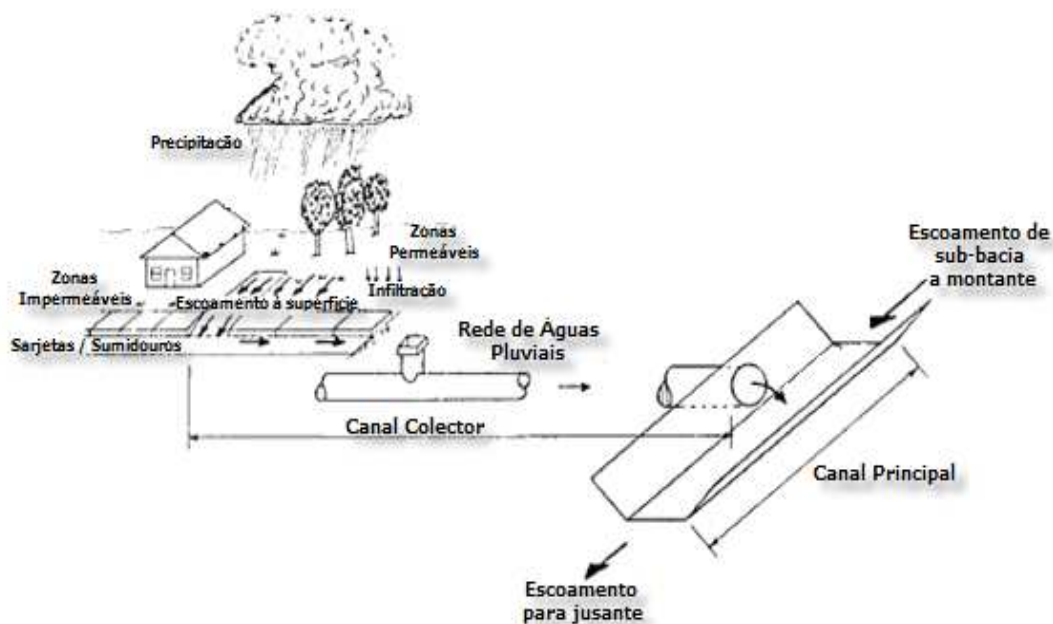


Figura 4.20 – Padrão de drenagem urbano típico (adaptado de HEC, 1993).

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

4.4.8 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 4.4.7.2 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 (4.26) e (4.27)). 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 (Figura 4.21) 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

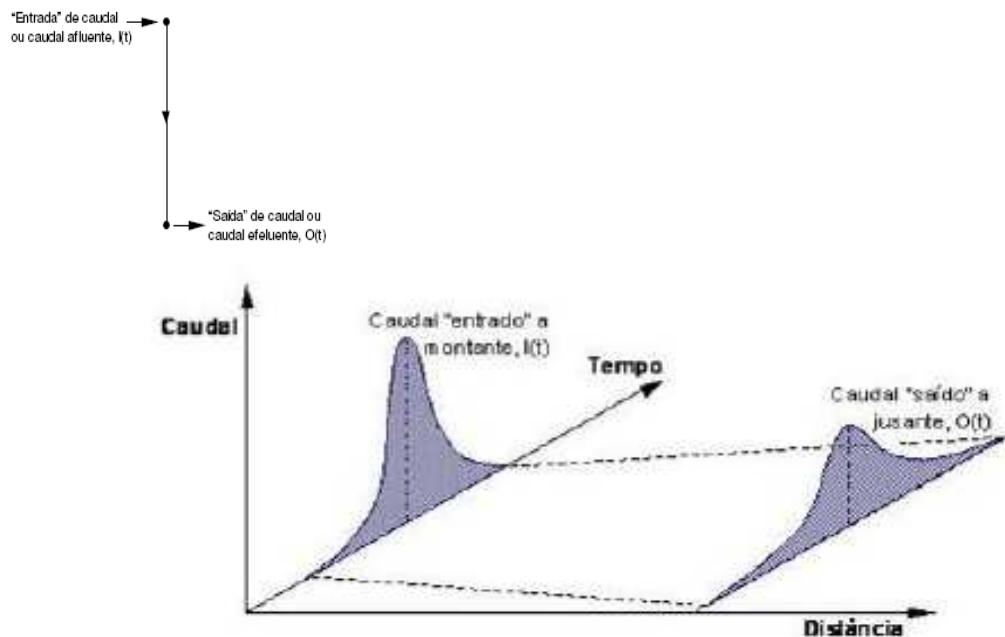


Figura 4.21 – Esquema de um modelo de propagação (extraído de Portela, 2006 a).

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 (4.28), e considera que o armazenamento no trecho de canal resulta da soma de dois armazenamentos, um prismático e outro dito em cunha (Figura 4.22).

$$\frac{\partial S}{\partial t} = I - O \Leftrightarrow \partial S = I \partial t - O \partial t \quad \text{Equação (4.28)}$$

onde:

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

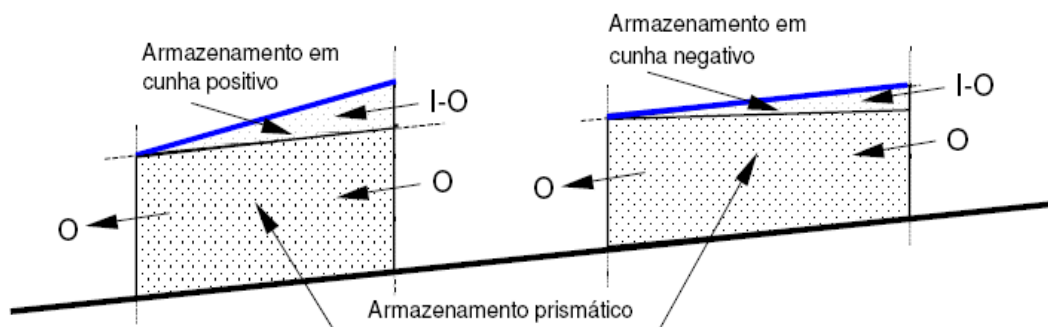


Figura 4.22 – Modelo de Muskingum. Armazenamento prismático e em cunha (extraído de Portela, 2006 a).

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.

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 afluente 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.:

$$S = kO + kx \cdot (I - O) = k \cdot [xI + (1 - x) \cdot O] \quad \text{Equação (4.29)}$$

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 4.23).

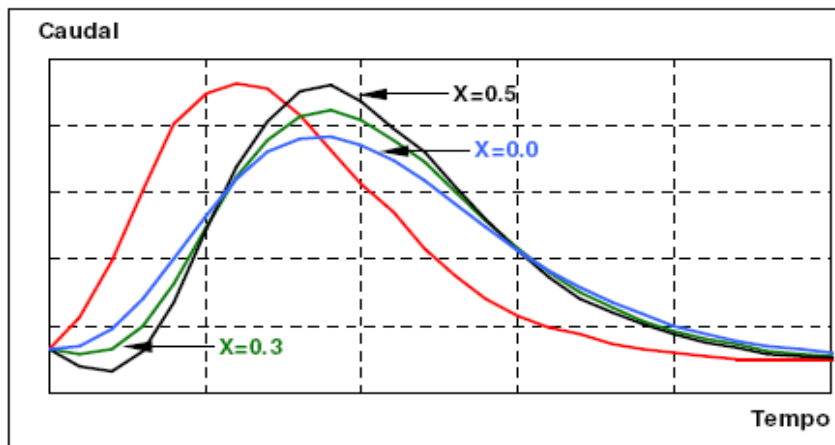


Figura 4.23 – Modelo de Muskingum. Efeito do parâmetro x na atenuação da onda de cheia ao propagar-se num trecho de canal (adaptado de HEC, 2000 b).

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 (Borroughs e Zagana, 2001):

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_0 Q_j^{n+1} + C_1 Q_j^n + C_2 Q_{j+1}^n \quad \text{Equação (4.30)}$$

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

$$C_0 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2x}{2 \cdot (1-x) + \Delta t/K} \quad \text{Equação (4.31)}$$

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2x}{2 \cdot (1-x) + \Delta t/K} \quad \text{Equação (4.32)}$$

$$C_2 = \frac{2 \cdot (1 - x) - \Delta t / K}{2 \cdot (1 - x) + \Delta t / K} \quad \text{Equação (4.33)}$$

sendo:

$$k = \frac{\Delta x}{c} \quad \text{Equação (4.34)}$$

e:

$$x = 1/2 \cdot \left(1 - \frac{q_o}{ic\Delta x}\right) \quad \text{Equação (4.35)}$$

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 Δx 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:

$$x = 1/2 \cdot \left(1 - \frac{Q}{Bic\Delta x}\right) \quad \text{Equação (4.36)}$$

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

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

Na Figura 4.24 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.

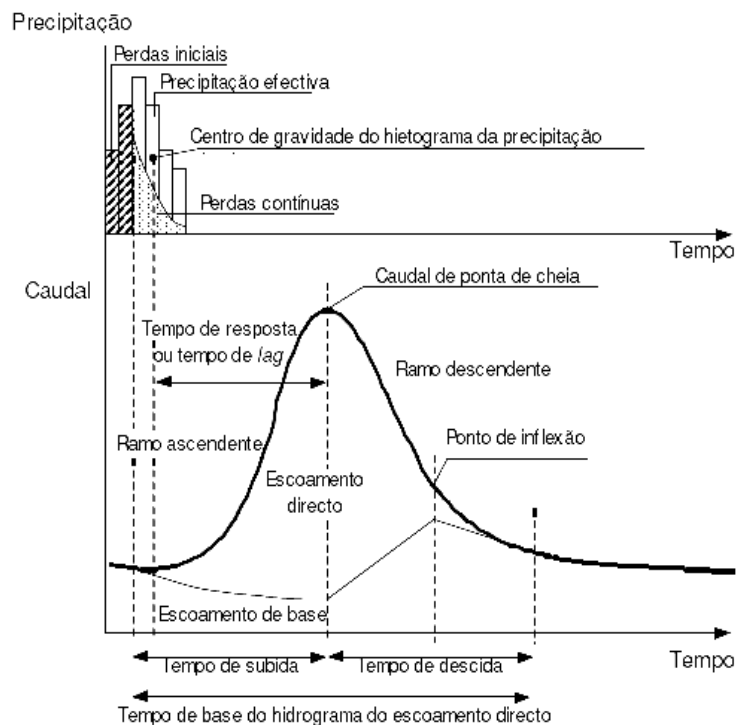


Figura 4.24 – Componentes do hidrograma de cheia e do correspondente hietograma da precipitação (extraído de Quintela, 1996).

CAPÍTULO 5

INTEGRAÇÃO DOS SIG NA MODELAÇÃO HIDROLÓGICA

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objectivo apresentar as capacidades dos Sistemas de Informação Geográfica que permitem a sua integração 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 (Melo e Silva, 2008).

De acordo com Maidment e Djokic, 2000, existe ainda lugar ao melhoramento dos modelos hidrológicos baseados em Sistemas de Informação Geográfica através do desenvolvimento da análise em termos espaciais dos modelos hidrológicos. Não obstante, estes autores frisam os seguintes, como sendo os aspectos mais significativos integração dos SIG na modelação hidrológica:

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

Os principais parâmetros determinados nos SIG com relevância nos modelos hidrológicos, baseiam-se na análise de modelos digitais do terreno, que se trata de uma representação numérica geograficamente referenciada do relevo de uma dada região. Os dados obtidos através da análise feita pelo utilizador, recorrendo a diversas operações espaciais para a manipulação da informação digital georreferenciada, serão os parâmetros que alimentarão o modelo hidrológico.

Também é possível utilizar os SIG quando os modelos hidrológicos já existem, e se pretende efectuar simulações para determinados cenários. Neste caso existe uma reciprocidade entre o modelo hidrológico e os SIG. Isto é, 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 directa ou indirectamente utilizada pelo software de modelação hidrológica. O inverso também se verifica, por exemplo, os dados finais provenientes da modelação hidrológica podem ser novamente incorporados no SIG, o que permite a sua interpretação espacial com uma maior aproximação da realidade.

Existe também a possibilidade de incorporação dos próprios modelos hidrológicos no SIG, para tal são utilizadas as linguagens de programação inerentes a estes sistemas. Isto torna-se possível, segundo Ferdinand e Maidment, 1991, com a crescente flexibilização dos SIG que permite o suporte de uma variada gama de dados e de linguagens, progressivamente mais adaptadas às necessidades do modelador.

No presente trabalho é crucial a construção de modelos digitais do terreno e respectivos algoritmos de extracção da rede hidrográfica e de delimitação da área da bacia hidrográfica, assim como a obtenção de parâmetros hidrológicos tendo por case cartas temáticas digitais.

5.2 DEFINIÇÃO DE MODELO DIGITAL DO TERRENO

No contexto da utilização em sistemas de informação geográfica, 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 um plano cartográfico um valor correspondente à sua altitude.

Assim, um modelo digital do terreno (MDT) poderá ser uma expressão matemática aplicando R^2 em R^3 , um conjunto de pontos ou de linhas com uma regra de interpolação associada ou, como é mais correntemente considerado, como uma superfície composta por faces num espaço tridimensional ou células dispostas regularmente.

No contexto da modelação geográfica, a análise da adequação de um modelo para um dado fim não é trivial, requerendo estudo cuidadoso das características de uma construção do MDT para que os resultados que com ele se pretendam atingir sejam suficientemente próximos dos fenómenos que se pretendem modelar.

A medição de altitude num número de pontos tão grande quanto possível, diminuindo a importância do método de interpolação e garantindo uma menor discrepância entre o modelo e o terreno, e de forma tão rápida e automática quanto possível são actualmente importantes pontos de desenvolvimento técnico e teórico (Matos, 2001).

5.3 O RELEVO E A SUA REPRESENTAÇÃO

O conceito de altitude é definido relativamente a uma superfície de referência e a uma forma de medição de distância relativamente a essa superfície. Como superfícies fundamentais de referência utilizam-se o geóide e o elipsóide.

O conceito de altitude mais correntemente utilizado para modelação da superfície terrestre é o de altitude ortométrica. A altitude ortométrica H_i^0 de um ponto P_i é definida como a distância geométrica entre uma superfície de referência situada próxima do geóide e o ponto, medida ao longo da linha de prumo de P_i . A expressão de cálculo da altitude ortométrica é dada por:

$$H_i^0 = \int_{P_0}^{P_i} dh \quad (\text{Equação 5.1})$$

em que o integral é calculado ao longo da linha de prumo.

A altitude de um ponto P medida relativamente ao elipsóide, designada por altitude geodésica ou elipsoidal, é dada pela distância de P ao elipsóide medida segundo a normal a este que passa em P .

Os elementos fundamentais da representação do relevo são os pontos cotados, pontos de que são conhecidas as coordenadas cartográficas ou geodésicas e a altitude, e as curvas de nível.

Para a caracterização da superfície do terreno, os pontos cotados podem ser distribuídos aleatoriamente ou de forma regular.

Uma curva de nível representa a intersecção do terreno com uma superfície de nível de uma dada altitude. As curvas de nível podem ser desenhadas directamente, como acontece num processo de estereo-restituição ou obtidas por interpolação a partir de pontos cotados.

Na representação cartográfica considera-se a intersecção do terreno com superfícies de nível separadas por uma diferença de altitudes constante, designada por equidistância natural (ε). Define-se ainda a equidistância gráfica (e) por:

$$e = \frac{\varepsilon}{N} \quad (\text{Equação 5.2})$$

em que N é o módulo da escala.

A determinação dos pontos de uma curva de nível a partir de pontos cotados é feita interpolando as altitudes de pares de pontos cotados, entre os quais, o terreno tenha um comportamento aproximadamente linear. O critério de escolha de pontos para efectuar a interpolação é algo subjectivo, devendo ter-se em consideração a possibilidade de ocorrência das situações descritas na Figura 5.1.

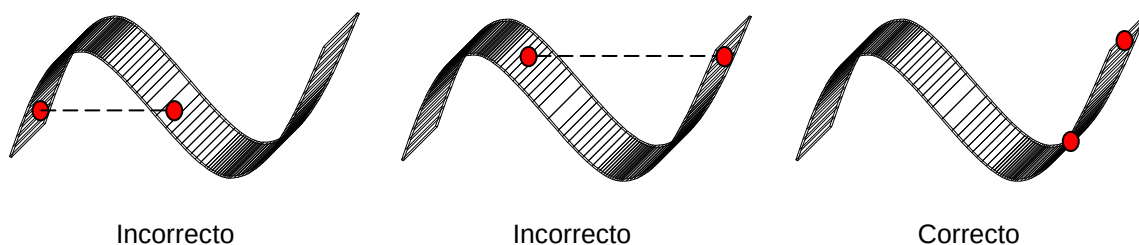


Figura 5.1 – Linhas de interpolação entre pontos cotados.

As formas de relevo não são superfícies construídas aleatoriamente, sendo antes o produto da acção erosiva, da litologia, da tectónica e da acção humana ao longo do tempo. É habitual distinguirem-se duas formas de relevo elementares, o tergo e o vale (Figura 5.2), das quais todas as outras são compostas.

Tanto o tergo como o vale são constituídos por duas encostas e uma aresta. No caso dos vales, esta aresta é uma linha de reunião de águas e designa-se por linha de água ou talvegue. No caso dos tergos, a aresta é uma linha de separação de águas e designa-se por linha de festo ou linha de cumeada.

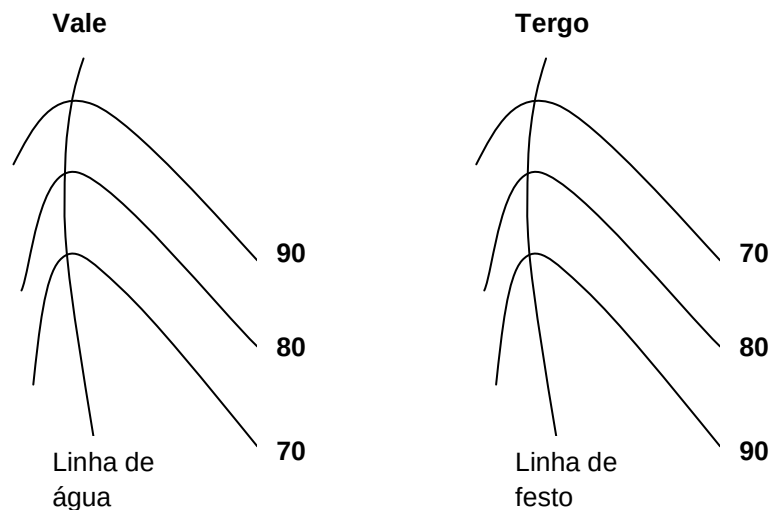


Figura 5.2 – Formas de relevo.

5.4 CONSTRUÇÃO DE UM MODELO DIGITAL DO TERRENO

Em todos os métodos de construção de modelos digitais do terreno intervêm, de algum modo, a propagação da altitude conhecida num dado conjunto de pontos para quaisquer outros pontos da região a integrar no modelo, recorrendo a métodos de interpolação.

O processo de construção mais comum baseia-se na triangulação de um conjunto de pontos com distribuição irregular, sendo a superfície assim modelada por um conjunto de faces triangulares. A altitude em qualquer ponto abrangido pelo modelo é definida pela altitude do ponto da face triangular em que se insere, o que corresponde a uma interpolação bilinear de cada triângulo.

5.4.1 Triangulação

A triangulação entre pontos de altitude conhecida, sejam pontos cotados, curvas de nível ou de linhas tridimensionais, constituindo uma superfície de faces triangulares planas, é um processo fundamental na construção de modelos de terreno. A superfície assim gerada, designada por rede irregular triangulada (RIT, ou TIN de *triangulated irregular network*), é por si mesma um MDT mas também um suporte habitual para a construção de modelos com outro tipo de estrutura, como por exemplo, os modelos matriciais.

O desenho de triângulos adjacentes unindo todos os pontos de um conjunto dado não é único, dependendo do método adoptado. De seguida serão apresentados dois modelos de triangulação.

5.4.1.1. Varrimento Radial

O algoritmo de Varrimento Radial foi publicado pela primeira vez em 1982. Partindo de um conjunto de pontos irregularmente distribuídos, o algoritmo desenvolve-se da seguinte forma:

- 1) Determinar o ponto mais próximo do centróide do conjunto de pontos (ponto focal);
- 2) Calcular do ponto focal para todos os outros;
- 3) Ordenar os pontos segundo o azimute calculado;
- 4) Desenhar para todos os pontos a linha que os une ao ponto focal;
- 5) Unem-se todos os pontos aos pontos adjacentes na ordenação por azimutes;
- 6) Fecham-se as concavidades da triangulação gerada no passo anterior;
- 7) Testar cada par de triângulos adjacentes e proceder da seguinte forma – se o comprimento do lado comum aos dois triângulos for superior à distância entre os vértices não comuns então substitui-se a aresta comum pela que une os vértices não comuns (o que por vezes poderá não ser possível);
- 8) Repetir o passo 7 até que não ocorram mais alterações de arestas.

5.4.1.2 Triangulação de Delaunay

A triangulação de Delaunay é a mais frequentemente utilizada na construção de modelos de terreno. Essa triangulação tem a propriedade de a circunferência definida pelos três pontos de um triângulo não conter qualquer outro ponto do conjunto de pontos que definem a triangulação.

A construção de uma triangulação de Delaunay é um problema do domínio da computação gráfica, onde a optimização do algoritmo é um factor crítico para permitir o processamento de grandes volumes de dados.

Apresenta-se aqui um algoritmo que, não sendo seguramente o mais eficiente, ilustra a propriedade fundamental, atrás referida, deste processo de construção de triangulação. Este algoritmo baseia-se na construção prévia de um diagrama de Voronoi.

Um diagrama de Voronoi consiste numa divisão do espaço em polígonos, em que cada polígono constitui o conjunto de pontos do espaço mais próximo de um dado ponto, de entre um conjunto $P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, do que de qualquer outro do mesmo conjunto.

O diagrama de Voronoi de P é uma estrutura geométrica formada por P e pelas fronteiras dos polígonos $V(p_i)$.

O grafo de Delaunay do conjunto de pontos P é o grafo (planar) cujos nós são os elementos de P e cujas arestas unem os nós cujos polígonos de Voronoi são adjacentes.

Se não existirem em P quatro pontos co-circulares, o grafo de Delaunay forma uma triangulação de Delaunay (caso contrário, a triangulação não é única).

O diagrama de Voronoi de dois pontos é a bissetriz do segmento que une esses pontos. Sendo esta uma situação de simples definição, uma abordagem à construção de um diagrama de Voronoi consiste na utilização de um processo recursivo, bastando para isso identificar a forma de junção de dois diagramas adjacentes. O desenho da triangulação de Delaunay a partir do diagrama de Voronoi é imediato, estabelecendo as uniões entre os pontos que partilham arestas do diagrama de Voronoi. Desenhar o diagrama de Voronoi a partir da triangulação de Delaunay é também possível, sendo talvez a opção mais comum quando se recorre a algoritmos otimizados de desenhos da triangulação.

A execução de uma triangulação que modele adequadamente o terreno da zona pretendida requer, em geral, que se utilize informação exterior a essa zona. Este procedimento visa assegurar que todos os triângulos de fronteira, necessariamente construídos com falta de informação sejam exteriores à zona útil do modelo, assegurando em simultâneo a compatibilidade com modelos adjacentes (Matos, 2001).

O processo de construção de uma triangulação de Delaunay é exclusivamente geométrico, dependendo a fidelidade ao terreno da superfície de faces triangulares gerada da distribuição dos pontos originais. O facto de não se introduzir outro tipo de informação sobre o relevo poderá conduzir a discrepâncias consideráveis nas zonas de maior variação da forma do relevo.

Devido à insuficiência da modelação somente com base na triangulação, recorre-se à introdução de informação complementar através de linhas de rotura. As linhas de rotura são linhas, em geral tridimensionais, que não podem ser atravessadas por arestas da triangulação. Essas linhas são definidas pelo utilizador com base no conhecimento do terreno, tipicamente são utilizadas linhas de água ou linhas de fecho como linhas de rotura. Em aplicações à engenharia, a superfície do projecto é definida com recurso a linhas de rotura. Nas aplicações a modelos de terreno, a não utilização de linhas de rotura gerará, quase invariavelmente, aplanações nos vales e nas cumieiras. Na Figura 5.3 é representada uma linha de rotura.

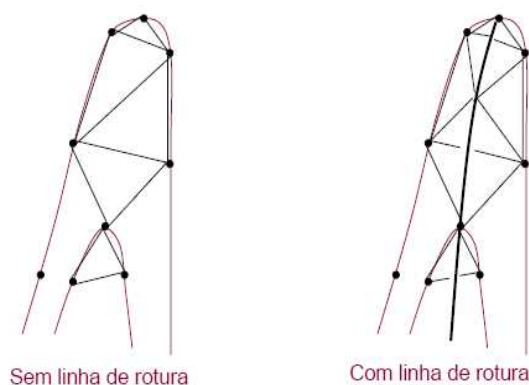


Figura 5.3 – Representação da utilização de linhas de ruptura na geração de um MDT (adaptado de Matos, 2007).

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.

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, 2007).

5.5 FINALIDADE DOS MODELOS DIGITAIS DO TERRENO

Os MDT podem ter diversas finalidades, entre as quais:

- 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;
- Cálculo de declives, gradientes (máxima taxa de variação do declive), e orientações (directção 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 (Melo e Silva, 2008).

5.6 MODELOS DIGITAIS DO TERRENO E MODELAÇÃO HIDROLÓGICA

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 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.

Na caracterização dos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica por recurso a SIG, os seguintes pontos podem condicionar os resultados obtidos pelos modelos na altura da simulação:

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.

A escala da cartografia original determina a capacidade de pormenorização do modelo digital do terreno e, conseqüentemente, todos os dados que se obtêm a partir deste. Como tal, a dimensão da bacia hidrográfica em estudo condiciona essa escolha. As bacias hidrográficas de pequenas dimensões implicam escalas bastante grandes, enquanto as maiores podem ser suportadas por escalas mais pequenas, 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 como numa bacia de maiores dimensões.

Associado à questão da escala, surge o conceito da área mínima de drenagem capaz de gerar escoamento em canal. De acordo com Grayson *et al.*, 1992, 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. No entanto, 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.

A resolução do modelo digital de terreno diz respeito à dimensão da quadrícula. Uma pequena resolução implica uma quadrícula (*pixel*) de dimensões reduzidas e, como tal, o respectivo MDT com um elevado grau de detalhe. É imperativo que se encontre um compromisso entre a escala de dados digitais disponível e a resolução da quadrícula do MDT. Garbrecht e Martz, 1993, aconselham que a dimensão da quadrícula deve ser cerca de 5% do quociente entre a área de

cada elemento da quadrícula e a área média que escoar directamente para o respectivo elemento da rede de drenagem (área mínima de drenagem).

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, 1994). 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). Ambas, rede de drenagem e bacia hidrográfica, são convertidas, de forma automática, por operações espaciais, 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.

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. Estes pontos de acumulação podem ser removidos através da eliminação das depressões previamente à aplicação dos métodos de geração de rede de drenagem e respectiva bacia hidrográfica, ou através da eliminação dos pontos de acumulação após o delineamento da rede de drenagem.

5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os SIG permitem o cruzamento de dados temáticos de diferentes origens proporcionando a geração automatizada de informação de síntese, que corresponde ao conjunto de parâmetros que serve de *input* aos modelos hidrológicos.

Assim, a derivação automática de parâmetros hidrológicos com base em cartas temáticas digitais, constitui uma das áreas de aplicação dos SIG quando estes são ligados a modelos hidrológicos. Ao longo do capítulo 6 tornar-se-á evidente o conjunto de parâmetros que, com base na mais diversa informação digital georreferenciada disponível, pode ser obtido por recurso aos SIG.

CAPÍTULO 6

APLICAÇÃO AO ESTUDO DA BACIA HIDROGRÁFICA DA RIBEIRA DE VALADARES

6.1 INTRODUÇÃO

Com base no desenvolvimento de todas as componentes teóricas referidas nos capítulos anteriores, que permitiram uma melhor compreensão da temática abordada nesta dissertação, foi elaborado o trabalho prático descrito neste capítulo e no seguinte. A área de estudo escolhida foi a 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.

Um dos pontos mais importantes desta bacia hidrográfica é o facto de a área urbana em questão se encontrar em franca expansão e as modificações introduzidas quer no revestimento, quer na ocupação do solo potenciarem a intensidade das cheias (pela redução das perdas por intercepção/retenção e favorecimento da impermeabilização da bacia) como reduzirem 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 relevantes atendendo a que se trata 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 de extrema importância a sua capacidade de previsão em tempo real. 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.

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 hidrologicamente, individualizar as diferentes partes integrantes do modelo hidrológico e sua respectiva parametrização.

No presente capítulo descreve-se a área de estudo, a metodologia empregue, o *software* utilizado no desenvolvimento de um modelo de hidrológico, e apresentam-se os resultados da simulação efectuada para um cenário actual da bacia da Ribeira de Valadares.

6.2 SOFTWARES 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.

6.3 ÁREA DE ESTUDO

Para aplicação da metodologia desenvolvida, torna-se essencial fazer a caracterização da área de estudo. Assim, é apresentada de seguida uma caracterização da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares relativamente aos seguintes temas:

1. Localização geográfica da bacia hidrográfica;
2. Geologia do local onde se insere a bacia;

3. Classificação do tipo de solos, do ponto de vista hidrológico;
4. Ocupação do solo da bacia hidrográfica;
5. Caracterização do clima da bacia hidrográfica
6. Caracterização demográfica e urbanística da área em estudo.

É importante salientar que, nesta primeira abordagem, o polígono utilizado para delimitar a área da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares (informação cartográfica digital em formato vectorial) foi disponibilizado pela Gaiurb, EM, que se trata da Empresa Municipal responsável pelo sistema de gestão e planeamento territorial do Município de Vila Nova de Gaia.

6.3.1 Localização

Para fazer o enquadramento da área de estudo dispôs-se dos seguintes dados:

- Cartografia digital gentilmente disponibilizada pela empresa Gaiurb;
- Informação *raster* constante das Cartas Militares ocupadas pela referida bacia (nº 122 e 133) à escala 1:25 000, informação adquirida ao Instituto Geográfico do Exército (IGeoE);
- Limites administrativos em formato vectorial disponibilizados gratuitamente pelo Instituto Geográfico Português (IGP) no seu portal de *Internet*.

No *datum* Lisboa, projecção de Gauss-Kruger (capítulo 2), 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 6.1 é possível visualizar a bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, e a sua localização, quer geográfica, quer administrativa.

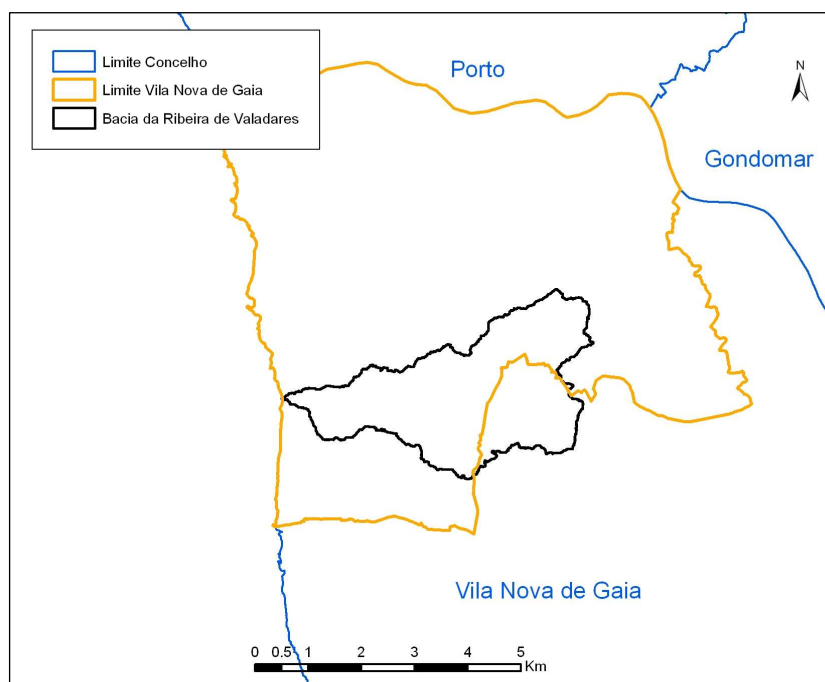


Figura 6.1 - Representação da delimitação da bacia de Valadares e dos limites administrativos do concelho e da cidade de Vila Nova de Gaia (fontes: Gaiurb, IGeoE e IGP).

A Ribeira de Valadares desenvolve-se ao longo de cerca de 6,94 Km, surgindo cartografada no seu ponto mais a montante próximo da localidade de Guardal, freguesia de Vilar do Paraíso no concelho de Vila Nova de Gaia, e aflui à zona costeira Sul do concelho na freguesia de Valadares (Figura 6.2).

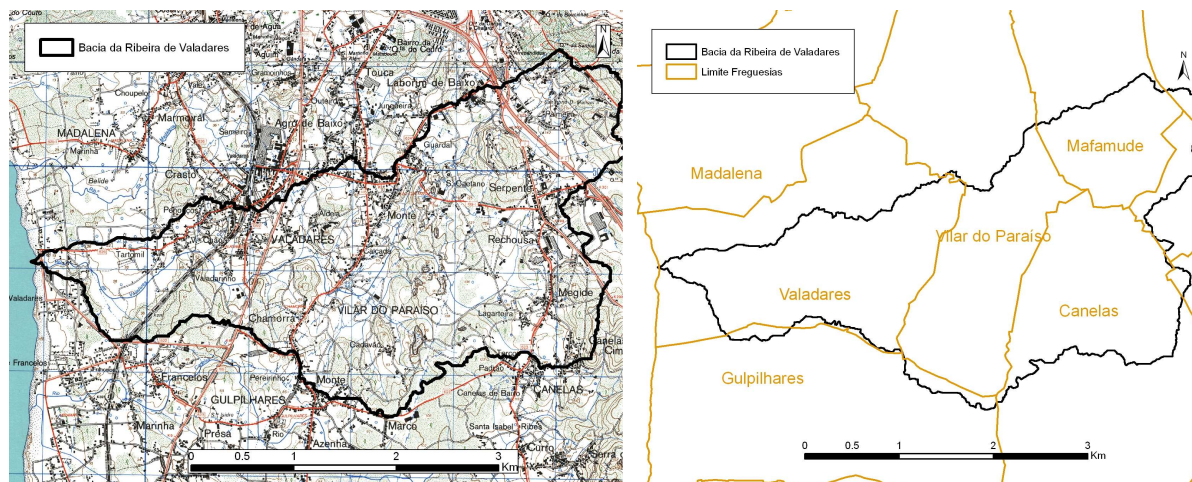


Figura 6.2 – Cartogramas representativos das Cartas Militares referidas e da delimitação administrativa, a nível da freguesia, da bacia de Valadares (Fonte: Gaiurb, IGeoE e IGP).

De acordo com o polígono delimitante, e recorrendo a operadores espaciais (dentro do SIG) de cálculo de comprimentos e áreas, foi possível determinar a área da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, que conta com cerca de 9,92 Km².

Como é evidenciado pela Figura 6.2, a área da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares encontra-se distribuída maioritariamente por 4 freguesias. No entanto, na realidade abrange 8 freguesias do concelho de Vila Nova de Gaia, na Tabela 6.1 estão listadas essas freguesias com as respectivas áreas de intercepção com a bacia de Valadares.

Tabela 6.1 - Valor das áreas de intercepção da bacia de Valadares com as freguesias do concelho de Vila Nova de Gaia e respectivas fracções percentuais da sua área total.

Freguesia	Área (Km²)	Fracção da área total (%)
Canelas	2,50	25,2
Gulpilhares	0,21	2,1
Mafamude	1,34	13,5
Oliveira do Douro	0,07	0,7
Pedroso	0,05	0,5
Valadares	2,91	29,3
Vilar de Andorinho	0,33	3,3
Vilar do Paraíso	2,52	25,4
Total	9,92	100,0

6.3.2 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 6.3 representa as formações geológicas que ocorrem na referida bacia.

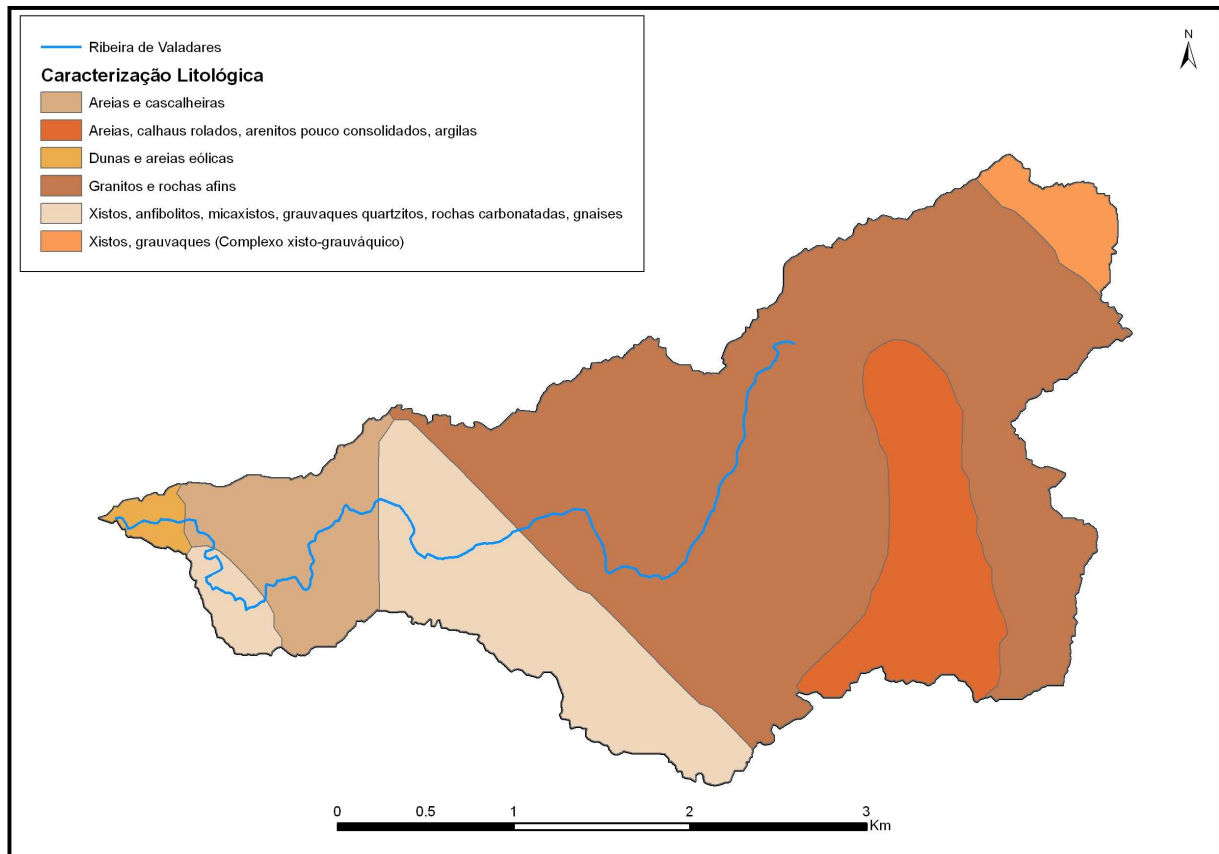


Figura 6.3 – Cartograma representativo da litologia da bacia de Valadares (fonte: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente).

Através da análise da Figura 6.3 e da Tabela 6.2, é possível verificar que existe uma predominância de formações graníticas nas zonas de montante, indiciando uma possível relevância do escoamento intermédio para estas zonas, bem como valores baixos de infiltração profunda (percolação). Por outro lado, a jusante, predominam as zonas arenosas, que no seu conjunto representam cerca de 20% da área total da bacia, este facto indica valores de infiltração potencialmente 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 6.2 – Valores das áreas de cada uma das classes litológicas compreendidas na bacia de Valadares e respectivas fracções percentuais da sua área total.

<i>Designação Litológica</i>	<i>Área (Km²)</i>	<i>Fracção da área total (%)</i>
Areias e cascalheiras	0,86	8,7
Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas	1,17	11,8
Dunas e areias eólicas	0,10	1,1
Granitos e rochas afins	5,80	58,5
Xistos, anfibolitos, micaxistos, grauvaques quartzitos, rochas carbonatadas, gnaises	1,71	17,2
Xistos, grauvaques (complexo xisto-grauváquico)	0,28	2,8
Total	9,92	100,0

6.3.3 Tipo Hidrológico de Solos

Por georreferenciação da Figura 4.13 (capítulo 4), 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 6.4, 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.

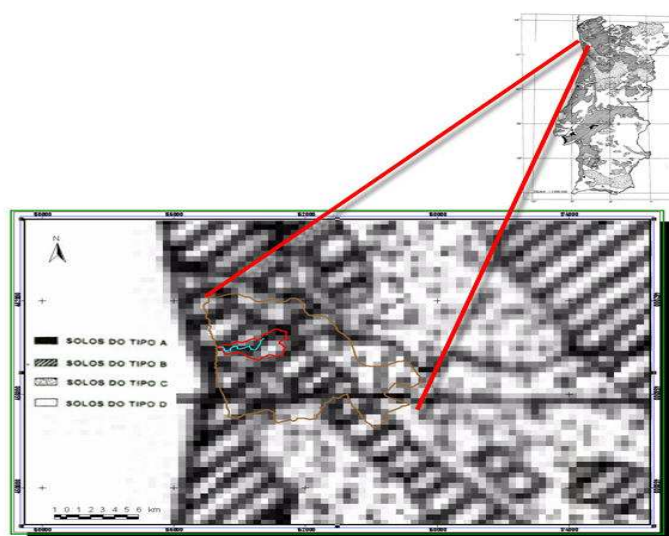


Figura 6.4 – Representação do tipo Hidrológico de solos da bacia de Valadares (fonte: Lencastre e Franco, 1984).

6.3.4 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 6.5.

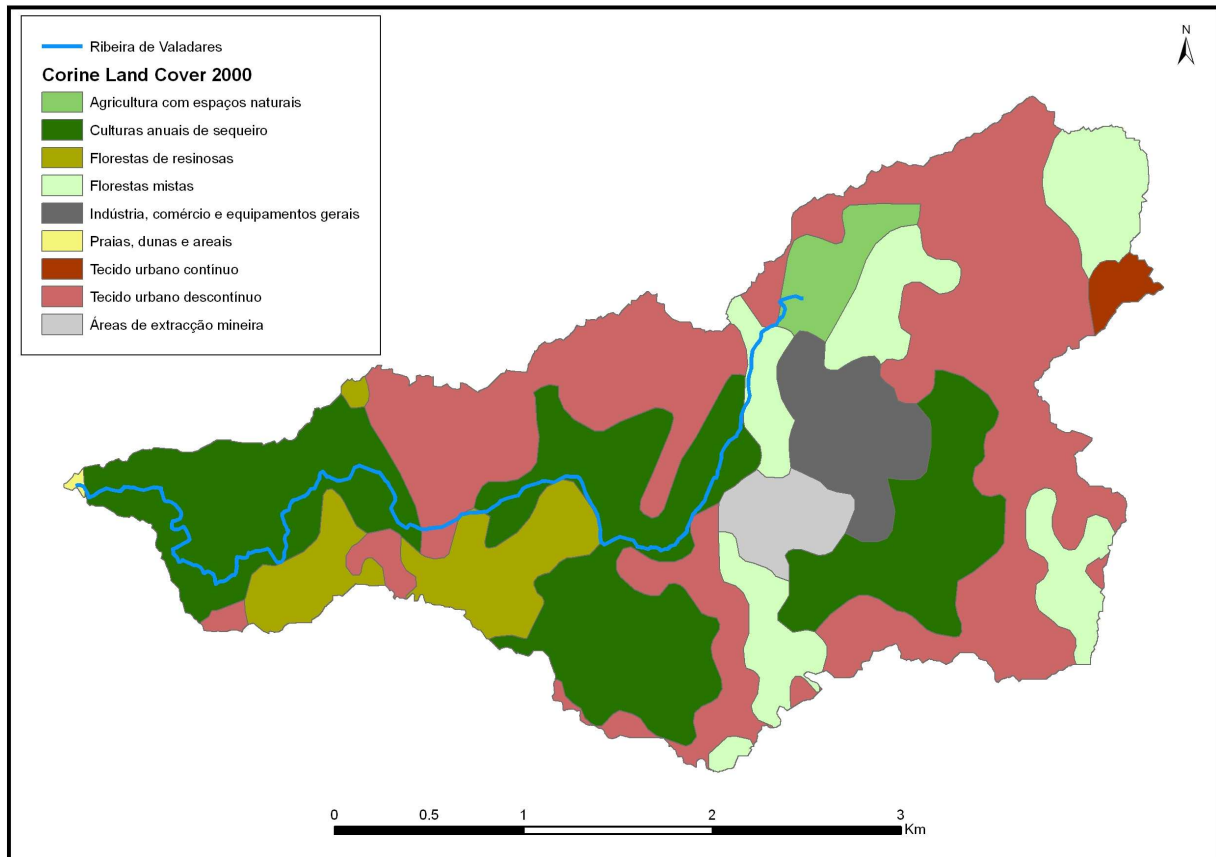


Figura 6.5 - Cartograma representativo da ocupação do solo da bacia de Valadares (fonte: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente).

Por análise espacial do cartograma representado na Figura 6.5 resulta a Tabela 6.3, 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 (31,4%). 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.

Do ponto de vista hidrológico os valores expressos têm 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 (cerca de 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.

Tabela 6.3 - 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.

<i>Ocupação do solo</i>	<i>Área (Km²)</i>	<i>Fracção da área total (%)</i>
Áreas de extracção mineira	0,27	2,7
Agricultura com espaços naturais	0,25	2,5
Culturas anuais de sequeiro	3,11	31,4
Florestas de resinosas	0,70	7,0
Florestas mistas	1,23	12,4
Indústria, comércio e equipamentos gerais	0,52	5,2
Praias, dunas e areais	0,01	0,1
Tecido urbano contínuo	0,09	0,9
Tecido urbano descontínuo	3,75	37,7
Total	9,92	100,0

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.

6.3.5 Clima

Para a caracterização climática da bacia de Valadares, foram utilizados 4 parâmetros:

- Evapotranspiração real média anual;
- Temperatura média anual;
- Precipitação total;
- Insolação média anual.

Foi efectuada uma operação de sobreposição em SIG, da informação disponibilizada gratuitamente no Atlas do Ambiente Digital do Instituto do Ambiente com o limite da bacia de Valadares. Os cartogramas resultantes dessa sobreposição e que permitiram aferir a gama de valores correspondente a cada um dos parâmetros encontram-se representados na Figura 6.6.

No que respeita à evapotranspiração real média anual, temperatura média anual, precipitação total e insolação média anual para o período de 1931 a 1960, a bacia de Valadares apresenta valores de 600 a 700 mm, 12,5° a 15°C, 1000 a 1200 mm, e 2600 a 2700 horas, respectivamente.

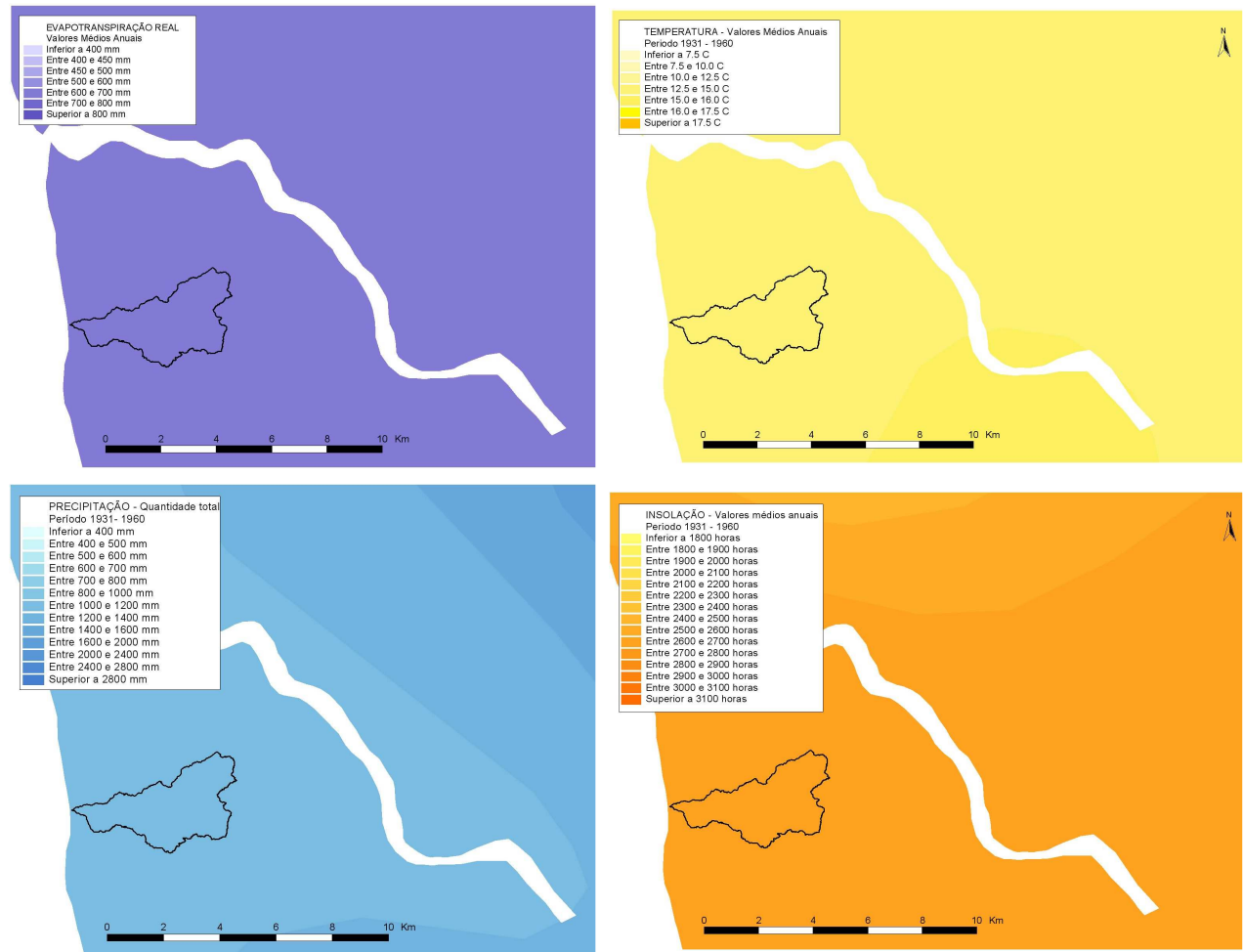


Figura 6.6 - Cartogramas representativos dos parâmetros considerados para a caracterização climática da bacia de Valadares.

6.3.6 Demografia e Urbanização

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

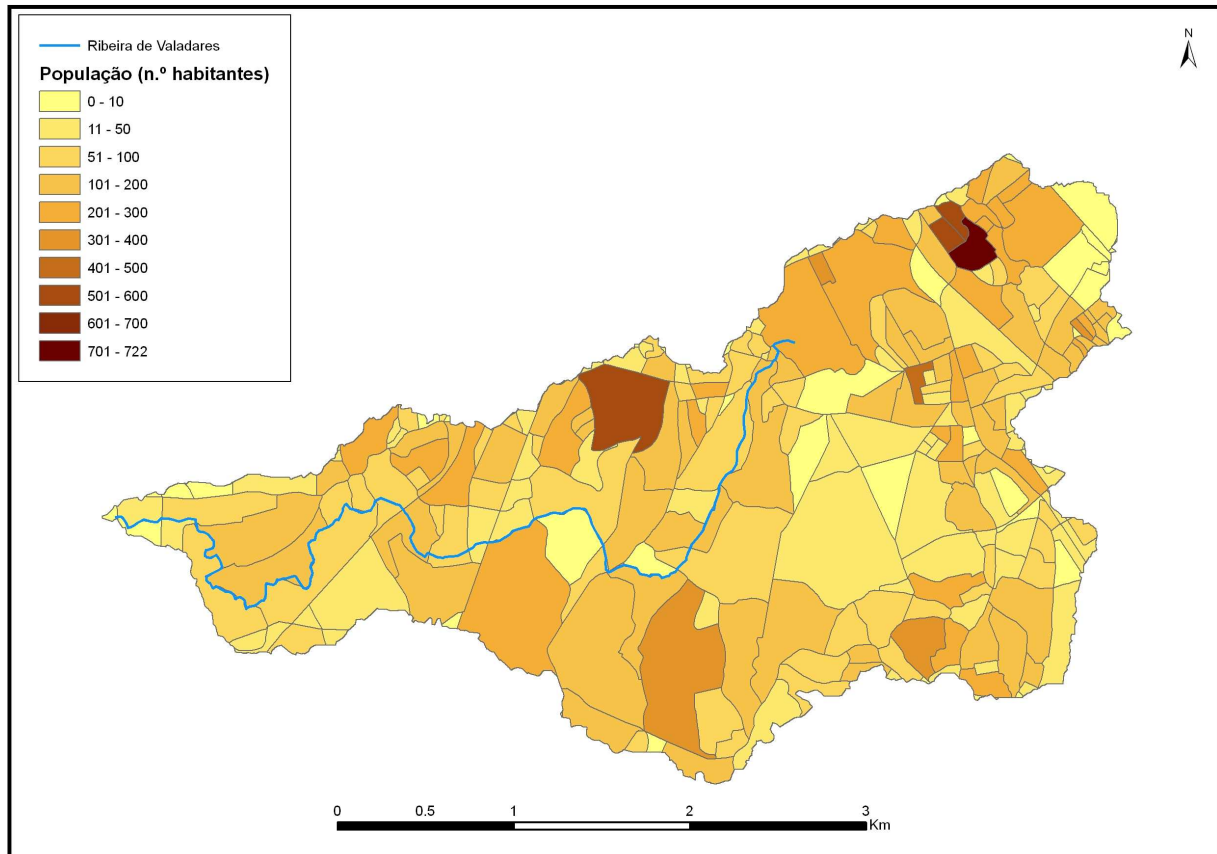


Figura 6.7 – Cartograma representativo da distribuição da população por subsecção estatística para a bacia de Valadares (fonte: Instituto Nacional de Estatística).

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 recalcular a sua área e multiplicar 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 25 613 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.

Relativamente ao urbanismo, foi possível determinar proporção da área da bacia de Valadares ocupada por edificações através da sobreposição do polígono delimitante da bacia de Valadares com a cartografia cedida pela Gaiurb relativa ao edificado no concelho de Vila Nova de Gaia (Figura 6.8).

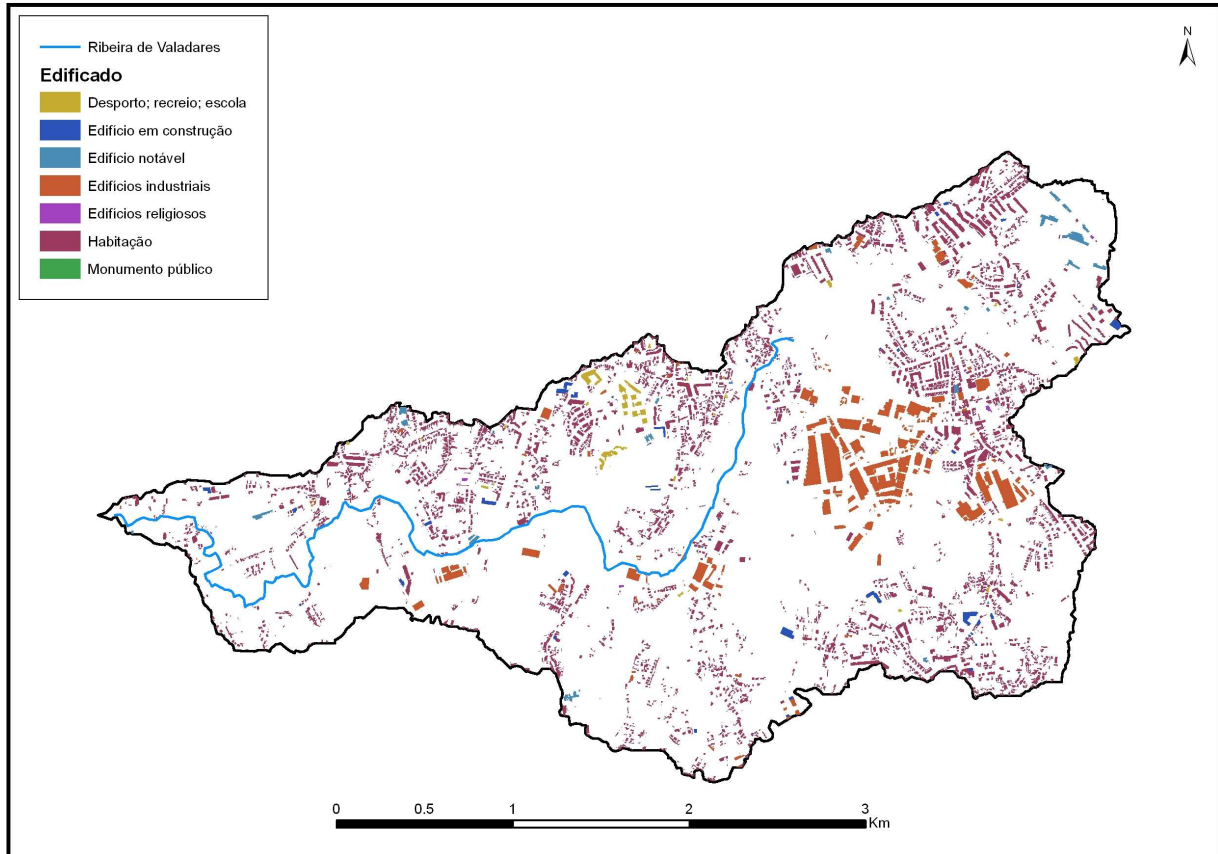


Figura 6.8 – Cartograma representativo da distribuição do edificado na bacia de Valadares (fonte: Gaiurb).

Através da análise espacial deste cartograma, verifica-se que a área total ocupada por edificado na bacia de Valadares é de 1,21 Km², onde predomina a habitação (cerca de 70%), e os edifícios industriais com 24% da área ocupada com edificado.

6.3.7 Resumo

Recorrendo ao SIG e a informação em formato digital, georreferenciada e, de um modo geral, facilmente acessível, foi possível caracterizar a bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares.

Na Tabela 6.4 encontra-se sistematizada a informação digital a que se recorreu na elaboração do corrente capítulo.

Tabela 6.4 – 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	http://www.apambiente.pt/
	Carta Litológica	Atlas do Ambiente Digital	
	Evapotranspiração		
	Precipitação Total		
	Temperatura Média Anual		
Instituto Geográfico Português	Carta Administrativa Oficial de Portugal	Informação Cadastral	http://www.igeo.pt/produtos/cadastro/caop/
Instituto Geográfico do Exército	Cartas Digitais de Portugal Continental em Formato <i>raster</i>	Informação Cartográfica Digital	http://www.igeoe.pt/

De forma a tornar a construção e interpretação do modelo hidrológico mais objectiva, foram tidos em linha de conta muitos dos pontos desta caracterização. Assim, foram tecidas as seguintes considerações que condicionarão a interpretação do modelo:

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

6.4 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA

Convencionalmente a caracterização fisiográfica é feita através do tratamento manual da cartografia e utilizando um conjunto de fórmulas empíricas. Neste trabalho a análise do relevo da bacia hidrográfica foi feita com recurso ao SIG e ao MDT.

6.4.1 Modelo Digital do Terreno (MDT)

A elaboração do Modelo Digital do Terreno (MDT) é o primeiro passo conducente à geração do modelo hidrológico.

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 do terreno.

Assim, é 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 esse cálculo é executado, esta situação pode assumir contornos 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.

Como tal, e atendendo a que a bacia da Ribeira de Valadares apresenta uma área bastante reduzida, a utilização de cartografia de âmbito mais genérico, como as cartas militares à escala de 1:25 000, não preenche os requisitos da tarefa a realizar. Utilizou-se então, a cartografia altimétrica digital à escala de 1:2 000, gentilmente cedida pela empresa Gaiurb.

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.

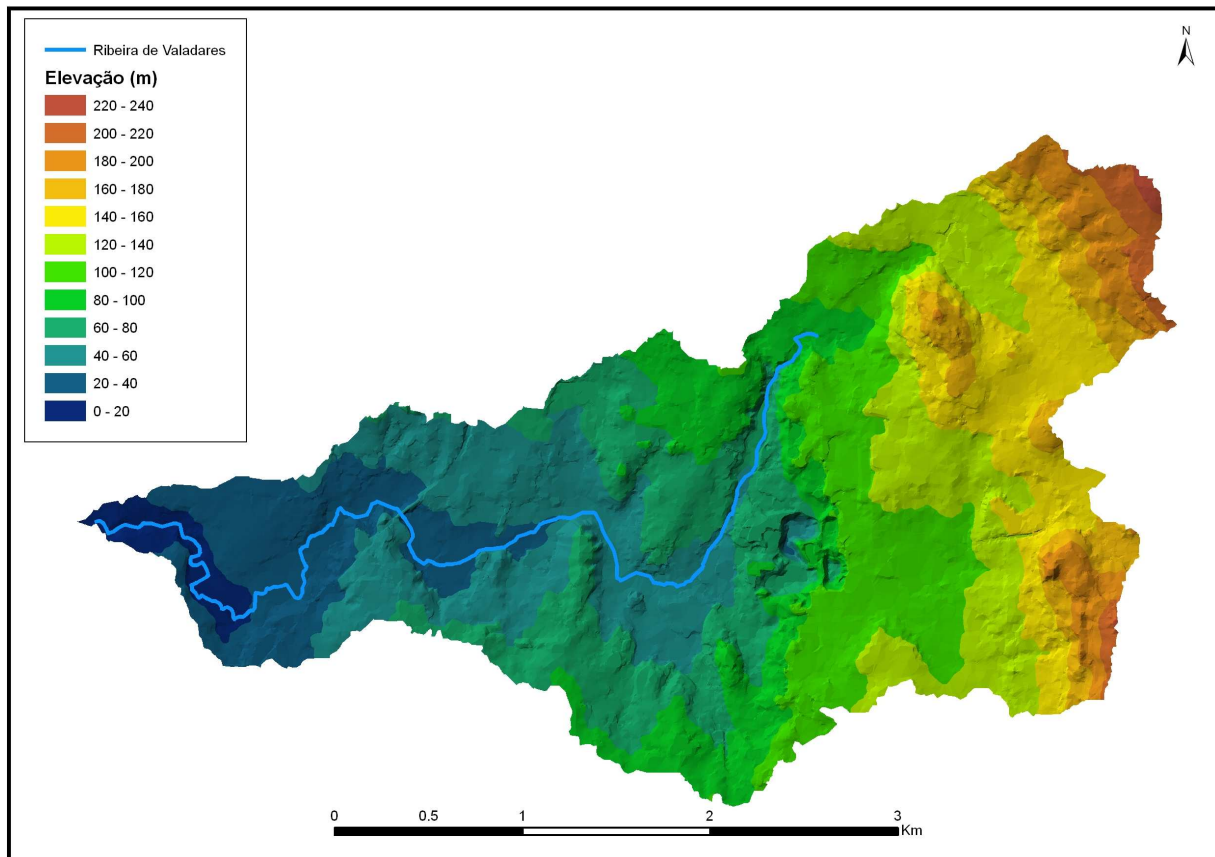
O software utilizado para a construção do MDT foi o Arcinfo 9.1, recorrendo a uma das suas extensões – *3D analyst*. Este é um módulo específico para a construção e manipulação de modelos digitais do terreno.

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 6.9 é apresentada uma representação do MDT 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*.

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 6.10). 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).



6.9 – Representação do MDT do da bacia da Ribeira de Valadares na sua forma TIN.

Na construção do MDT na sua forma *raster* usou-se uma resolução de 1 m para as células, obtendo-se 3.628 linhas e 5.897 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.

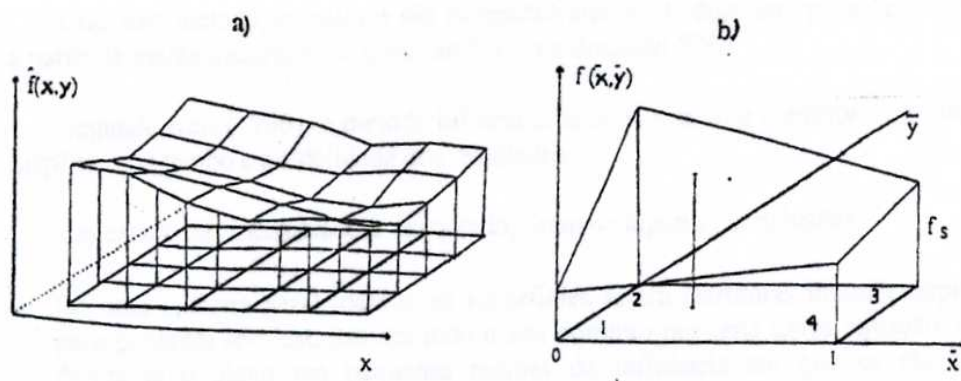


Figura 6.10 – Representação gráfica do processo de interpolação bilinear ao MDT. a) Obtenção da grelha; b) Interpolação num *pixel* da grelha, nas direcções x e y (extraído de Granado, 1996).

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. 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 (Melo e Silva, 2008).

6.4.2 Caracterização do Relevo

No processo de caracterização do relevo da bacia da Ribeira de Valadares, recorreu-se ao MDT gerado. Esta caracterização abordou dois pontos: a construção da curva hipsométrica, e a elaboração da carta de declives.

A curva hipsométrica (Figura 6.11) 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 as altitudes da bacia hidrográfica de modo a que os intervalos altimétricos distem de 20 m, e posteriormente foi feita a sua vectorização. Desta forma a cada intervalo altimétrico de 20 m corresponde um polígono com um valor de área mensurável. Através do cálculo das áreas referentes a cada classe hipsométrica, foram obtidos os valores expressos na Tabela 6.5.

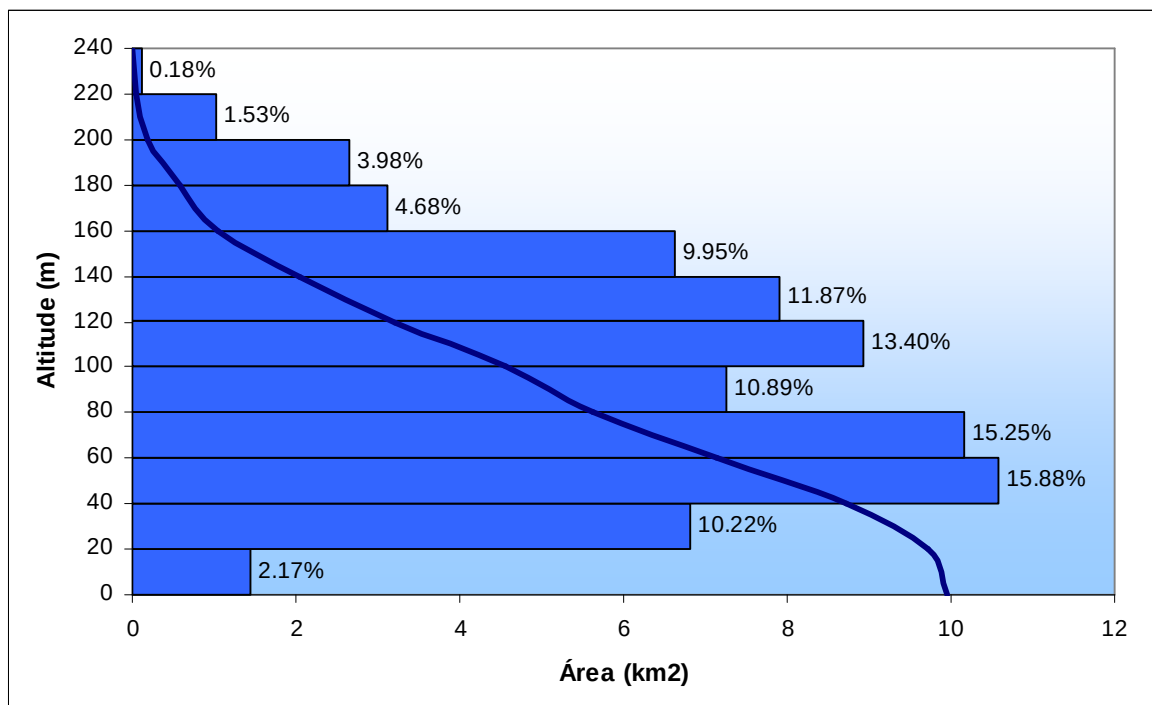


Figura 6.11 – Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares.

Da análise da Figura 6.11 e da Tabela 6.5, é possível constatar que a classe de altitude mais representativa desta bacia hidrográfica, se situa entre os 40 e 60 m e corresponde a 15,9% da área da bacia.

Tabela 6.5 - Distribuição da área da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, seu valor de área acumulada e respectivas fracções percentuais da área total, por classes hipsométricas.

Altitude (m)	Área (km ²)	Área (%)	Área acumulada (km ²)	Área acumulada (%)
220 - 240	0,22	2,17	0,22	2,2
200 - 220	1,01	10,22	1,23	12,4
180 - 200	1,58	15,88	2,81	28,3
160 - 180	1,51	15,25	4,32	43,5
140 - 160	1,08	10,89	5,40	54,4
120 - 140	1,33	13,40	6,73	67,8
100 - 120	1,18	11,87	7,91	79,7
80 - 100	0,99	9,95	8,89	89,6
60 - 80	0,46	4,68	9,36	94,3
40 - 60	0,39	3,98	9,75	98,3
20 - 40	0,15	1,53	9,90	99,8
0 - 20	0,02	0,18	9,92	100,0

Foi também possível traçar o perfil longitudinal da Ribeira de Valadares (Figura 6.12). Esta ribeira evidencia um troço de montante, numa extensão de cerca de 1,6 Km, com um declive de aproximadamente 2,6%, a que se segue um troço com cerca de 5 Km bastante plano (inclinação inferior a 1%).

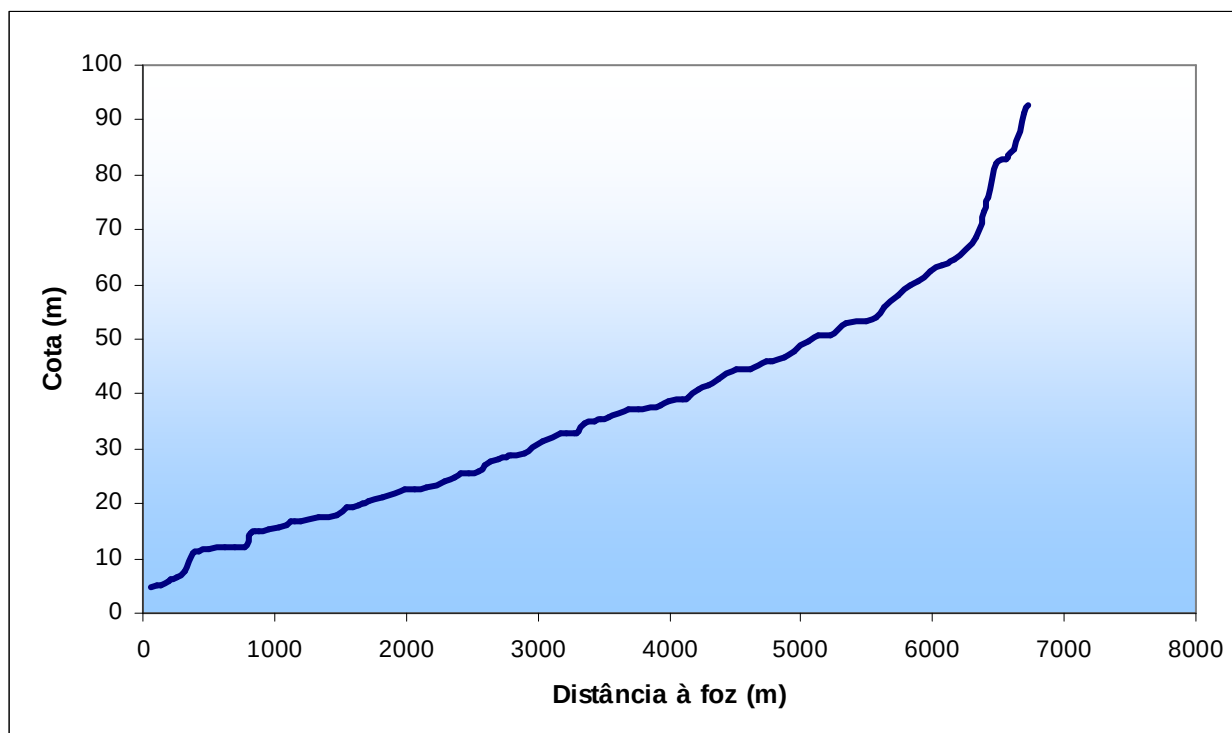


Figura 6.12 – Perfil longitudinal da Ribeira de Valadares.

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 para delineamento de bacias hidrográficas. O resultado, expresso como a medida de um ângulo, em graus, apresenta-se na Figura 6.13.

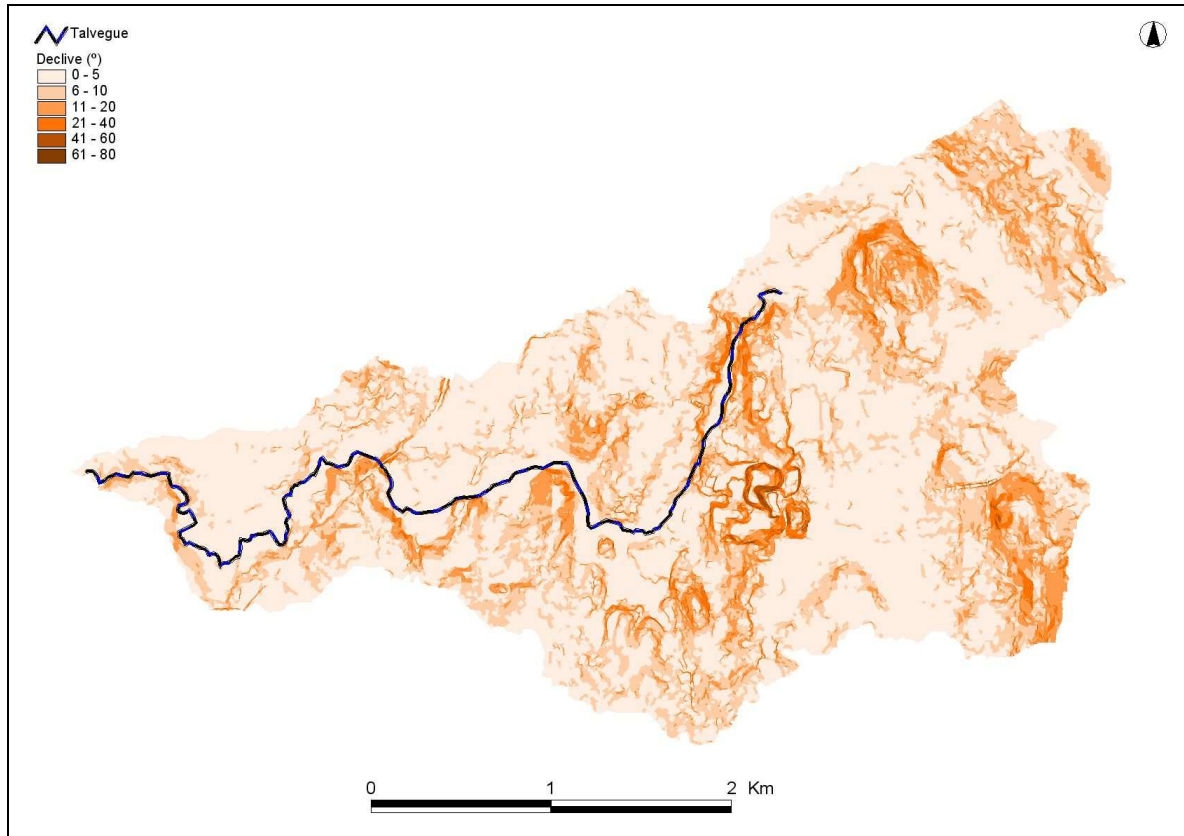


Figura 6.13 – Carta de declives da bacia da Ribeira de Valadares.

A carta de declives permite verificar que dominam valores ligeiros a moderados (0-10°), 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°) e mesmo muito acentuados (> 20°).

6.5 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.

Neste subcapítulo pretende-se delinear a rede de drenagem da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares através do processamento do MDT. O grau de detalhe que se procura obter poderá não ter uma tradução real. No entanto, o reconhecimento pormenorizado desta rede, apresenta-se como uma mais-valia do ponto de vista da modelação hidrológica, já que, na ocorrência de um evento de precipitação, muitos dos pequenos vales que não apresentam um escoamento

permanente, irão ser fundamentais no encaminhamento da água sendo, deste modo, mais exequível a sua tradução num modelo físico (Melo e Silva, 2008).

A rede de drenagem gerada é constituída por segmentos, aos quais correspondem unidades hidrológicas diferenciadas dentro da bacia hidrográfica, denominadas por sub-bacias. Estas sub-bacias, resultam da identificação da área drenante para cada segmento da referida rede.

Procurar-se-á que a as sub-bacias correspondam a zonas homogéneas, de forma a que estas subunidades tenham características de uso do solo, geológicas e de tipos 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 9,9 Km²) se traduz, na realidade, num modelo quase distribuído, colhendo os benefícios das duas abordagens.

6.5.1 Software utilizado

O *software* escolhido para levar a cabo o processamento do MDT elaborado foi o HEC-GeoHMS (*Hydrologic Engineering Center – Geospatial Hydrologic Modeling Extension*), 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 (Melo e Silva, 2008).

6.5.2 Processamento

Este trata-se de um processo que se pode dividir basicamente em quatro etapas, sendo elas:

1. Eliminação de depressões do MDT;
2. Geração da grelha de direcção do escoamento;
3. Geração da grelha de escoamento acumulado;
4. Delineamento de bacia, sub-bacias, e rede de drenagem.

Numa primeira fase, é necessário eliminar as depressões do terreno. O algoritmo utilizado pela extensão HEC-GeoHMS realiza 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.

A operação executada na extensão HEC-GeoHMS foi a *fill sinks* do menu *terrain preprocessing*.

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

Para a obtenção da grelha de direcção do escoamento, trabalha-se sobre a grelha livre de depressões altimétricas já produzida, e aplicando o modelo de O'Callaghan & Mark, 1984, usualmente designado por modelo do D8 (*Deterministic eight point*), é possível derivar a grelha de direcção do escoamento.

Esta grelha 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 m^2 é atribuído um número que denota a direcção do escoamento, ou o *pixel* adjacente, para o 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.

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 obtenção da grelha de escoamento acumulado, é a etapa seguinte, baseada na grelha de direcção do escoamento. Nesta fase é determinado o número de células que drenam para uma dada célula. 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, mãos 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.

Com os dois tipos de grelhas previamente elaborados, é possível afigurar-se uma imagem das características hidrológicas do terreno. Com base nos dados obtidos, é possível analisar a elevação do terreno, as tendências gerais do escoamento e as respectivas áreas drenantes. Simultaneamente, é possível 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*.

O passo seguinte é a individualização da rede de drenagem. Para tal, são identificados separadamente os segmentos individuais e, de acordo com as células de confluência ou nós, torna-se possível a identificação e análise de um segmento particular da rede, apontando para uma primeira relação de conectividade do sistema. Nesta etapa é utilizada a operação *stream segmentation* do menu *terrain preprocessing*, igualmente da extensão HEC-GeoHMS.

No final das etapas referidas anteriormente, é possível apresentar-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*.

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.

A Figura 6.14 representa o resultado final obtido. A cada segmento da rede hidrográfica corresponde uma sub-unidade 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.

As áreas dos polígonos delimitados e os comprimentos dos respectivos segmentos de drenagem representados na Figura 6.14 são apresentadas na Tabela 6.6. O seu cálculo recorre a comuns operações de análise espacial. De referir que esta informação é incorporada na base de dados associada a estes elementos vectoriais através da extensão HEC-GeoHMS.

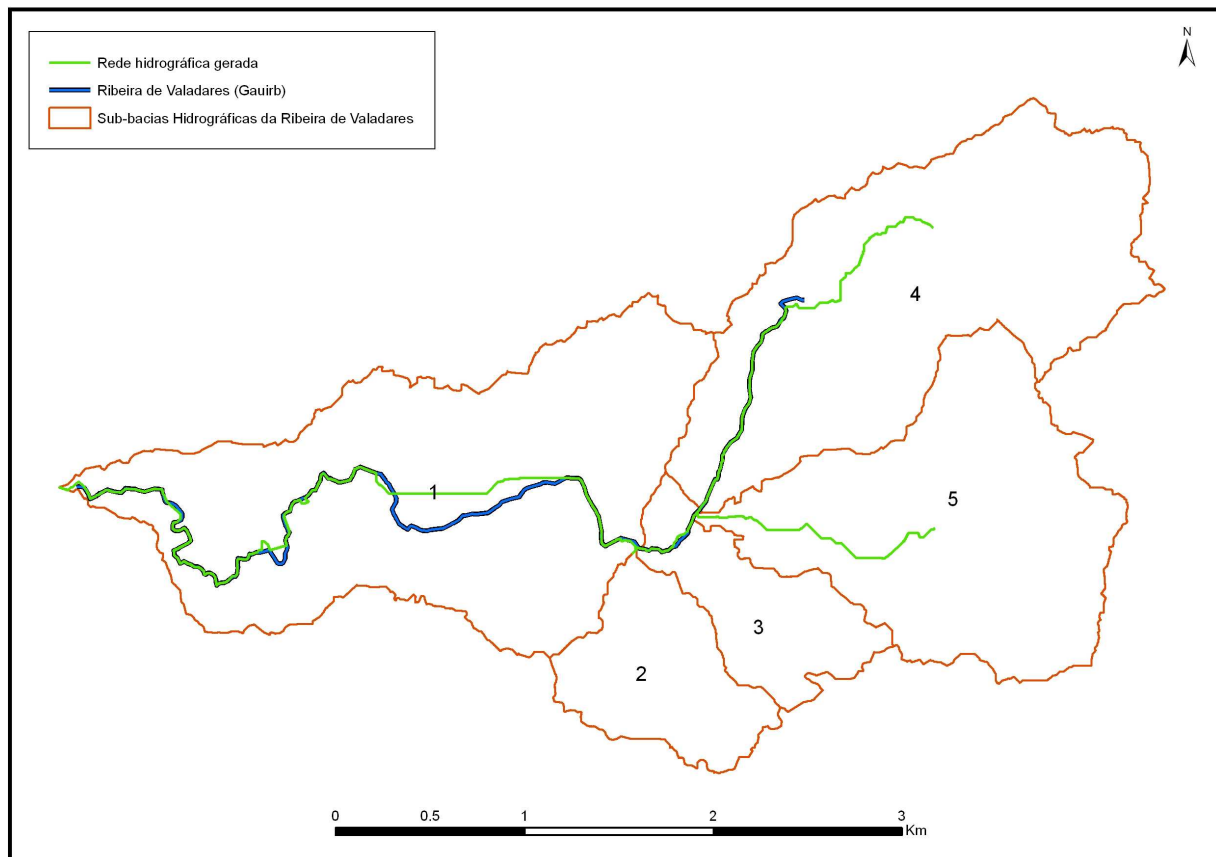


Figura 6.14 – Representação da rede de drenagem (gerada e cedida) e respectivas subunidades hidrológicas, em formato vectorial, para a bacia de Valadares.

Relativamente à rede hidrográfica gerada e por contraste com o elemento vectorial disponibilizado pela empresa Gaiurb, observa-se uma concordância satisfatória. O local da rede hidrográfica onde estas duas cartografias diferem na sub-bacia 1 apresenta-se, possivelmente, como parte do leito maior da Ribeira de Valadares. Por causas naturais ou artificiais, também uma provável área inundável.

Tabela 6.6 - Distribuição da área da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, seu valor de área acumulada e respectivas fracções percentuais da área total, por classes hipsométricas.

Sub-bacia (número)	Área (Km ²)	Comprimento da linha de água (Km)
1	3,42	4,94
2	0,76	0,05
3	0,68	0,48
4	2,82	2,50
5	2,24	1,51
Total	9,92	9,48

6.6 ELABORAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

Através do modelo hidrológico é possível simular a resposta a eventos de precipitação para diferentes cenários, quer na forma de previsões futuras, quer como respostas a eventos passados. 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 um conjunto 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.

De seguida pretende-se descrever as etapas a percorrer na criação de um modelo hidrológico.

6.6.1 Software 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 (Melo e Silva, 2008).

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)

Este programa apresenta algumas limitações:

- 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;
- 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.

6.6.2 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.

No seguimento do delineamento elaborado em 6.5, foram ainda efectuados os seguintes passos:

- Interpolação da rede de drenagem ao MDT através do comando *river slope*, do menu *basin characteristics*, recorrendo à extensão HEC-GeoHMS;
- Determinação do percurso hidráulico mais distante para as subunidades hidrológicas. Para tal, foi efectuada uma análise conjunta da grelha de escoamento acumulado e grelha de individualização dos segmentos que compõem a rede hidrográfica, tornando possível estabelecer qual a maior distância percorrida para atingir determinado segmento da rede hidrográfica.
- Compilar toda a informação gerada num único ficheiro em formato digital.

O programa HEC-HMS dispõe de diversos modelos para cada uma das componentes referidas em 6.6.1. 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. Este modelo

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.

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 visualizados directamente em hidrogramas, resultantes de tabelas do escoamento em função do tempo, e os valores podem ser alvo de calibração.

Na Figura 6.15 é apresentada uma imagem retirada do *software* HEC-HMS, onde estão esquematizados elementos representativos da bacia: sub-bacias, troços de conectividade entre as sub-bacias, secções terminais das sub-bacias (ST), e a rede hidrográfica gerada.

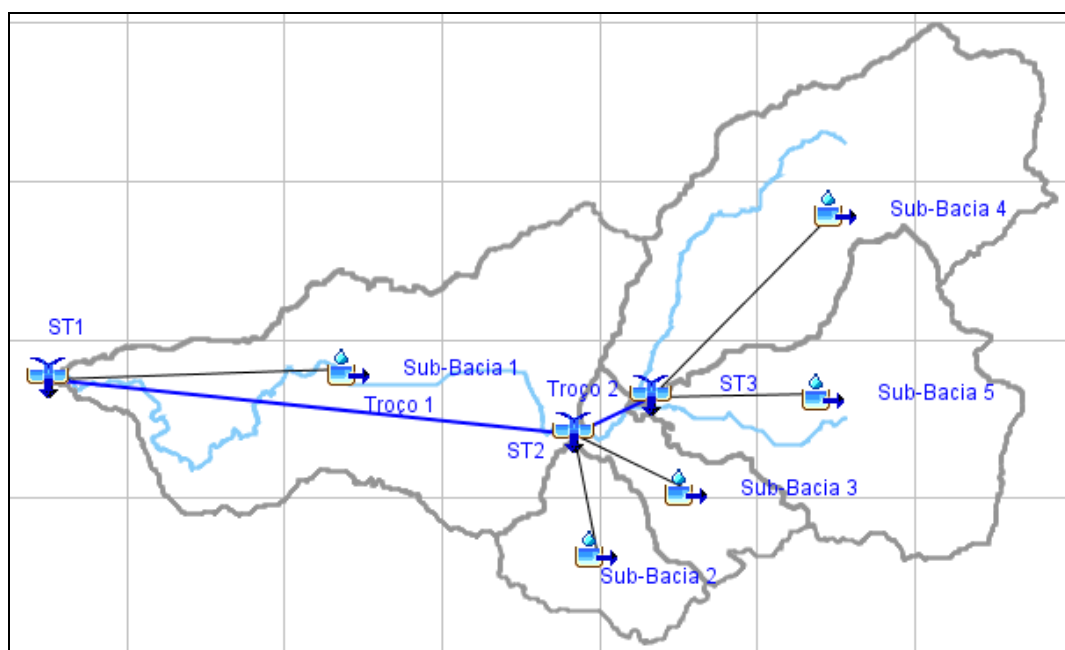


Figura 6.15 – Representação da conectividade entre os diferentes elementos hidrológicos que compõem a bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares.

6.6.3 Modelo Hidrológico

Resumindo os pontos anteriores, constata-se que o *software* HEC-HMS requer um modelo de bacia, um modelo de precipitação, e um conjunto de especificações de controlo para que seja possível executar uma simulação do comportamento hidrológico da bacia. Na Figura 6.16 encontra-se esquematizado o modelo hidrológico abordado no *software* mencionado.

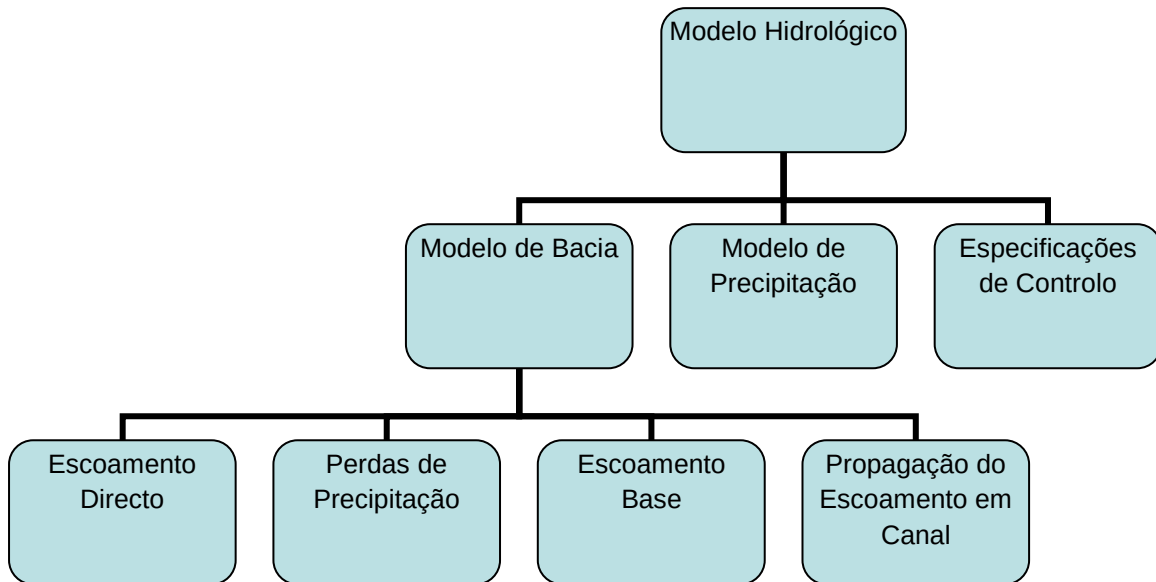


Figura 6.16 – Esquematização da estrutura do modelo hidrológico.

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.

De seguida são descritos os “sub-modelos” constantes do modelo hidrológico.

6.6.3.1 Modelo de Bacia

Com base no modelo de bacia gerado que incorpora 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 componente hidrológicas da bacia da Ribeira de Valadares.

A escolha dos modelos matemáticos de simulação empregues neste trabalho atendeu à sua adequação para a modelação de eventos de precipitação extrema (capítulo 4), e teve em consideração a contingência da ausência de valores observados de escoamento, o que limitou esta escolha e tornou imperativo que estes modelos fossem caracterizáveis de forma física. Isto é, a escolha feita privilegiou modelos adequados à simulação da ocorrência de cheias e, simultaneamente, cujos parâmetros fossem possíveis de obter recorrendo a SIG e informação digital disponível. As diferentes fracções do escoamento superficial foram modeladas através de:

- 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.

6.6.3.1.1 Modelo de Escoamento Directo

O modelo da onda cinemática, tendo por base o conceito físico e expressões matemáticas apresentadas em 4.4.7, 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.

Na Figura 6.17 apresenta-se a divisão efectuada dos planos das sub-bacias, o método de determinação consistiu numa operação em SIG, onde estas foram processadas geograficamente de modo a que os polígonos de cada subunidade fossem cortados através do segmento da linha de água que atravessa essa mesma subunidade. Para que exista uma separação efectiva em duas áreas distintas, é essencial que o segmento em causa atravessasse até à extremidade o polígono da subunidade em processamento, quando tal não acontece (caso das sub-bacias números 3, 4 e 5), foi utilizado o percurso hidráulico mais longo que permitiu o seccionamento das sub-bacias na sua totalidade e coincidiu 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 6.7.

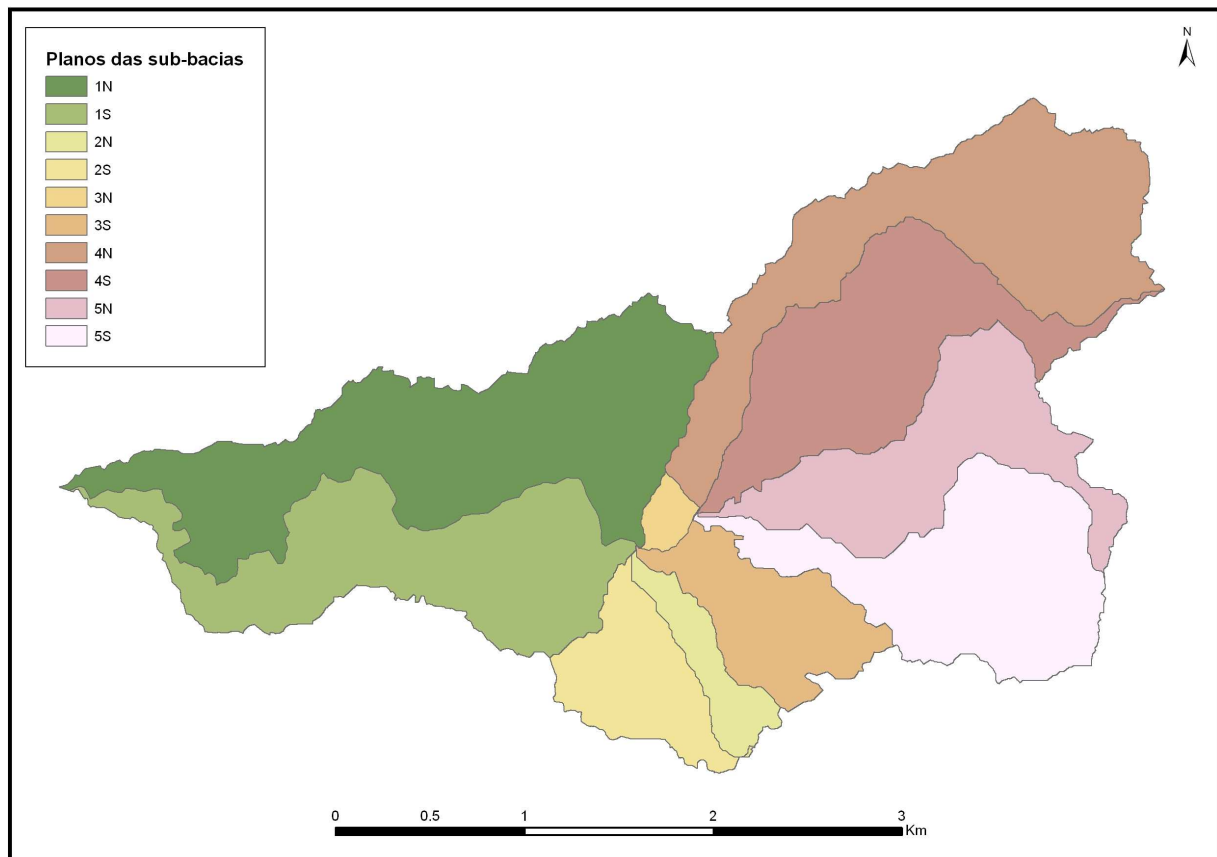


Figura 6.17 – Representação da divisão em planos das sub-bacias da Ribeira de Valadares.

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 6.7 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 6.12, e à rugosidade cinemática, de acordo com o conceito apresentado na Equação (4.22), Capítulo 4, e constantes do Anexo A.

Tabela 6.7 – Valores de alguns dos parâmetros integrantes do modelo da onda cinemática, na sua formulação para escoamento à superfície, para a bacia de Valadares.

Sub-bacia	Área sub-bacia (Km ²)	Comp. da linha de água (L) (Km)	Divisão	Área planos (A) (Km ²)	Área planos (%)	Comp. do modelo cinemático (A/L) (m)	Declive do plano (m/m)
1	3,42	4,87	1N	2,03	59	417,56	0,0737
			1S	1,39	41	286,15	0,1041
2	0,76	1,52	2N	0,25	33	160,47	0,1160
			2S	0,51	67	337,37	0,0912
3	0,68	0,45	3N	0,08	12	175,50	0,0910
			3S	0,60	88	1339,92	0,1014
4	2,82	4,12	4N	1,58	56	384,04	0,1047
			4S	1,24	44	299,35	0,1356
5	2,24	3,24	5N	1,01	45	309,65	0,1057
			5S	1,23	55	380,25	0,1314

O procedimento de determinação do declive dos mencionados planos assemelha-se ao utilizado para corte dos polígonos das subunidades hidroológicas 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 6.12, 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 m² 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:

$$x = Tg\left(\frac{y \cdot \pi}{180}\right) \quad \text{Equação (6.1)}$$

em que:

x – declive (m/m)

y – declive (°)

O valor assim determinado, assim como outros parâmetros relevantes para o carregamento do modelo constam da Tabela 6.7.

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 6.5. 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. Tabela 6.8 resume

os valores encontrados por média ponderada ao valor da área de cada polígono, para a rugosidade cinemática.

Tabela 6.8 – Valores definidos para a rugosidade cinemática média para cada plano das sub-bacias da Ribeira de Valadares.

Sub-bacia	Divisão	Rugosidade média (<i>N</i>)
1	1N	0,1174
	1S	0,2418
2	2N	0,1550
	2S	0,1017
3	3N	0,0981
	3S	0,2285
4	4N	0,1932
	4S	0,2141
5	5N	0,1596
	5S	0,1814

A parametrização da componente do escoamento em canal pelo modelo da onda cinemática reporta para as Equações (4.26) e (4.27). O sistema de canais, 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 3 e 5), e leito regularizado em betão e forma rectangular nas secções terminais das sub-bacias número 1, 2 e 4. 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 3, 4 e 5, 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 6.9 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 1 e 3, 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, pesar 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 2, 4 e 5, 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.

Tabela 6.9 – Valores dos parâmetros integrantes do modelo da onda cinemática, na sua formulação para escoamento em canal, para a bacia de Valadares.

Sub-bacia	Comp. segmento (m)	Declive médio (m/m)	Largura média do canal (m)	Rugosidade de Manning (n)	Forma da secção
1	4867,82	0,0090	4,5	0,030	rectangular
2	53,48	0,0009	2	0,013	rectangular
3	451,38	0,0126	3,5	0,030	rectangular
4	2500,73	0,0098	3,5	0,013	rectangular
5	1514,64	0,0184	2	0,013	rectangular

O restante processo para o desenvolvimento do modelo de escoamento de base foi elaborado de acordo com Melo e Silva, 2008.

6.6.3.1.2 Modelo de Perdas de Precipitação

De acordo 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 6.10 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 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 (4.14).

Tabela 6.10 – Valores da média do número de escoamento (CN) para cada um dos planos das subunidades hidrológicas, para a situação AMC III.

Sub-bacia	Divisão	CN (AMC III)
1	1N	91
	1S	83
2	2N	89
	2S	94
3	3N	93
	3S	85
4	4N	85
	4S	86
5	5N	91
	5S	89

6.6.3.1.3 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 4.4.3, segundo o modelo da recessão exponencial, pela Equação (4.1).

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

$$Q(t) = Q_0 \cdot k_{HEC}^t \quad \text{Equação (6.2)}$$

em que Q_0 tem significado idêntico ao da equação (4.1), expresso $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$, $Q(t)$, o valor, em m^3/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 (6.2), 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.

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 l/s para a área da bacia de Valadares. A Figura 6.18 representa a carta digital (*raster*) da produtividade dos aquíferos em Portugal continental sobreposta pelo polígono da bacia da Ribeira de Valadares.

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.

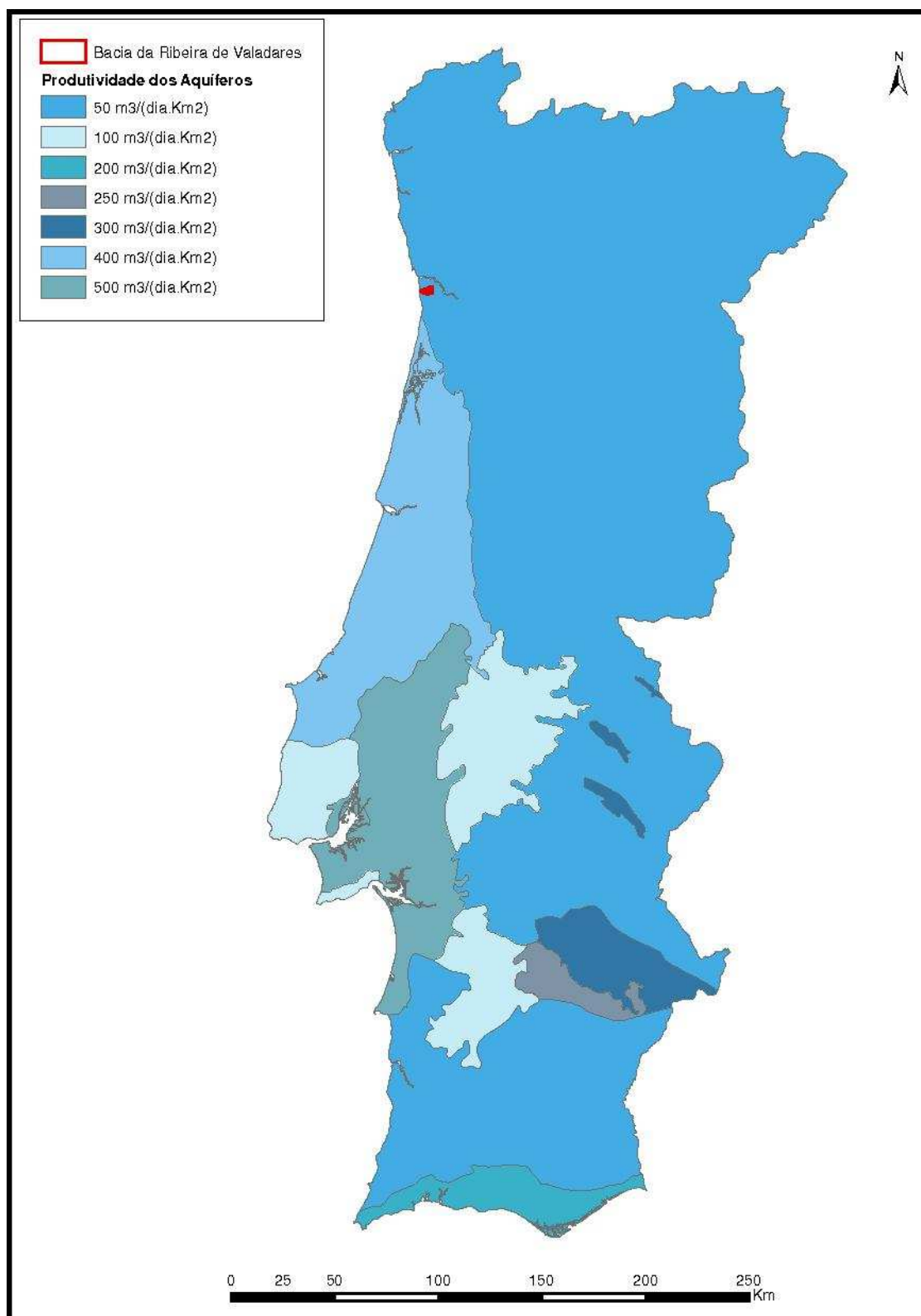


Figura 6.18 – Carta digital da produtividade dos aquíferos em Portugal continental sobreposto pelo polígono da bacia da Ribeira de Valadares (fonte: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente).

6.6.3.1.4 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 transladados 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 6.19, proveniente do *software* HEC-HMS, representa-se a situação definida.

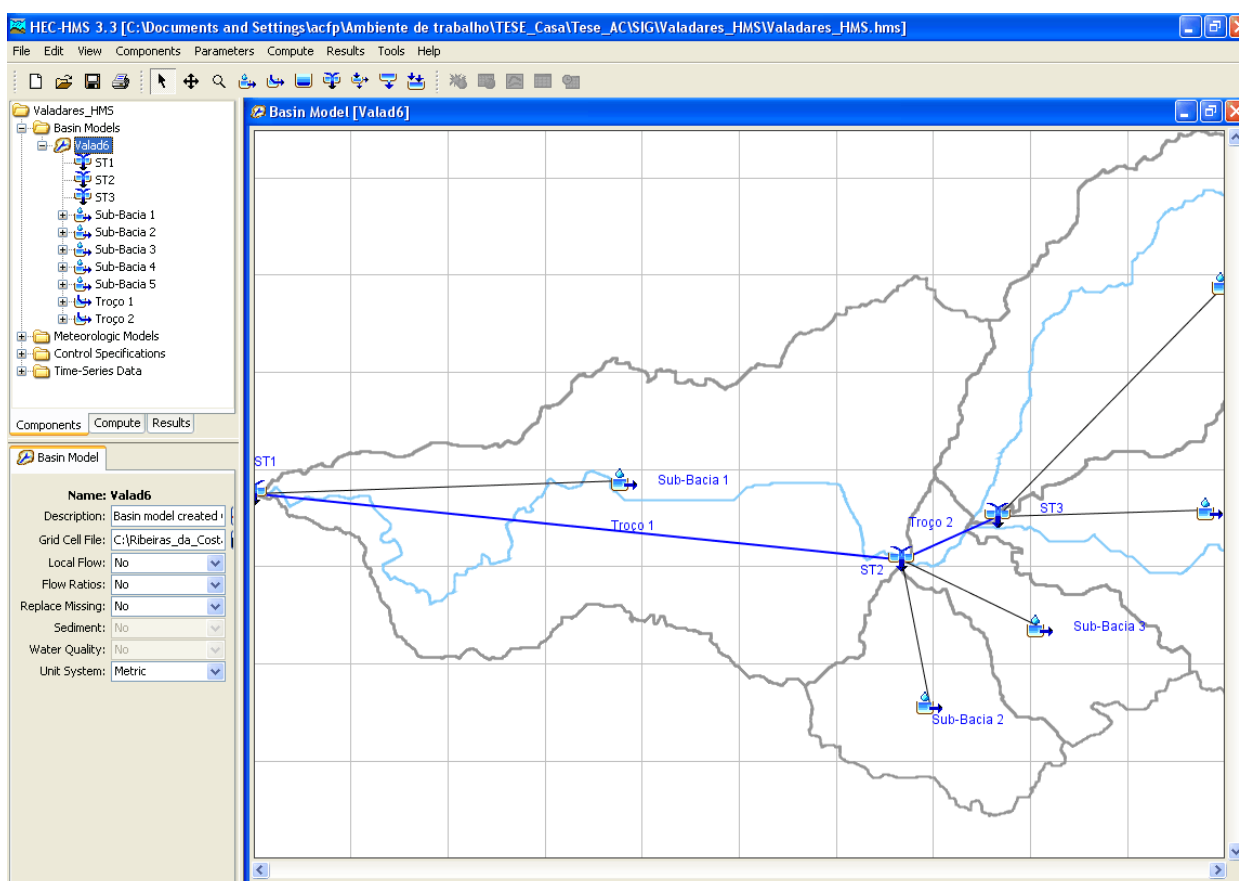


Figura 6.19 – Representação no programa HEC-HMS da estrutura hidrológica da bacia da Ribeira de Valadares.

De acordo com Radwan e Berlamont, 2000, a escolha de um modelo de translação adequado depende de diversos factores como:

- configuração da rede de drenagem;
- regime do escoamento (crítico, supercrítico ou subcrítico);
- declive e geometria dos canais;
- existência, ou não, de zonas de armazenamento;
- 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 (com a excepção do canal correspondente à sub-bacia 2, que apresenta um declive inferior). Assim, optou-se pelo modelo da onda cinemática, cuja parametrização foi efectuada de acordo com os valores constantes da Tabela 6.9.

6.6.3.2 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 (4.15).

O comprimento do curso de água principal foi determinado como o somatório dos valores de comprimento dos segmentos das sub-bacias constantes da Tabela 6.9. O valor do número de escoamento médio para a totalidade da bacia de Valadares é a média dos valores de CN (AMCIII) apresentados na Tabela 6.10. O declive médio da bacia da Ribeira de Valadares foi determinado recorrendo à carta de declives apresentada na Figura 6.12 onde, através de SIG, permitiu a obtenção do valor médio directa do valor pretendido. Foi também possível determinar o tempo de concentração da bacia de Valadares de acordo com os valores mencionados anteriormente. O cálculo de todos estes parâmetros foi realizado para a situação de antecedente de humidade elevada (AMC III) já que esta é, como referido anteriormente, a situação espectável na ocorrência de um evento de precipitação extrema (Tabela 6.11).

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 2,6 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 (4.6).

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 6.12.

Tabela 6.11 – Valores médios do número de escoamento, comprimento da linha de água principal, declive da totalidade da bacia da Ribeira de Valadares, e tempo de concentração para AMC III.

<i>Comprimento do curso de água principal (m)</i>	<i>Número de escoamento médio (AMC III)</i>	<i>Declive médio da bacia de Valadares (%)</i>	<i>T_c (h)</i>
9388	88	13	2,6

Tabela 6.12 – Curva IDF: Porto (Serra do Pilar) (fonte: SNIRH).

<i>Curva IDF: Porto (Serra do Pilar)</i>	
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 6.20). Desta operação resultou um valor médio de precipitação diária máxima anual para a bacia de Valadares de 114,40 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.

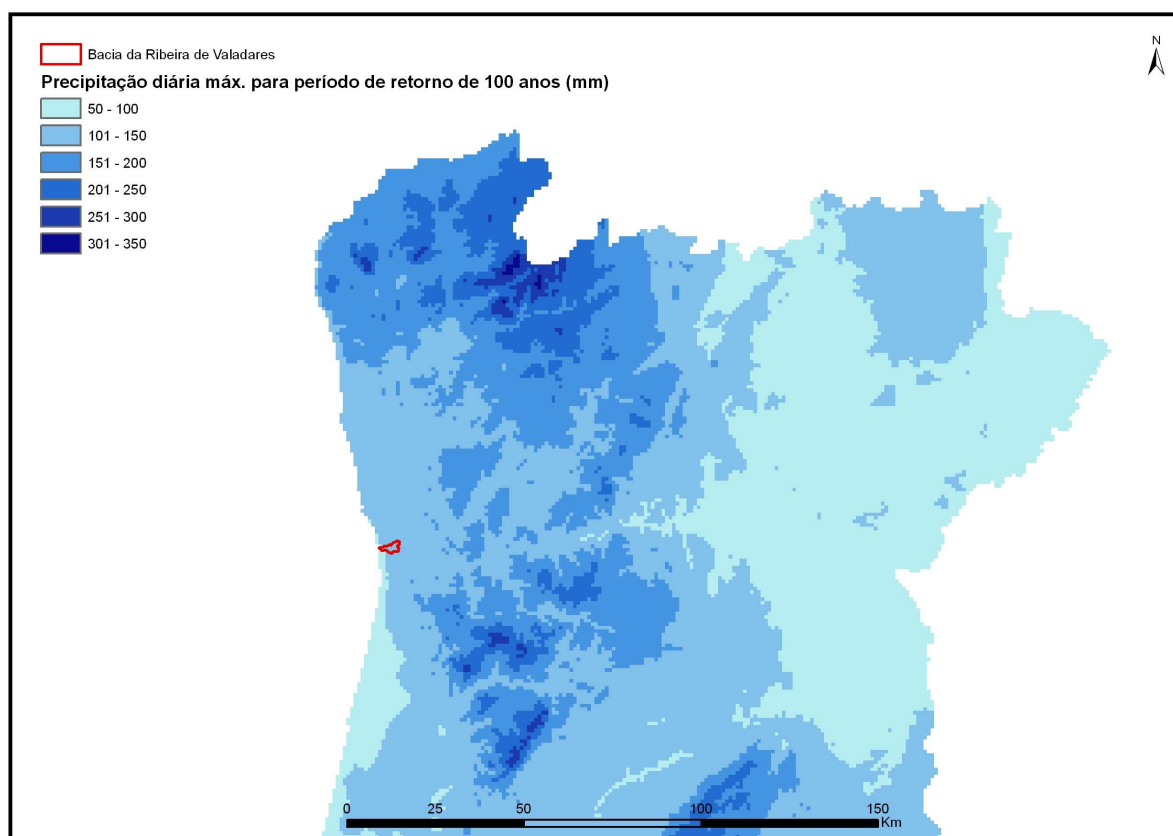


Figura 6.20 – Representação da distribuição espacial da precipitação diária máxima anual para Portugal Continental (fonte: SNIRH).

Substituindo na Equação (4.6) os valores 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_r} , encontrou-se o valor de 45,21 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%.

Para a construção do hietograma de projecto, foi utilizada a técnica dos blocos alternados, para tal procedeu-se à discretização temporal do evento de precipitação em três blocos, de igual duração e intensidade variável, perfazendo a soma do valor de precipitação crítica encontrado (45,21 mm).

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 (2,6 h) em três fracções equivalentes, foi possível determinar a duração de cada um dos blocos, 0,88 h, aproximadamente. Recorrendo à curva IDF apresentada na Tabela 6.12 e, uma vez mais, à Equação (4.6), seguiu-se um procedimento idêntico ao utilizado na determinação de P_{t_r} , sendo assim possível determinar a precipitação acumulada para os instantes relativos à duração de cada um dos blocos, respectivamente $P_{0,88}$, $P_{1,75}$ e $P_{2,63}$. Os valores obtidos constam da Tabela 6.13, encontrando-se assinalados a azul os referidos instantes.

Na Tabela 6.14 apresenta-se a distribuição obtida para os instantes de cálculo anteriormente referidos, e na Figura 6.21 a representação gráfica dessa distribuição.

Para a elaboração do hietograma de projecto para um período de 100 anos para a bacia de Valadares, através dos blocos alternados, a precipitação foi distribuída da seguinte forma:

- Bloco à esquerda, 2º maior valor de ΔP_t , com 9,63 mm;
- Bloco ao centro, maior valor de ΔP_t , com 28,50 mm;
- Bloco à direita, menor valor de ΔP_t , com 7,08 mm.

Tabela 6.13 – 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.

$t \text{ (h)}$	$\frac{a \cdot (60 \cdot t)^b \cdot t}{a \cdot (60 \cdot 24)^b \cdot 24}$	$P_{24(\text{Valadares})} \cdot \frac{a \cdot (60 \cdot t)^b \cdot t}{a \cdot (60 \cdot 24)^b \cdot 24} \text{ (mm)}$
0,08	0,09	10,6
0,17	0,12	14,2
0,25	0,15	16,8
0,33	0,17	19,0
0,42	0,18	20,8
0,50	0,20	22,5
0,88	0,25	28,5
1,00	0,26	30,1
1,75	0,33	38,1
2,00	0,35	40,3
2,63	0,40	45,2
3,00	0,42	47,8
4,00	0,47	53,9
5,00	0,52	59,2
6,00	0,56	63,9
12,00	0,75	85,5
24,00	1,00	114,4

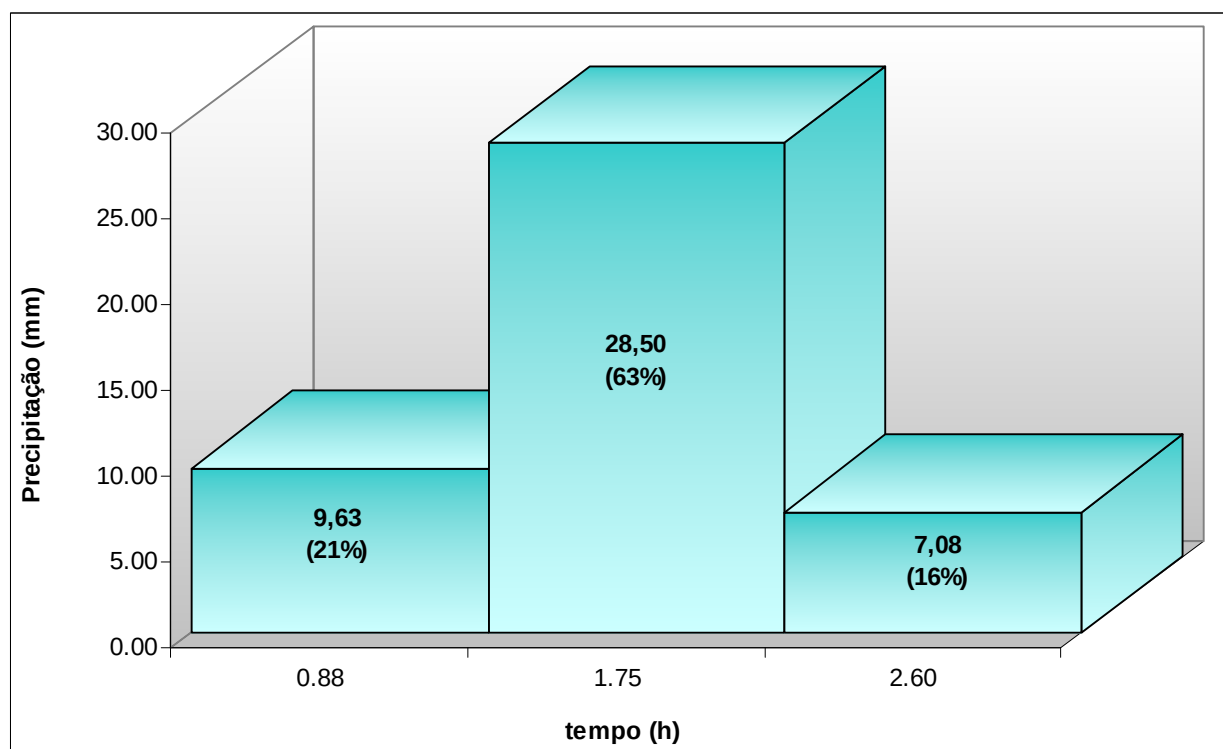


Figura 6.21 – Hietograma de projecto para a bacia de Valadares, para um período de retorno de 100 anos, considerando três blocos alternados.

Tabela 6.14 – Processo de cálculo do método dos blocos alternados. Resultado da diferença entre os valores determinados para os instantes assinalados na Tabela 6.13, sua fracção percentual, e respectivo procedimento para disposição alternada.

$t \text{ (h)}$	$P_t \text{ (mm)}$	$\Delta P_t \text{ (mm)}$	Fracção de $\Delta P / \sum P_t \text{ (%)}$
0,88	28,50	28,50	63
1,75	38,13	9,63	21
2,63	45,21	7,08	16

6.6.3.3 Especificações de Controlo

A última componente a ser estabelecida no *software* HEC-HMS permite determinar e caracterizar o intervalo temporal no qual decorre a simulação a desenvolver. Assim, nas especificações de controlo foi considerado o seguinte:

- O intervalo de tempo foi de seis horas, já que, após esse intervalo o escoamento estabilizou;
- O passo de cálculo de cinco minutos, admitindo-se como sendo suficientemente reduzido para não comprometer a sensibilidade do solucionamento da simulação.

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.

6.6.4 Calibração

Alguns dos parâmetros que constituem o modelo hidrológico não têm um verdadeiro significado físico, como tal não é possível atribuir-lhes um valor rigoroso. Devido a esta condicionante, é necessário efectuar um ajuste desses 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 durante um evento de precipitação. O processo de calibração foi desenvolvido por Melo e Silva, 2008.

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 (Melo e Silva, 2008).

O conjunto de parâmetros que se consideraram passíveis de calibração, mediante a sua natureza empírica, foram:

- A rugosidade dos planos do modelo da onda cinemática;
- A rugosidade dos canais de algumas subunidades 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.

Tendo em conta os valores relativos à calibração apresentados por Melo e Silva, 2008, foram efectuados pequenos ajustes aos parâmetros mencionados. Os resultados apresentados reflectem essa calibração.

6.6.5 Resultados

Neste subcapítulo são apresentados os resultados do modelo hidrológico desenvolvido, sob a forma de um hidrograma para um período de retorno de 100 anos. Assim, para uma melhor interpretação dos resultados, na Figura 6.22 estão representadas as secções terminais utilizadas neste trabalho.

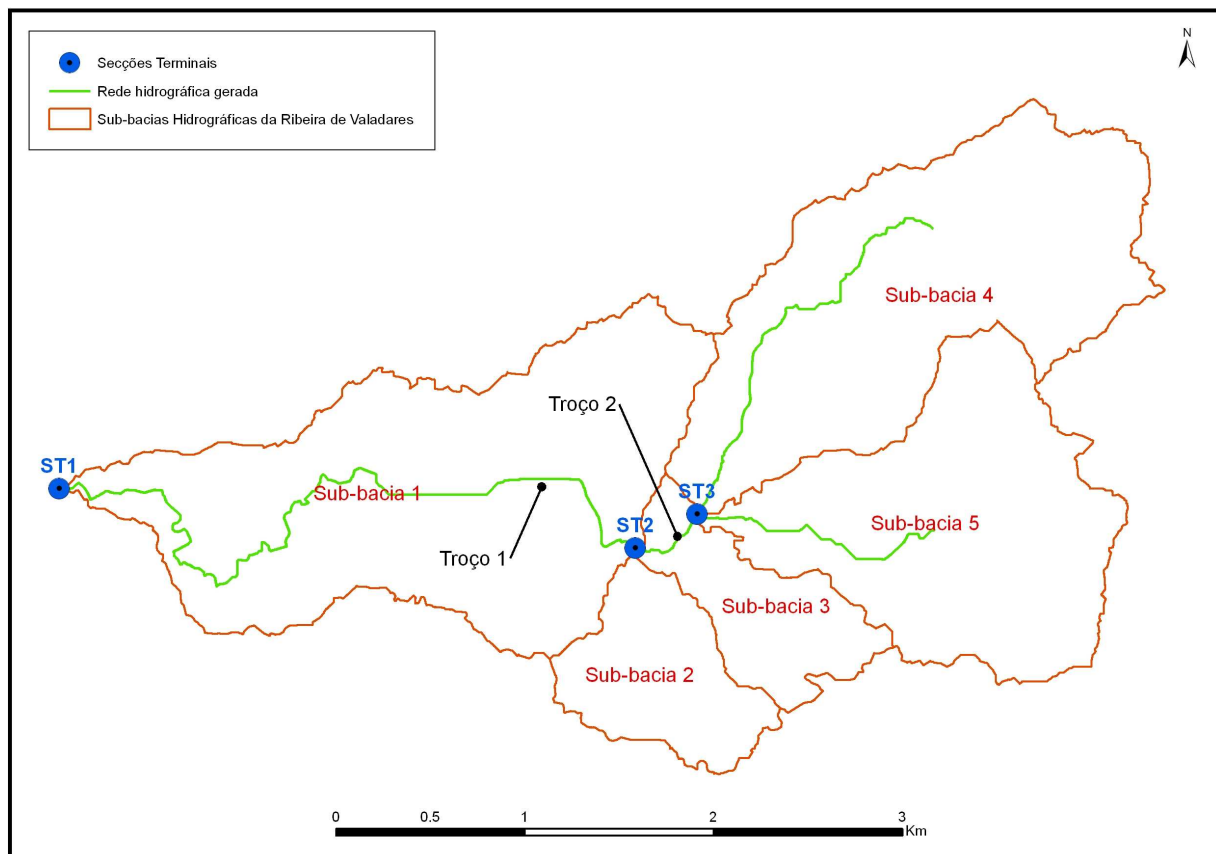


Figura 6.22 – Esquematização da localização das secções terminais (ST), correspondentes aos hidrogramas.

Na Figura 6.23 apresenta-se o conjunto de hidrogramas de cheia resultante da simulação efectuada no *software* HEC-HMS para as secções terminais referidas, e na Tabela 6.15 encontram-se os valores de escoamento máximos registados.

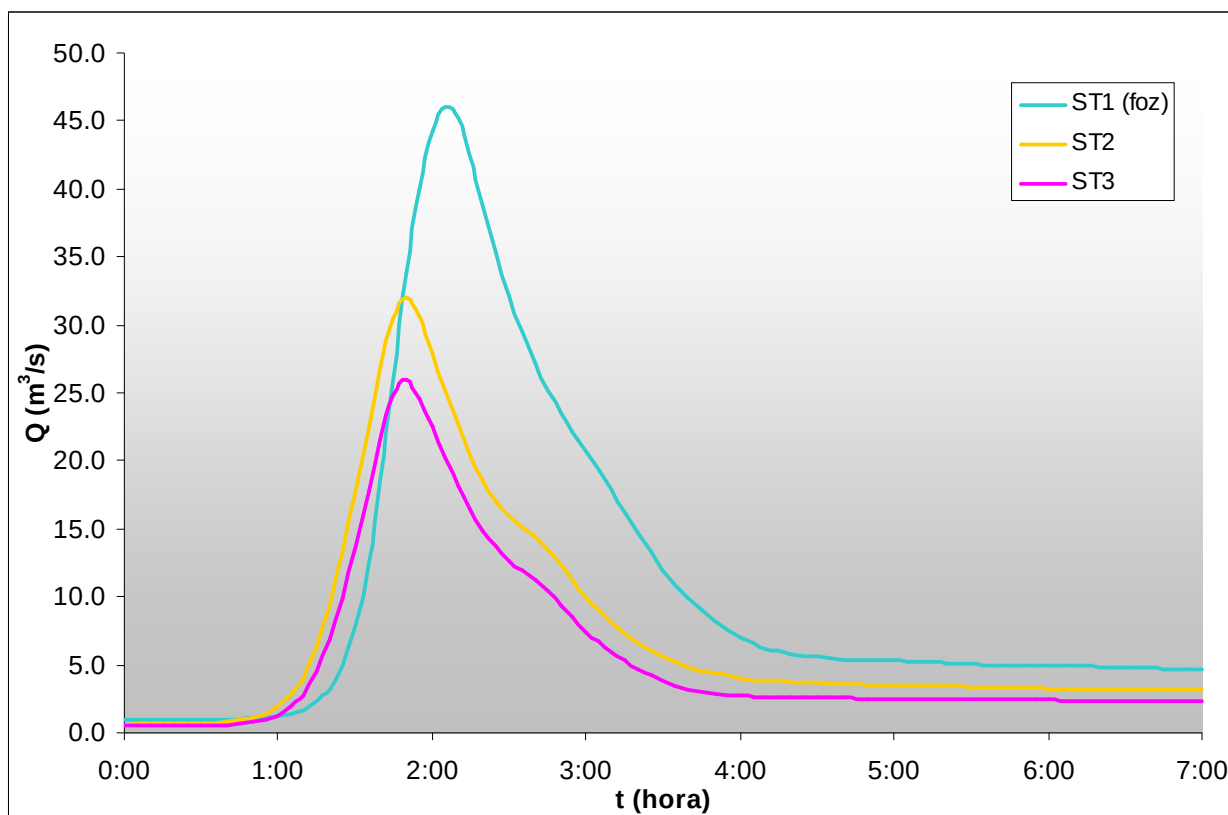


Figura 6.23 – Hidrogramas de cheia resultantes da simulação efectuada para cada secção terminal.

As séries temporais de escoamento gerado pelo *software* HEC-HMS para as diferentes junções e foz da bacia de Valadares são apresentadas no Anexo D.

Tabela 6.15 – Valores máximos de escoamento para cada secção terminal, e tempo que demora a atingir esse pico.

<i>Secção Terminal</i>	<i>Tempo (h)</i>	<i>Q (m³/s)</i>
ST1 (foz)	02:05	46,0
ST2	01:50	32,0
ST3	01:50	25,9

CAPÍTULO 7

APLICAÇÃO AO ESTUDO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DA RIBEIRA DE VALADARES
PARA O CENÁRIO DE 1964

7.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo pretende-se simular o regime hidrológico no ano de 1964. Para tal, será criado um cenário baseado em fotografias aéreas dessa data e, consequentemente, numa carta de ocupação de solo gerada propositadamente para estas condições.

Devido à insuficiência de dados relativos à topografia, e caracterização da rede hidrográfica da bacia da Ribeira de Valadares em 1964, serão considerados os dados actuais. Assim, os dados referidos no capítulo 6 relativamente à localização, geologia, tipo hidrológico de solos, clima, e caracterização fisiográfica servirão como base para a modelação do regime hidrológico neste capítulo.

As variáveis introduzidas estão relacionadas com a ocupação do solo e coberto vegetal. Para que fosse possível gerar uma carta de ocupação de solo relativa a 1964, foi feita a georreferenciação das fotografias aéreas e identificação do tipo de solo através da sua visualização. Procedeu-se à “re-parametrização” do modelo hidrológico para a situação referida, de forma a obter os hidrogramas para um período de retorno de 100 anos.

No presente capítulo é feita a caracterização relativa à ocupação de solo da bacia da Ribeira de Valadares em 1964, apresentam-se os resultados da simulação efectuada para o cenário referido, e é feita a comparação com o cenário actual. Apenas serão mencionados os subcapítulos onde se verificaram alterações resultantes da diferente carta de ocupação de solo, os restantes dados são os mesmos do capítulo anterior.

7.2 SOFTWARES UTILIZADOS

Para este exercício, foram utilizados seguintes *softwares*:

- ArcInfo 9.1, com as extensões *3D Analyst* e *Georeferencing*;
- ArcView 3.2
- HEC-HMS.

A descrição destes softwares encontra-se no subcapítulo 6.2. Neste capítulo foi ainda utilizada uma outra extensão do ArcInfo 9.1, o *Georeferencing*, que permitiu a georreferenciação das fotografias aéreas datadas de 1964.

7.3 GEORREFERENCIAÇÃO DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS DE 1964

Para fazer a caracterização da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares no ano de 1964, foi necessário recolher as fotografias aéreas da época. Essas fotografias foram adquiridas ao Instituto Geográfico do Exército (IGeoE) sem qualquer ficheiro que permitisse efectuar a sua georreferenciação.

No processo de georreferenciação é necessário ter uma *layer* de base onde possam ser marcados pontos para que seja feita a sua correspondência na imagem que se quer georreferenciar. A *layer* de base utilizada foi a planimetria actual da área envolvente da bacia de Valadares à escala 1:2 000 cedida pela empresa Gaiurb.

Foram seguidas as seguintes etapas:

- Análise das imagens adquiridas ao IGeoE, comparando-as com os ortofotomapas actuais, de forma a seleccionar as fotografias aéreas contidas na área bacia em estudo;
- Identificação de “pontos de controlo” nas fotografias aéreas que possam ser facilmente identificados na planimetria actual;
- Ajuste dos “pontos de controlo” mencionados anteriormente com planimetria actual e efectuar a sua correspondência através da extensão *georeferencing*;
- Transformação da imagem (fotografias aéreas) através de uma das transformações disponíveis de forma a obter o menor erro possível;
- Rectificação da imagem, obtendo o ficheiro final da fotografia aérea devidamente georreferenciada e com a escala adequada.

Após este processo foi possível obter a imagem das fotografias aéreas de 1964 na área da bacia da Ribeira de Valadares (Figura 7.1).



Figura 7.1 – Imagem aérea da bacia de Valadares, para o ano de 1964.

7.4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é comum ao capítulo anterior, como tal, foram consideradas as mesmas características relativas aos seguintes itens:

- Localização;
- Geologia;
- Tipo hidrológico de solos;
- Clima.

As variáveis introduzidas dizem respeito aos parâmetros relativos à ocupação do solo e coberto vegetal.

7.4.1 Ocupação do Solo e Coberto Vegetal

De acordo com a imagem obtida através das fotografias aéreas de 1964, foi construído um cartograma representativo da ocupação de solo na bacia de Valadares (Figura 7.2). Esse cartograma foi construído recorrendo aos SIG para visualizar os diferentes tipos de solos que são evidentes na imagem relativa a 1964, e para criar diferentes polígonos de acordo com os limites das diferentes manchas identificadas, identificando-os.

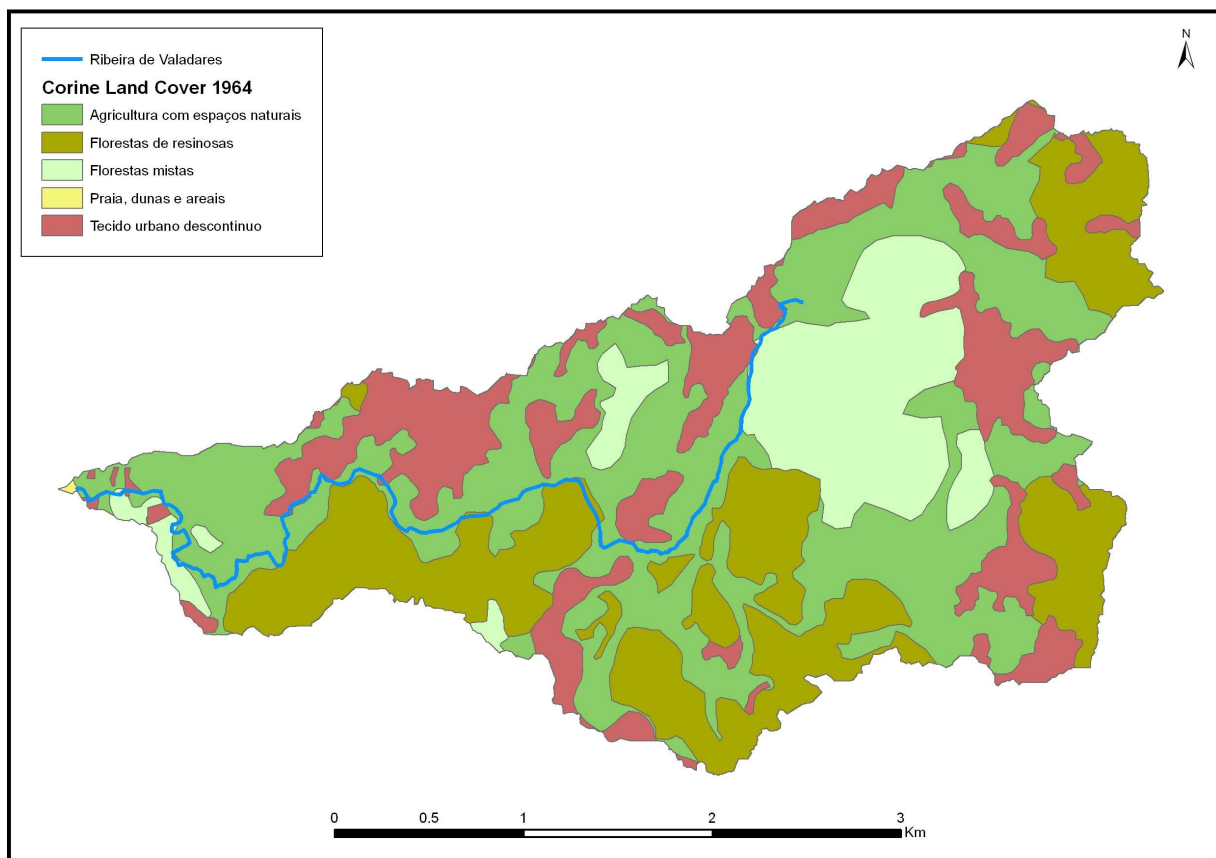


Figura 7.2 - Cartograma representativo da ocupação do solo da bacia de Valadares, para o ano de 1964.

As fotografias aéreas de 1964 não apresentavam uma resolução excelente, como tal apenas foi possível identificar cinco tipos de ocupação de solo. Não obstante, considera-se esta caracterização suficiente para construir o cenário ilustrativo dessa época.

Tabela 7.1 - 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, para o ano de 1964.

Ocupação do solo	Área (Km ²)	Fracção da área total (%)
Agricultura com espaços naturais	3,88	39,1
Florestas de resinosas	2,66	26,8
Florestas mistas	1,50	15,1
Praias, dunas e areais	0,01	0,1
Tecido urbano descontínuo	1,87	18,9
Total	9,92	100,0

Por análise espacial do cartograma representado na Figura 7.2 resulta a Tabela 7.1, 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 o principal revestimento vegetal da bacia é constituído pela agricultura com espaços naturais (39,1%) e as florestas de resinosas (26,8%). A fracção dedicada à malha urbana é relativamente pequena representando menos de 20% da área da bacia.

Do ponto de vista hidrológico os valores expressos têm bastante significado. Apenas 20% da área da bacia se encontra edificada, conduzindo este valor a baixas áreas de impermeabilização. Como tal, espera-se uma diminuição dos valores de escoamento relativamente ao cenário actual. Na Tabela 7.2, com o objectivo de permitir a comparação dos valores, encontram-se as fracções de cada um dos tipos de ocupação de solo para o cenário actual e para 1964.

Tabela 7.2 - Valores das fracções percentuais das áreas de cada uma das classes de ocupação do solo compreendidas na bacia de Valadares para o cenário actual e para o cenário de 1964.

Ocupação do solo	Fracção da área total (%)	
	Cenário actual	Cenário de 1964
Áreas de extracção mineira	2,7	-
Agricultura com espaços naturais	2,5	39,1
Culturas anuais de sequeiro	31,4	-
Florestas de resinosas	7,0	26,1
Florestas mistas	12,4	15,1
Indústria, comércio e equipamentos gerais	5,2	-
Praias, dunas e areais	0,1	0,1
Tecido urbano contínuo	0,9	-
Tecido urbano descontínuo	37,7	18,9
Total	100,0	100,0

7.5 CARACTERIZAÇÃO DOS RESTANTES PARÂMETROS

Relativamente ao modelo de escoamento directo, os valores encontrados por média ponderada ao valor da área de cada polígono para a rugosidade, estão resumidos na Tabela 7.3

Tabela 7.3 – Valores definidos para a rugosidade cinemática média para cada plano das sub-bacias da Ribeira de Valadares, para o ano de 1964.

Sub-bacia	Divisão	Rugosidade média (<i>M</i>)
1	1N	0,1529
	1S	0,3097
2	2N	0,2375
	2S	0,2654
3	3N	0,1323
	3S	0,2911
4	4N	0,2039
	4S	0,3307
5	5N	0,2626
	5S	0,2367

Estão representados na Tabela 7.4 os valores médios para cada plano das sub-bacias hidrográficas da Ribeira de Valadares que foram utilizados para o modelo de perdas de precipitação.

Tabela 7.4 – Valores da média do número de escoamento (CN) para cada um dos planos das subunidades hidrológicas, para a situação AMC III, para o ano de 1964.

Sub-bacia	Divisão	CN (AMC III)
1	1N	87
	1S	77
2	2N	80
	2S	80
3	3N	89
	3S	77
4	4N	84
	4S	80
5	5N	82
	5S	82

Para a construção do modelo de precipitação, os valores do comprimento do curso de água principal e o declive médio da bacia são iguais aos da situação actual. No entanto, o número de escoamento médio e o tempo de concentração diferem, já que estão relacionados com o tipo de ocupação do solo (Tabela 7.5).

Tabela 7.5 – Valores médios do número de escoamento, comprimento da linha de água principal, declive da totalidade da bacia da Ribeira de Valadares, e tempo de concentração para AMC III para o ano de 1964.

<i>Comprimento do curso de água principal (m)</i>	<i>Número de escoamento médio (AMC III)</i>	<i>Declive médio da bacia de Valadares (%)</i>	<i>Tc (h)</i>
9388	80	13	3,0

Consequentemente, na utilização da técnica dos blocos alternados, dividindo o tempo de precipitação crítica obtido anteriormente (3 h) em três fracções equivalentes, foi possível determinar a duração de cada um dos blocos, 1 h, aproximadamente.

Recorrendo à curva IDF apresentada na Tabela 6.12 (capítulo 6) e, uma vez mais, à Equação (4.6), seguiu-se um procedimento idêntico ao utilizado na determinação de P_{t_r} , sendo assim possível determinar a precipitação acumulada para os instantes relativos à duração de cada um dos blocos, respectivamente $P_{1,01}$, $P_{2,01}$ e $P_{3,02}$. Os valores obtidos constam da Tabela 7.6, encontrando-se assinalados a azul os referidos instantes.

Tabela 7.6 – 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 (ano de 1964).

<i>t (h)</i>	$\frac{a \cdot (60 \cdot t)^b \cdot t}{a \cdot (60 \cdot 24)^b \cdot 24}$	$P_{24(\text{Valadares})} \cdot \frac{a \cdot (60 \cdot t)^b \cdot t}{a \cdot (60 \cdot 24)^b \cdot 24}$ (mm)
0,08	0,09	10,6
0,17	0,12	14,2
0,25	0,15	16,8
0,33	0,17	19,0
0,42	0,18	20,8
0,50	0,20	22,5
1,00	0,26	30,1
1,01	0,26	30,2
2,00	0,35	40,3
2,01	0,35	40,4
3,00	0,42	47,8
3,02	0,42	47,9
4,00	0,47	53,9
5,00	0,52	59,2
6,00	0,56	63,9
12,00	0,75	85,5
24,00	1,00	114,4

Na Tabela 7.7 apresenta-se a distribuição obtida para os instantes de cálculo anteriormente referidos, e na Figura 7.3 a representação gráfica dessa distribuição.

Tabela 7.7 – Processo de cálculo do método dos blocos alternados. Resultado da diferença entre os valores determinados para os instantes assinalados na Tabela 7.6, sua fracção percentual, e respectivo procedimento para disposição alternada, para o ano de 1964.

$t \text{ (h)}$	$P_t \text{ (mm)}$	$\Delta P_t \text{ (mm)}$	Fracção de $\Delta P / \sum P_t \text{ (%)}$
1,00	30,19	30,19	63
2,01	40,40	10,20	21
3,02	47,90	7,50	16

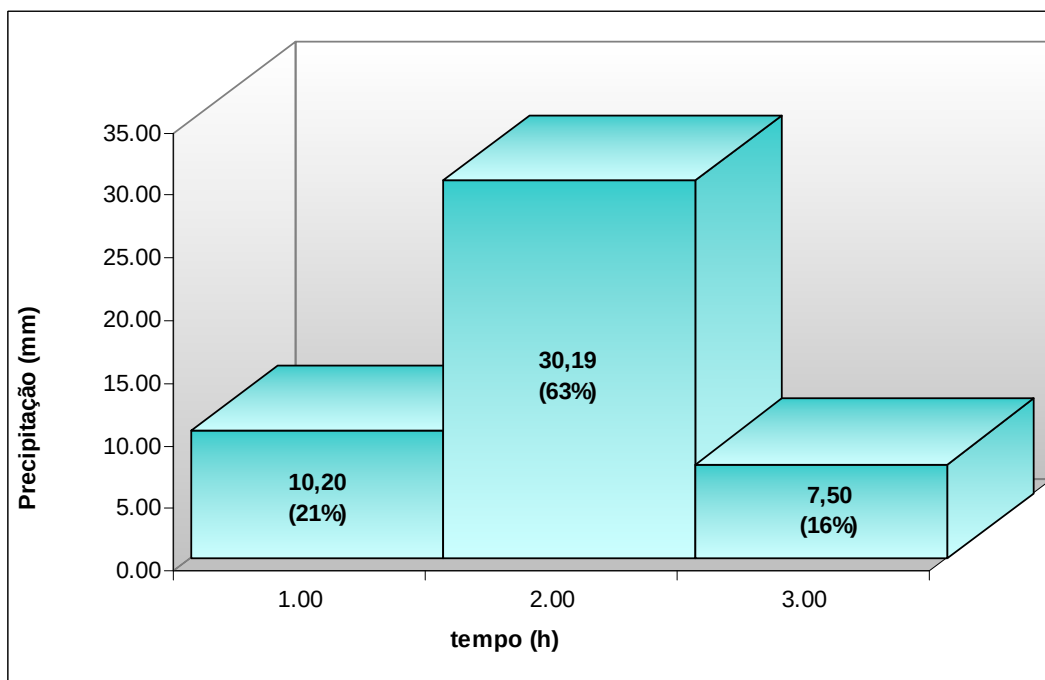


Figura 7.3 – Hietograma de projecto para a bacia de Valadares, para um período de retorno de 100 anos, considerando três blocos alternados, para o ano de 1964.

Para a elaboração do hietograma de projecto para um período de 100 anos para a bacia de Valadares, através dos blocos alternados, a precipitação foi distribuída da seguinte forma:

- Bloco à esquerda, 2º maior valor de ΔP_t , com 10,20 mm;
- Bloco ao centro, maior valor de ΔP_t , com 30,19 mm;
- Bloco à direita, menor valor de ΔP_t , com 7,50 mm.

7.6 RESULTADOS

Neste subcapítulo são apresentados os resultados do modelo hidrológico desenvolvido para o cenário de 1964, sob a forma de um hidrograma para um período de retorno de 100 anos.

Na Figura 7.4 apresenta-se o conjunto de hidrogramas de cheia resultante da simulação efectuada no *software* HEC-HMS para as secções terminais referidas, e na Tabela 7.8 encontram-se os valores de escoamento máximos registados.

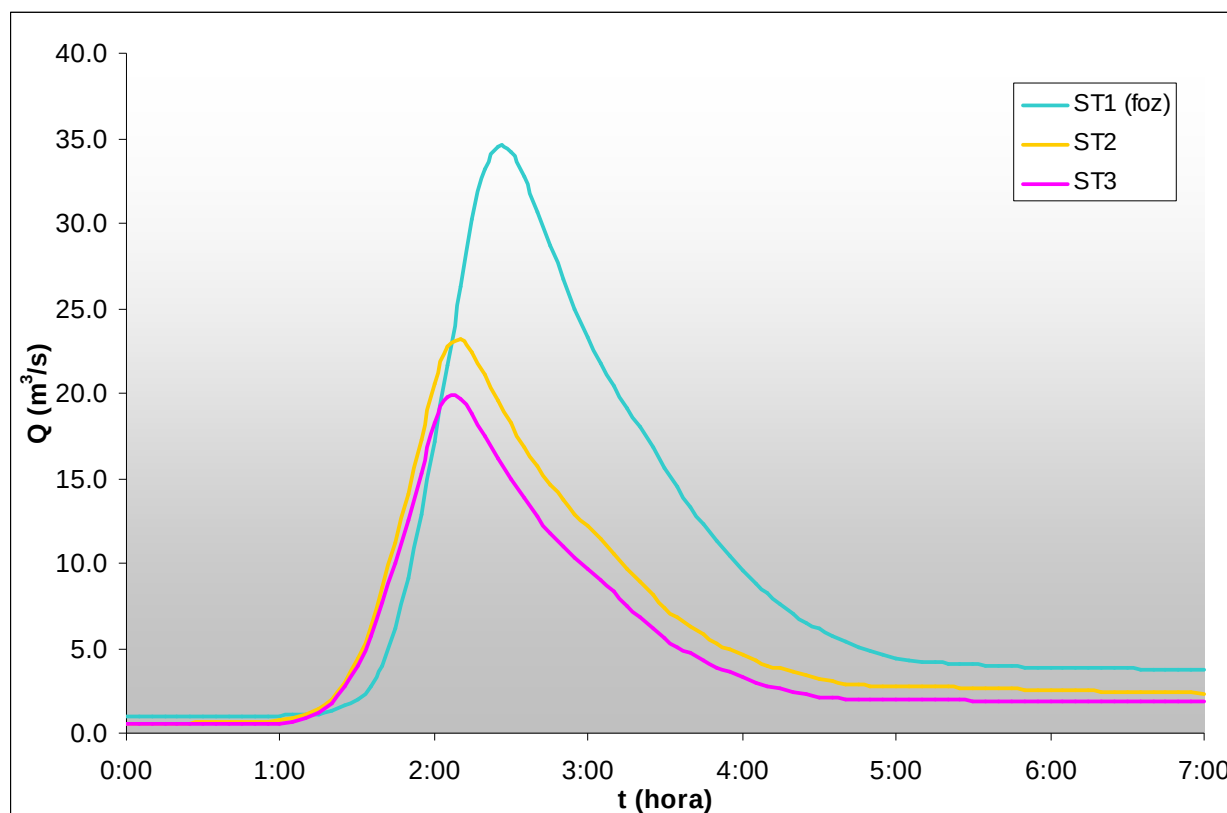


Figura 7.4 – Hidrogramas de cheia resultantes da simulação efectuada para cada secção terminal, para o ano de 1964.

As séries temporais de escoamento gerado pelo *software* HEC-HMS para as diferentes junções e foz da bacia de Valadares, para o cenário de 1964, são apresentadas no Anexo E.

Tabela 7.8 – Valores máximos de escoamento para cada secção terminal, e tempo que demora a atingir esse pico, para o ano de 1964.

Secção Terminal	Tempo (h)	Q (m³/s)
ST1 (foz)	02:25	34,5
ST2	02:10	23,2
ST3	02:05	19,8

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O objectivo deste trabalho foi a exploração das potencialidades da modelação hidrológica integrada em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a nível da previsão de eventuais efeitos na alteração do regime hidrológico decorrentes da crescente urbanização e consequente artificialização dos solos verificadas, principalmente, em grandes centros urbanos. Para atingir este objectivo foram processadas fotografias aéreas de 1964 da área da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, de forma a permitir a caracterização das componentes dessa bacia e a aquisição de dados para parametrização do modelo hidrológico, tornando-o assim, capaz de simular o cenário existente na época em causa. Para tal, foram utilizados os programas ArcView (com a extensão HEC-GeoHMS), ArcGis (com as extensões Georeferencing e 3D Analyst), e o *software* de modelação hidrológica HEC-HMS.

Os procedimentos adoptados foram condicionados pelas limitações inerentes ao facto de esta bacia não se encontrar monitorizada, nem existir uma caracterização cartográfica e fisiográfica relativa ao ano de 1964. Como tal, a abordagem destas questões procurou ser de natureza conceptual, tentando minimizar ao máximo as lacunas detectadas, e procurando que a parametrização fosse possível por via de informação digital georreferenciada adequada e disponível.

Após a análise do trabalho realizado, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- O programa ArcGis, através da sua extensão 3D Analyst, permitiu gerar um Modelo Digital do Terreno (MDT) a partir da cartografia existente complementada com os levantamentos topográficos efectuados. Este modelo apresenta uma boa representatividade do terreno, tornando-se uma plataforma sólida no decorrer do estudo;
- Comparando a rede hidrográfica gerada através da extensão Hec-GeoHMS com a informação fornecida pela Empresa Municipal Gaiurb, pode-se concluir que este software proporciona uma simulação bastante fiável da realidade. As bases de dados criadas desta forma e posteriormente migradas para o software de modelação hidrológica HMS, permitiram preencher todos os valores de parâmetros relacionados com a caracterização geométrica da bacia hidrográfica de uma forma coerente;
- A georreferenciação das fotografias aéreas de 1964 foi um processo bastante moroso dada a dificuldade em encontrar “pontos de controlo” para efectuar a devida correspondência, já que em 45 anos as alterações a nível do uso de solo foram muito acentuadas. Não obstante, através de uma análise exaustiva de todos os pormenores mais relevantes, e identificando pontos que são fossem susceptíveis de sofrer qualquer alteração, foi possível obter uma imagem única da área da bacia, devidamente georreferenciada que permitiu servir como plataforma na modelação subsequente para essa época;

- O processo de identificação do tipo do uso de solo através das imagens de 1964, e apesar da dificuldade em identificar algumas parcelas do terreno, permitiu construir uma carta de uso de solos com boa representatividade;
- Os valores máximos de escoamento simulados para o ano de 1964, para um período de retorno de 100 anos, representam cerca de 75% dos escoamentos simulados para a bacia actual, esta diferença denota claramente o aumento registado a nível do processo de urbanização registado ao longo das últimas décadas. Como tal, esta pode ser considerada uma ferramenta de previsão;
- Juntamente com a análise hidráulica que possibilite o cálculo de áreas inundáveis e de risco de ocorrência de cheias, este modelo permite a previsão de situações futuras que contemplem infra-estruturas que possam vir a ser implementadas e alterações no tipo de uso de solo. Esta capacidade torna possível a implementação de medidas mitigadoras de uma forma atempada. Esta torna-se uma ferramenta essencial do ponto de vista do planeamento e gestão de bacias hidrográficas.

Como resultado do trabalho desenvolvido apresentam-se alguns desenvolvimentos futuros:

- A implementação de um sistema de monitorização de caudais das ribeiras e precipitação respectiva bacia hidrográfica, permitiria a realização a caracterização do escoamento de uma forma mais concreta, assim como a sua calibração, proporcionando dados mais coerentes;
- Dispondo de fotografias aéreas datadas de anos intermédios, ou seja, de cinco em cinco anos, por exemplo, seria possível efectuar a sua georreferenciação para construir a respectiva carta de uso do solo, e fazer a modelação hidrológica da linha de água em questão. Desta forma, poder-se-ia tentar obter uma correlação entre o grau de urbanização da bacia hidrográfica e os escoamentos gerados;
- Numa época em que a gestão da água e a sustentabilidade das zonas costeiras merecem cada vez maior atenção, a Ecohidrologia emergiu como uma área temática de grande importância a nível mundial. Tendo em conta a interacção da ecologia com a hidrologia, a metodologia desenvolvida neste trabalho apresenta um grande potencial em determinar a influência do tipo de coberto vegetal das bacias com o regime hidrológico das linhas de água. Assim, esta é uma ferramenta de extrema utilidade no domínio deste “novo ramo da ciência”.

CAPÍTULO 9

BIBLIOGRAFIA

Aranoff, S., 1989. *Geographic information systems: a management perspective*. WDL Publications, ISBN 0-921804-91-1, Ottawa, Canada.

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.

Burrough, P.A., 1986, *Principles of Geographical Systems for Land Ressources Assessment*. Oxford University Press, New York.

Boroughs, C. B., Zagana, E., 2001. *Daily flow routing with the Muskingum-Cinge method in the Pecos River riverware model*. Journal of Hydrology, Vol. 348, pp. 21-32.

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.

Cowen, D.J., 1988, *GIS Versus CAD Versus DBMS: What are the Differences*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54:1551-4.

Djokcic, D., Ye, Z., Miller, A., 1997. *Efficient watershed delineation using ArcView and Spatial analyst*. Proc., 17th Int. ESRI User Conf., Environmental Systems Research Institute, San Diego, California.

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.

Gaspar, J.A., 2000, *Cartas e Projecções Cartográficas*, Edições LIDEL, Lisboa.

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.

Goodchild, M.F., 2005. *Geographic information systems*. An Electronic Journal of Geography and Mathematics, Vol.14.

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.

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 Nº 10, pp. 2639-2658.

Healey, R. G., 1991, *Database Management Systems in Geographical Information Systems: Principles and Applications*, pp. 251-267. Longmans, London.

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., 1994. *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.

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

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.

Maguire, D.J., 1991, *An Overview and Definition of GIS*, Geographical Information Systems: Principles and Applications, Vol. I, pp. 9-20.

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.

Matos, J., 2001, *Fundamentos de Informação Geográfica*, Edições LIDEL, Lisboa.

Matos, J., 2007. *Modelos digitais do terreno*. Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Melo e Silva, D., 2008, *Integração de Ferramentas de SIG na Modelação Hidrológica de Pequenas Bacias Hidrográficas*, Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Neto, P.L., 1998, *Sistemas de Informação Geográfica*, FCA – Editora de Informática, Lisboa.

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.

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.

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 Francisco, pp. 1-10.

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 Francisco.

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.

United States Department of Agriculture, 1951. *Soil Survey Manual #18*, Washington, DC.

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	0,050	0,150
Solo Sedimentar livre de Rochas		0,100
Baldios sem resíduos	0,008	0,012
Campos cultivados sem entulho	0,060	0,120
Campos cultivados com entulho	0,160	0,220
Terrenos lavrados sem entulho	0,060	0,120
Terrenos lavrados com entulho	0,10	0,160
Terreno não cultivado, não lavrado	0,040	0,100
Vegetação dispersa	0,053	0,130
Vegetação arbustiva baixa (tipo relva)	0,100	0,200
Vegetação arbustiva baixa (tipo relva) e pobre, em terreno árido		0,300
Superfície nua		0,350
Vegetação arbustiva densa e solos florestais		0,400

Anexo B – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning (n) para canais a céu aberto
(adaptado de Chow, 1998).

Materiais de Canais a Céu Aberto	Condições dos Canais	Valores do Coeficiente de Rugosidade (n)			
		Óptimos	Bons	Razoáveis	Maus
Alvenaria de Pedra	Alinhamentos rectos Curvas Escavação cuidada Escavação grosseira Condições normais Pequenos canais		0,014	0,017	
Alvenaria de Tijolo		0,012	0,014	0,016	0,018
Betão			0,013	0,014	
Betão			0,015	0,017	
Rocha			0,030	0,035	
Rocha			0,035	0,040	
Solo-Cimento			0,020	0,025	
Terra			0,020	0,025	
Terra			0,025	0,030	

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	TIPO DE SOLO				CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE	TIPO DE SOLO			
	A	B	C	D		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	77	86	91	94	segundo o maior declive	77	86	91	94
	62	71	78	81		62	71	78	81		54	76	84	88
Pastagens ou Matos: Em más condições Em boas condições	68	72	86	89	Culturas arvenses	62	74	82	85	segundo as curvas de nível e em terraços	60	71	79	82
	39	61	74	80		60	71	79	82		62	75	83	87
Prado em boas condições	30	58	71	76	Totatóes de cultura	60	72	81	84	segundo as curvas de nível e em terraços	57	70	78	82
	45	66	77	83		68	79	86	89		68	79	86	89
Bosques ou Zonas Florestais: Cobertura má, sem "Mulch" Boa cobertura	25	55	70	77	Pastagens	49	59	73	84	pobre	49	59	73	84
	39	61	74	80		39	61	74	80		47	67	81	88
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitérios, etc. Boas condições: Relva cobrindo mais de 75% da área Condições razoáveis: Relva cobrindo de 50 a 75% da área	49	62	73	84	Prado permanente	6	35	70	79	normal, segundo as curvas de nível	25	59	75	83
	82	92	94	95		30	58	71	78		6	35	70	79
Zonas comerciais e de escritórios (75% de área impermeável)	81	88	91	93	Zonas sociais rurais	59	74	82	86	normal	30	58	71	78
Zonas Industriais (72% de área impermeável)					Estradas	72	82	87	89	pavimento permeável	74	84	90	92
Zonas Residuais: Áreas médias dos lotes Percentagem média impermeável	77	85	90	92		56	75	86	91		56	75	86	91
	61	75	81	87	Florestas	46	68	78	84	muito abertas ou de baixa transpiração	46	68	78	84
	57	72	81	86		36	60	70	76		36	60	70	76
	54	70	80	85	Superfície impermeável	36	60	70	76	densas ou de alta transpiração	36	60	70	76
	41	68	79	84		15	44	54	61		15	44	54	61
Parques de Estacionamento, telhados, viadutos, etc.	58	58	58	58		100	100	100	100	muito densas ou de alta transpiração	100	100	100	100
Arruamentos e Estradas:														
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98										
Gravilha	76	85	89	91										
Terra	72	87	87	89										

Anexo D – Séries temporais de escoamento gerado pelo software HEC-HMS, para as diferentes secções terminais da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, para o cenário actual.

<i>Tempo</i>	<i>Escoamento (m³/s)</i>			<i>Tempo</i>	<i>Escoamento (m³/s)</i>		
	ST1 (Foz)	ST2	ST3		ST1 (Foz)	ST2	ST3
0:00	1,0	0,6	0,5	3:35	10,9	5,2	3,4
0:05	1,0	0,7	0,5	3:40	9,9	4,8	3,2
0:10	1,0	0,7	0,5	3:45	9,0	4,6	3,0
0:15	1,0	0,7	0,5	3:50	8,3	4,4	2,9
0:20	1,0	0,7	0,5	3:55	7,6	4,2	2,8
0:25	1,0	0,7	0,5	4:00	7,0	4,0	2,7
0:30	1,0	0,7	0,5	4:05	6,6	3,9	2,6
0:35	1,0	0,7	0,6	4:10	6,2	3,8	2,6
0:40	1,0	0,8	0,6	4:15	6,0	3,8	2,6
0:45	1,0	0,9	0,7	4:20	5,8	3,7	2,6
0:50	1,1	1,1	0,8	4:25	5,7	3,7	2,6
0:55	1,1	1,4	1,0	4:30	5,6	3,7	2,6
1:00	1,2	1,9	1,3	4:35	5,5	3,6	2,6
1:05	1,4	2,7	1,9	4:40	5,4	3,6	2,6
1:10	1,7	4,0	2,8	4:45	5,4	3,6	2,5
1:15	2,3	6,3	4,6	4:50	5,3	3,5	2,5
1:20	3,2	9,4	6,8	4:55	5,3	3,5	2,5
1:25	5,0	13,3	9,9	5:00	5,3	3,5	2,5
1:30	8,0	17,8	13,8	5:05	5,2	3,5	2,5
1:35	12,5	22,4	17,7	5:10	5,2	3,4	2,5
1:40	18,5	26,8	21,5	5:15	5,2	3,4	2,5
1:45	25,9	30,5	24,8	5:20	5,1	3,4	2,5
1:50	33,8	32,0	25,9	5:25	5,1	3,4	2,5
1:55	40,0	30,6	24,6	5:30	5,1	3,3	2,5
2:00	44,2	27,9	22,5	5:35	5,0	3,3	2,5
2:05	46,0	25,1	20,2	5:40	5,0	3,3	2,5
2:10	45,2	22,6	18,2	5:45	5,0	3,3	2,5
2:15	42,4	20,4	16,5	5:50	5,0	3,3	2,5
2:20	38,8	18,6	14,9	5:55	4,9	3,3	2,5
2:25	35,3	17,1	13,7	6:00	4,9	3,2	2,5
2:30	32,1	16,0	12,7	6:05	4,9	3,2	2,4
2:35	29,5	15,1	11,9	6:10	4,9	3,2	2,4
2:40	27,2	14,4	11,3	6:15	4,9	3,2	2,4
2:45	25,2	13,5	10,4	6:20	4,8	3,2	2,4
2:50	23,5	12,4	9,4	6:25	4,8	3,2	2,4
2:55	22,1	11,2	8,5	6:30	4,8	3,1	2,4
3:00	20,7	10,0	7,4	6:35	4,8	3,1	2,4
3:05	19,3	9,0	6,7	6:40	4,8	3,1	2,4
3:10	17,8	8,1	5,9	6:45	4,7	3,1	2,4
3:15	16,2	7,3	5,3	6:50	4,7	3,1	2,4
3:20	14,7	6,6	4,7	6:55	4,7	3,1	2,4
3:25	13,3	6,1	4,2	7:00	4,7	3,1	2,4
3:30	12,0	5,6	3,8				

Anexo E – Séries temporais de escoamento gerado pelo *software* HEC-HMS, para as diferentes secções terminais da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares, para o cenário de 1964.

<i>Tempo</i>	<i>Escoamento (m³/s)</i>			<i>Tempo</i>	<i>Escoamento (m³/s)</i>		
	ST1 (Foz)	ST2	ST3		ST1 (Foz)	ST2	ST3
0:00	1,0	0,6	0,5	3:35	14,5	6,8	5,1
0:05	1,0	0,6	0,5	3:40	13,3	6,3	4,7
0:10	1,0	0,6	0,5	3:45	12,3	5,8	4,3
0:15	1,0	0,6	0,5	3:50	11,3	5,3	3,9
0:20	1,0	0,6	0,5	3:55	10,4	5,0	3,6
0:25	1,0	0,6	0,5	4:00	9,6	4,6	3,3
0:30	1,0	0,7	0,5	4:05	8,8	4,3	3,0
0:35	1,0	0,7	0,5	4:10	8,2	4,0	2,8
0:40	1,0	0,7	0,5	4:15	7,6	3,8	2,6
0:45	1,0	0,7	0,5	4:20	7,0	3,6	2,4
0:50	1,0	0,7	0,5	4:25	6,5	3,4	2,3
0:55	1,0	0,7	0,6	4:30	6,1	3,2	2,1
1:00	1,0	0,8	0,6	4:35	5,7	3,1	2,1
1:05	1,1	0,9	0,7	4:40	5,4	2,9	2,0
1:10	1,1	1,1	0,9	4:45	5,1	2,9	2,0
1:15	1,1	1,4	1,2	4:50	4,8	2,8	2,0
1:20	1,3	2,0	1,8	4:55	4,6	2,8	2,0
1:25	1,6	3,0	2,7	5:00	4,4	2,8	2,0
1:30	2,0	4,4	4,0	5:05	4,3	2,7	2,0
1:35	2,7	6,3	5,7	5:10	4,2	2,7	2,0
1:40	4,0	8,6	7,7	5:15	4,2	2,7	2,0
1:45	6,1	11,2	10,0	5:20	4,1	2,7	2,0
1:50	9,1	14,1	12,5	5:25	4,1	2,6	2,0
1:55	12,9	17,2	15,3	5:30	4,1	2,6	1,9
2:00	17,1	20,5	18,2	5:35	4,0	2,6	1,9
2:05	21,7	22,7	19,8	5:40	4,0	2,6	1,9
2:10	26,3	23,2	19,7	5:45	4,0	2,6	1,9
2:15	30,2	22,4	18,8	5:50	3,9	2,5	1,9
2:20	33,2	21,1	17,5	5:55	3,9	2,5	1,9
2:25	34,5	19,6	16,2	6:00	3,9	2,5	1,9
2:30	34,2	18,2	14,9	6:05	3,9	2,5	1,9
2:35	32,7	16,8	13,8	6:10	3,8	2,5	1,9
2:40	30,7	15,7	12,8	6:15	3,8	2,5	1,9
2:45	28,7	14,6	11,8	6:20	3,8	2,4	1,9
2:50	26,7	13,7	11,0	6:25	3,8	2,4	1,9
2:55	24,9	12,9	10,3	6:30	3,8	2,4	1,9
3:00	23,3	12,2	9,7	6:35	3,7	2,4	1,9
3:05	21,8	11,4	9,0	6:40	3,7	2,4	1,9
3:10	20,4	10,6	8,3	6:45	3,7	2,4	1,9
3:15	19,1	9,7	7,5	6:50	3,7	2,4	1,9
3:20	18,0	8,9	6,8	6:55	3,7	2,4	1,9
3:25	16,8	8,1	6,2	7:00	3,7	2,3	1,9
3:30	15,6	7,4	5,6				

