

Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

**OS SIG APLICADOS À ANÁLISE DO RISCO DE  
INUNDAÇÃO PROGRESSIVA DO RIO TEJO,  
ENTRE BELVER E VILA NOVA DA BARQUINHA,  
REGIÃO DO MÉDIO TEJO**

(Versão definitiva)

João Pedro Rodrigues Belo

**Orientador:**

Professor Doutor José Martinho Lourenço

**Coorientador:**

Professor Doutor Pierluigi Rosina



Vila Real

2012

Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

**OS SIG APLICADOS À ANÁLISE DO RISCO DE  
INUNDAÇÃO PROGRESSIVA DO RIO TEJO,  
ENTRE BELVER E VILA NOVA DA BARQUINHA,  
REGIÃO DO MÉDIO TEJO**

(Versão definitiva)

João Pedro Rodrigues Belo

**Orientador:**

Professor Doutor José Martinho Lourenço

**Coorientador:**

Professor Doutor Pierluigi Rosina



Vila Real

2012

Dissertação de mestrado em Sistemas de Informação Geográfica, apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e Arquitetura Paisagista da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, realizada sob a orientação do Professor Doutor José Manuel Martinho Lourenço, Professor Auxiliar do Departamento de Geologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, e coorientação do Professor Doutor Pierluigi Rosina, Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Tomar, em conformidade com o Decreto-Lei n.º 216/92, de 13 de outubro.

## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABELAS .....	X
LISTA DE EQUAÇÕES .....	XI
LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS .....	XII
AGRADECIMENTOS .....	XIV
RESUMO .....	XV
PALAVRAS CHAVE .....	XVI
ABSTRACT .....	XVII
KEYWORDS .....	XVIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Organização do trabalho e conteúdo dos diversos capítulos .....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1. Sistemas de Informação Geográfica .....	5
2.1.1. Características dos SIG .....	6
2.1.2. Aplicabilidade dos SIG .....	7
2.1.3. Base de dados.....	8
2.1.4. Modelos numéricos para a simulação de inundações .....	11
2.1.5. HEC-RAS/HEC-GEORAS .....	12
2.1.5.1. Formulação matemática do modelo HEC-RAS .....	13
2.1.5.1.1 Capacidade de transporte .....	15
2.1.5.1.2. Coeficiente de velocidade da água.....	16
2.2. Riscos Naturais .....	16
2.2.1. Perigosidade .....	17
2.2.2. Vulnerabilidade.....	18
2.2.3. Risco .....	18

2.3. Cheias e inundações fluviais.....	19
2.4. As cheias e inundações no rio Tejo .....	20
2.5. A aplicação dos SIG na análise do risco de inundação .....	22
2.6. Estudos de casos semelhantes.....	23
3. MÉDIO TEJO.....	27
3.1. Localização da área em estudo .....	27
3.2. Clima.....	33
3.2.1. Pluviosidade.....	33
3.2.2. Temperatura .....	34
3.3. Hidrografia.....	35
3.4. Geologia.....	40
3.5. Demografia .....	41
3.6. Uso e Ocupação do Solo.....	50
4. SOFTWARE, DADOS E METODOLOGIA .....	54
4.1. <i>Software</i> .....	54
4.1.1. Sistema de referenciação.....	54
4.1.2. Base de dados.....	55
4.1.3. Modelação numérica da inundação HEC-RAS/HEC-GEORAS .....	57
4.1.3.1. Criação dos dados geométricos ArcGis®/HEC-GEORAS .....	57
4.1.3.2. Simulação de inundações no modelo numérico HEC-RAS.....	60
4.1.3.3. Calibração .....	64
4.2. Dados .....	69
4.2.1. Dados hidrológicos .....	69
4.2.1.1. Caudais e alturas hidrométricas .....	70
4.2.2. Dados cartográficos .....	74
4.2.3. Criação do MNT .....	76
4.3. Metodologia.....	77

4.3.1. Definição dos critérios de classificação para o cálculo da perigosidade, vulnerabilidade e risco de inundação .....	87
4.3.2. Definição de caudais para diferentes probabilidades de ocorrência e períodos de retorno .....	93
4.3.3. Simulação de inundações para os cenários com probabilidade de ocorrência de 10% e 1%.....	96
4.3.4. Perigosidade .....	100
4.3.5. Suscetibilidade física .....	102
4.3.6. Vulnerabilidade socioeconómica .....	103
4.3.7. Risco de inundação .....	109
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	110
5.1. Análise comparativa de diferentes resultados de delimitação de inundações ...	110
5.2. Profundidade e velocidade das inundações com probabilidades de ocorrência de 1% e 10% .....	113
5.3. Perigosidade.....	116
5.4. Suscetibilidade física .....	119
5.5. Vulnerabilidade socioeconómica.....	123
5.6. Risco de inundação .....	126
5.7. Identificação de áreas com risco elevado e muito elevado.....	129
5.8. Sugestão de algumas medidas mitigadoras do risco.....	131
5.9 Análise das potencialidades e limitações dos SIG no estudo multifatorial do risco de inundação .....	133
6. CONCLUSÕES .....	135
7. PERSPETIVAS FUTURAS .....	138
BIBLIOGRAFIA E WEBGRAFIA.....	139
ANEXO 1 .....	145
ANEXO 2 .....	150

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Capacidade de armazenamento de uma geodatabase .....	10
Figura 2.2. Termos da equação unidimensional da conservação de energia.....	14
Figura 2.3. Método de subdivisão: a capacidade de transporte resulta do somatório dos valores respetivos, calculados para a margem esquerda, centro do canal e margem direita.....	15
Figura 3.1. Localização Geográfica do Médio Tejo.....	29
Figura 3.2. Localização do Médio Tejo sobre a Carta Militar de Portugal.....	30
Figura 3.3. Hipsometria e Hidrografia do Médio Tejo.....	31
Figura 3.4. Área afetada por inundações progressivas no Médio Tejo.....	32
Figura 3.5. Precipitação média anual (mm), período 1931-1960.....	37
Figura 3.6. Média anual do número de dias com precipitação (igual ou superior a 1 mm), período 1931-1960.....	38
Figura 3.7. Temperatura média diária do ar (°C), período 1931-1960.....	39
Figura 3.8. Bacia Hidrográfica do rio Tejo em Portugal e Espanha.....	43
Figura 3.9. Unidades Morfoestruturais e Hidrogeológicas do Médio Tejo.....	44
Figura 3.10. Carta Litológica do Médio Tejo.....	45
Figura 3.11. Total de habitantes presentes por concelho no Médio Tejo.....	47
Figura 3.12. Densidade populacional por concelho do Médio Tejo.....	48
Figura 3.13. Total de presentes por subsecção estatística (adaptado de INE, 2011).....	49
Figura 3.14. Uso do solo no Médio Tejo.....	51
Figura 3.15. Uso do solo (nível 1) na área com maior perigosidade de inundação no Médio Tejo.....	53
Figura 4.1. Estrutura simplificada da geodatabase BD_MTEJO.....	56
Figura 4.2. Mapa dos dados geométricos e hipsometria do MDE elaborado: rio, margens de leito de cheia e perfis transversais.....	59
Figura 4.3. Ponto de controlo (Vila Nova da Barquinha).....	64
Figura 4.4. Ponto de controlo (Constância).....	65
Figura 4.5. Ponto de controlo (Constância).....	65
Figura 4.6. Ponto de controlo (Rossio).....	65
Figura 4.7. Exemplo de triangulação de Delaunay.....	77
Figura 4.8. Processos metodológicos aconselhados pela ANPC para o estudo do risco.....	79

Figura 4.9. Legenda dos fluxogramas da metodologia.....	81
Figura 4.10. Fluxograma para o cálculo da perigosidade de inundação.....	83
Figura 4.11. Fluxograma para o cálculo da suscetibilidade física à inundação.....	84
Figura 4.12. Fluxograma para o cálculo da vulnerabilidade social e económica.....	86
Figura 4.13. Painel Geometric HEC-RAS: dados geométricos.....	97
Figura 4.14. Painel <i>Steady flow data</i> : dados dos caudais e das condições de contorno. .	97
Figura 4.15. Painel <i>Gis Export</i> : opções para a exportação dos dados para formato Gis (HEC-GEORAS). .....	98
Figura 4.16. Painel <i>Import RAS data</i> : procedimento de importação e processamento dos dados.....	99
Figura 4.17. ArcGis®: dados vetoriais obtidos da simulação (extensão, velocidade, perfis, etc.).....	100
Figura 4.18. Vectorização de <i>hot-spots</i> (H_S) e comércio/serviços (C_S) na área de Vila Nova da Barquinha, sobre fotografia aérea do servidor Bing Maps, em ambiente ArcGis® .....	104
Figura 4.19. Matriz de comércio/serviços da área de Vila Nova da Barquinha. ....	105
Figura 4.20. Cálculo da vulnerabilidade socioeconómica na ferramenta <i>raster calculator</i> (ArcGis®).....	106
Figura 4.21. Cálculo da suscetibilidade económica na ferramenta <i>raster calculator</i> (ArcGis®).....	107
Figura 4.22. Mapas das suscetibilidades social (1) e económica (2) para a área em estudo.....	108
Figura 5.1. Delimitações das áreas inundáveis desenvolvidas por diferentes entidades, em comparação com os valores simulados, sobre ortofoto acedido a partir do servidor Bing Maps Aereal.....	112
Figura 5.2. Profundidade da inundação para os cenários com 1% e 10% de probabilidade de ocorrência (segundo o método de Gumbel).....	114
Figura 5.3. Mapa de velocidade da inundação para os cenários com probabilidade de ocorrência de 1% e 10% (segundo o método de Gumbel). .....	115
Figura 5.4- Mapa de perigosidade para os cenários de probabilidade de ocorrência de 1% e 10% (segundo o método de Gumbel).....	118
Figura 5.5. Suscetibilidade à inundação segundo o declive. ....	120
Figura 5.6. Mapa de suscetibilidade à inundação com base na permeabilidade das unidades litológicas. ....	121

Figura 5.7. Mapa de suscetibilidade física à inundação. ....	122
Figura 5.8. Mapa da vulnerabilidade socioeconómica com probabilidade de ocorrência de 1% e 10% (segundo o método de Gumbel). ....	124
Figura 5.9. Mapa de suscetibilidade ao risco de inundação da área em estudo, para os cenários com probabilidade de ocorrência de 1% e 10% (segundo o método de Gumbel). ....	127
Figura 5.10. Áreas do Médio Tejo que apresentam suscetibilidade ao risco de inundação progressiva, para a probabilidade de ocorrência de 1% (segundo o método de Gumbel). ....	130
Figura 5.11. Áreas do Médio Tejo que apresentam suscetibilidade ao risco de inundação progressiva, com a probabilidade de ocorrência de 10% (segundo o método de Gumbel). ....	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Valores totais de residentes e presentes, número de famílias, alojamentos e edifícios, valores de densidade populacional e área (km <sup>2</sup> ) dos concelhos do Médio Tejo. ....	46
Tabela 3.2. Área (km <sup>2</sup> ) e percentagem da área relativamente à área total (%) para os diferentes tipos de uso do solo, nos anos de 1990, 2000 e 2006. ....	50
Tabela 4.1. Valores ( <i>n</i> ) do coeficiente de rugosidade de Manning .....	61
Tabela 4.2. Valores do coeficiente de rugosidade de Manning utilizados na primeira simulação. ....	62
Tabela 4.3 Erros obtidos por comparação dos valores das cotas de inundação simuladas e observadas, para a cheia de 1979 .....	63
Tabela 4.4. Cotas e respetivos erros obtidos nas diferentes simulações de calibração do modelo (cheia de 1979). ....	66
Tabela 4.5. Profundidade da inundação de 1979 nos pontos de controlo e valores médios de profundidade obtidos por simulação. ....	67
Tabela 4.6 Registos históricos dos eventos de cheia do rio Tejo, entre 1823 e 1989. ...	70
Tabela 4.7. Dados sistemáticos de caudal máximo instantâneo anual para as estações de Tramagal e Almourol, para um período contínuo de 30 anos .....	72
Tabela 4.8. Cotas (m) atingidas nas estações hidrométricas de Abrantes, Tramagal, Almourol e Vila Nova da Barquinha, em diversos cenários de cheia, entre 1876 e 1989. ....	73
Tabela 4.9. Dados cartográficos (modelo vetorial) discriminados por tipo, escala e fonte. ....	75
Tabela 4.10. Dados cartográficos (modelo matricial) segundo tipo, escala/resolução e fonte. ....	75
Tabela 4.11. Valores e intervalos utilizados na (re)classificação de mapas. ....	90
Tabela 4.12. Classificação dos tipos litológicos com base na sua permeabilidade. ....	92
Tabela 4.13. Classificação dos tipos de ocupação do solo (nível 1, COS2007). ....	92
Tabela 4.14. Caudais obtidos para os períodos de retorno de 10 anos e 100 anos, nas estações de Tramagal e Almourol (segundo o método de Gumbel). ....	95

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 Equação universal da conservação de energia .....	13
Equação 2.2 Cálculo da perda de carga total .....	14
Equação 2.3 Cálculo do comprimento médio do troço .....	14
Equação 2.4 Equação de Manning-Strickler .....	15
Equação 2.5 Determinação da capacidade de transporte.....	15
Equação 2.6 Coeficiente de velocidade da água.....	16
Equação 4.1 Fórmula para o cálculo do risco (Westen, 2004).....	79
Equação 4.2 Fórmula do risco, transformada e adaptada de Westen (2004).....	80
Equação 4.3 Cálculo do período de retorno .....	93
Equação 4.4 Distribuição de Gumbel .....	94
Equação 4.5 Equação resultante de adaptação das equações 4.3 e 4.4.....	94
Equação 4.6 Equação de Vem Te Chow .....	94
Equação 4.7 Fator de frequência “k” .....	95
Equação 4.8 Cálculo dos caudais de ponta de cheia.....	95

## **LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS**

ANPC – Autoridade Nacional de Proteção Civil  
ARH – Administração de Região Hidrográfica  
BD – Base de Dados  
BH – Bacia Hidrográfica  
CCDR-LVT – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo  
CGIS – Canada Geographical Information Systems  
CLC – Corine Land Cover  
CMP – Carta Militar de Portugal  
COS – Carta de Ocupação do Solo  
DBMS – Database Management System  
DRAOT – Direção Regional do Ambiente e Ordenamento do Território  
ESRI – Environmental Systems Research Institute  
ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais  
EU – European Commission  
GB – Gigabyte  
GNSS – Global Navigation Satellite Systems  
GPS – Global Positioning System  
HEC-1 – Hydrologic Engineering Center's 1  
HEC-RAS – Hydrologic Engineering Center's River Analysis System  
HGM – Hayford-Gauss Militar  
IG – Informação Geográfica  
IGeoE – Instituto Geográfico do Exército  
IGP – Instituto Geográfico Português  
INAG – Instituto Nacional da Água  
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
MDE – Modelo Digital de Elevação  
MDT – Modelo Digital de Terreno  
MNT – Modelo Numérico de Terreno  
NUT – Nomenclatura das Unidades Territoriais  
OMM – Organização Mundial de Meteorologia

PBH – Plano de Bacia Hidrográfica  
PO – Probabilidade de Ocorrência  
PR – Períodos de Retorno  
RADSAT – Radio Satellite Integrators  
SIG – Sistemas de Informação Geográfica  
SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos  
SQL – Structured Query Language  
SVAC – Sistema de Vigilância e Alerta de Cheias  
SVARH – Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos  
TB – Terabyte  
USACE – United States Army Corps of Engineers  
WGS84 – World Geodetic System 1984

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer com a maior sinceridade:

- ao Orientador Professor Doutor José Manuel Martinho Lourenço e ao Coorientador Professor Doutor Pierluigi Rosina pela incansável tarefa que prestaram, com orientações, conselhos, apoio anímico e técnico, análise conjunta dos problemas encontrados e validação dos resultados obtidos;
- a meus pais, Amélia e António, à Sara e à Cristiana, pelo incentivo, motivação, colaboração e paciência prestada;
- a todos aqueles que, de certa forma, direta ou indireta, tenham contribuído para o desenvolvimento deste estudo, quer seja pela disponibilização de dados, de informações, conselhos úteis ou até pela paciência e compreensão com que colaboraram;

Os contributos acima mencionados foram indispensáveis ao desenvolvimento deste trabalho, pelo que, uma vez mais, quero reconhecer e agradecer a todos os intervenientes.

## RESUMO

Os fenómenos de cheia e inundação do rio Tejo, mesmo com o controlo antrópico do leito das barragens, ocorrem de tempos a tempos. Por vezes a sua severidade mostra-se nefasta para as pessoas, para os seus bens e para as atividades socioeconómicas estabelecidas no território, pelo que se torna importante conhecer o risco provável que provocam.

Os SIG, especialmente na última década, têm-se evidenciado como um sistema capaz de dar resposta a problemas de análise espacial, através da aplicação de diversas ferramentas informáticas, na análise conjunta dos vários fatores intervenientes, como por exemplo o estudo dos riscos naturais e antrópicos. Neste contexto, o desenvolvimento deste estudo, pretende desenvolver uma metodologia simples que permita a análise quantitativa da suscetibilidade ao risco de inundação progressiva no Médio Tejo, no troço entre Belver (a montante) e Vila Nova da Barquinha (a jusante).

A inacessibilidade a alguns dados, fulcrais para a análise quantitativa do risco de inundação, e.g. do edificado e do valor económico de bens e serviços intervenientes, limitaram o resultado deste trabalho a uma análise qualitativa. No entanto o resultado qualitativo é relevante como contributo metodológico para o conhecimento, gestão e mitigação do risco de inundação, e o modelo pode ser facilmente adaptado para uma análise quantitativa.

Utiliza-se o *software* HEC-RAS/HEC-GEORAS para a simulação numérica de inundações para os cenários com probabilidade de ocorrência de 1% e 10%. Desenvolve-se uma metodologia SIG, baseada em análise matricial simples, adaptada aos dados hidrológicos e cartográficos disponíveis, para o cálculo da perigosidade de inundação, vulnerabilidade socioeconómica e suscetibilidade ao risco de inundação. Os SIG e o *software* ArcGis<sup>®</sup>, demonstram adequação ao estudo, resolvendo de forma capaz a metodologia usada. Apresentam grande capacidade de armazenamento, gestão, manipulação, análise e representação espacial dos dados. A análise desenvolvida, através de álgebra matricial simples, demonstrou ser adequada ao estudo do risco, permitindo um processamento rápido, para vastas áreas. As áreas urbanas de Rossio, Constância e Vila Nova da Barquinha, apresentaram os níveis de suscetibilidade ao risco de inundação progressiva mais elevados e consideráveis, em ambos os cenários de probabilidade estudados, o que se tem comprovado na realidade.

## **PALAVRAS CHAVE**

SIG, HEC-RAS, risco de inundação progressiva, Médio Tejo.

## **ABSTRACT**

Flooding and inundation in the river Tagus, despite automatic control of its water levels, occur from time to time. Occasionally its severity proves harmful to people, to their property and to the socio-economic activities established in the territory, and it is therefore important to properly comprehend these phenomena.

Geographic Information System, GIS, especially over the last decade, have been highlighted as being capable of responding to problems of spatial analysis through the application of various tools in the analysis of the various factors involved, such as the study of natural and anthropogenic risks. In this context, this study aims at developing a simple methodology that enables quantitative analysis concerning the susceptibility to the risk of progressive flooding in Medium Tagus, along the section between Belver (upstream) and Vila Nova da Barquinha (downstream).

The inaccessibility to some data, central to the quantitative analysis of flood risk, e.g. the built environment and the economic value of goods and services involved, limited the outcome of this work regarding a qualitative analysis. However, the qualitative result is relevant as a methodological contribution to knowledge, management and mitigation of flood risk, and the model can be easily adapted to a quantitative analysis.

HEC-RAS/HEC-GEORAS software was used for numerical simulation of flooding for scenarios with a probability occurrence of 1% and 10%. A GIS methodology was developed, based on simple matrix analysis, adapted to the available hydrological and cartographic data, for the calculation of flood danger, socio-economic vulnerability and susceptibility to flood risk. GIS software and ArcGis<sup>®</sup> positively suited the developed methodology. Indeed, they feature large storage capacity, management, manipulation, analysis and representation of spatial data. The developed analysis, using simple matrix algebra, proved adequate to the study of risk, enabling fast processing for large areas. Urban areas, like Rossio, Constância and Vila Nova da Barquinha, showed the highest levels of susceptibility to the risk of progressive flooding, for both scenarios, which has been actually proven true, reinforcing the need for intervention.

## **KEYWORDS**

GIS, HEC-RAS, risk of progressive flood, Medium Tagus.

# 1.INTRODUÇÃO

As inundações do rio Tejo são um fenómeno complexo com severidade variável, que de tempos a tempos são suscitados por padrões meteorológicos de precipitações intensas e prolongadas, ou potenciados por descargas, por vezes não coordenadas, das barragens existentes na sua bacia hidrográfica (portuguesa e espanhola), que incitam cenários de cheia no seu leito. Existem variadíssimos relatos que atestam a severidade e impacto dos processos de cheia e inundação no Médio Tejo dos quais se destaca, pela sua relevância, a cheia centenária de 1979, causadora de prejuízos socioeconómicos catastróficos e até perda de vidas.

Esta realidade levou ao desenvolvimento de diversos trabalhos, académicos e institucionais, por forma a perceber e conhecer causas, definir áreas prioritárias e processos de mitigação. Segundo Zêzere *et al.* (2009), as políticas e as operações de proteção civil têm sido praticamente omissas sobre o tema, preocupando-se sobretudo com medidas reativas, que culminam com a criação dos Planos de Emergência (nacionais, regionais, distritais ou municipais; gerais ou especiais). Do que foi possível apurar para o Médio Tejo, ainda não existe cartografia quantitativa do risco de inundação desenvolvida à escala regional por um conjunto de parâmetros bem definidos, incidindo a maioria dos trabalhos desenvolvidos nesta região em delimitações das inundações que, quando muito, definem a suscetibilidade ao perigo de inundação, facto que, desde logo, nos suscita interesse pelo seu estudo e conhecimento do risco de inundação associado e possível quantificação de pessoas e bens envolvidos por cenários de inundação com 1% e 10% de probabilidade de ocorrência.

Por outro lado os SIG têm-se evidenciado como ferramentas potenciadoras e sistematizadoras de processos de análise variados, nomeadamente na sua vertente de aplicação ao ramo ambiental e dos riscos naturais. Atualmente os SIG são utilizados como uma ferramenta potente e expansível que serve para armazenar variadíssimos dados coordenados, proceder à sua visualização espacial, analisar e interpretar relações e fenómenos distintos estabelecidos entre diferentes conjuntos de dados, para produzir documentos cartográficos e outros que possam auxiliar na tomada de decisões, nomeadamente no que diz respeito a políticas ambientais e de ordenamento do território. As grandes vantagens apresentadas pela aplicação deste tipo de *software*, por

exemplo na análise multifatorial utilizada nos estudos dos riscos naturais e antrópicos, leva-nos a acreditar na possibilidade de obtenção de resultados quantitativos de risco de inundação, desenvolvidos com base na aplicação de uma metodologia SIG simples.

A conciliação dos fatores anteriormente descritos demonstrou pertinência para o desenvolvimento de um estudo que, por um lado aplicasse e validasse a utilização dos SIG na resolução de problemas relacionados com os riscos naturais e, por outro lado, conseguisse obter resultados fidedignos quanto ao risco de inundação no Médio Tejo, no troço entre Belver e Vila Nova da Barquinha.

As principais motivações encontradas para o desenvolvimento deste trabalho advêm, em primeiro lugar, de um elevado interesse pessoal pela temática dos SIG e dos riscos naturais, em segundo lugar, pelo enorme potencial que os SIG têm demonstrado na resolução de problemas multifatoriais, e, em terceiro lugar, pelo conhecimento particular deste território e pelo reconhecimento da importância que o risco de inundação para ele representa.

Neste contexto, o presente estudo visa o desenvolvimento e estruturação de um projeto SIG que permita a obtenção de resultados de risco coerentes, mediante a aplicação de uma metodologia quantitativa do risco de inundação. A obtenção desses resultados, em parte, validaria a metodologia e a capacidade e potencialidade dos SIG na análise de fenómenos concretos e na ajuda à tomada de decisões.

## **1.1. Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia SIG, simples e coerente, que permita a análise da suscetibilidade ao risco de inundação progressiva no Médio Tejo, entre Belver, a montante, e Vila Nova da Barquinha, a jusante.

Para atingir este objetivo, será necessário:

- Utilizar *software* de modelação hidrológica (HEC-RAS/HEC-GEORAS) para o estudo da perigosidade de inundação, baseado na simulação de inundações fundamentadas nos caudais obtidos para períodos de retorno (PR) de 100 anos e 10 anos com a probabilidade de ocorrência 1% e 10%, respetivamente, de serem iguais ou excedidos;

- Conhecer com o maior rigor possível, à escala de análise, a profundidade, velocidade e extensão atingidas para os cenários de inundação estudados;
- Aplicar metodologia SIG como suporte ao estudo do risco de inundação, com base em dados disponíveis ou fáceis de obter e, acima de tudo, que se venha a demonstrar eficiente e fácil de ser aplicada por terceiros;
- Conhecer e quantificar, com o maior rigor possível, a vulnerabilidade socioeconómica do território e a perigosidade e risco de inundação para os cenários com a probabilidade de ocorrência de 1% e 10%, respetivamente;
- Identificar áreas com risco de inundação muito elevado que eventualmente possam ser intervencionadas com planos de ordenamento adequados;
- Analisar as vantagens/desvantagens proporcionadas pelos SIG na análise matricial multifatorial, apontando as potencialidades e limitações encontradas no desenvolvimento deste trabalho.

## **1.2. Organização do trabalho e conteúdo dos diversos capítulos**

Este trabalho encontra-se estruturado em sete capítulos:

No capítulo 1 faz-se uma breve introdução ao estudo. Referem-se inundações históricas no Médio Tejo e alguns trabalhos desenvolvidos. Tecem-se considerações genéricas quanto ao potencial da aplicação dos SIG como ferramenta de análise com vista à caracterização do risco de inundação. Apresenta-se a motivação deste trabalho, definem-se os objetivos e sintetiza-se a organização do trabalho escrito.

No capítulo 2 é feita uma resenha bibliográfica. São definidos os SIG, as suas características principais e aplicabilidades. Abordam-se os modelos numéricos para a simulação de inundações e especificamente o modelo hidráulico unidimensional HEC-RAS/HEC-GEORAS utilizado no desenvolvimento deste estudo, discriminando as formulações matemáticas mais importantes que lhe estão subjacentes. É abordada a teoria dos riscos naturais, onde se apresentam algumas definições como perigosidade, vulnerabilidade e risco. São definidas cheias e inundações fluviais e tecidas considerações quanto à sua ocorrência no território em estudo. Por último, é feita a apresentação de estudos de caso semelhantes, sendo apresentado um conjunto de

estudos nacionais e internacionais relacionados com a aplicação de SIG ao estudo da perigosidade e risco de inundação.

No capítulo 3 é feita uma breve apresentação e caracterização do Médio Tejo. Faz-se uma abordagem, em termos climáticos, quanto à temperatura e pluviosidade. Apresentam-se e caracterizam-se a litologia e as unidades morfoestruturais existentes. Faz-se uma análise diacrónica da ocupação do solo entre os anos de 1990, 2000 e 2006. Por último, é feita uma caracterização social e económica da região, onde se apresentam totais demográficos e densidades populacionais e se avalia a dinâmica demográfica do território em análise.

No capítulo 4 são apresentados o *software* utilizado e os conjuntos de dados coligidos (hidrológicos e cartográficos, vetoriais e matriciais) para a resolução da análise da perigosidade, vulnerabilidade, suscetibilidade e risco. Apresenta-se a formulação adotada para a análise do risco e a metodologia SIG criada para o desenvolvimento dos vários processos que culminam na obtenção do risco de inundação para o Médio Tejo. São descritos e analisados todos os processos metodológicos seguidos até à obtenção de resultados. São descritos os procedimentos executados no modelo hidráulico HEC-RAS/GEORAS, desde a calibração até à obtenção dos resultados simulados relativos à extensão, profundidade e velocidade, para os cenários com 1% e 10% de probabilidade de ocorrência de uma inundação igual ou superior. Descreve-se e argumenta-se os vários procedimentos tomados na resolução da metodologia SIG, no *software* ArcGis<sup>®</sup>, versão 10 (doravante designado ArcGis).

No capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, as vantagens e limitações da utilização dos SIG no estudo do risco de inundação, e alguns princípios de gestão e mitigação, que podem ser interpretados a partir da cartografia de risco.

No sexto capítulo apresentam-se as conclusões deste estudo.

No sétimo capítulo abordam-se as limitações do trabalho, nomeadamente a indisponibilidade e/ou inexistência de dados e o prazo útil para a sua execução. São apresentados alguns parâmetros e conselhos que poderiam melhorar a precisão e a fidedignidade do modelo e faz-se referência a trabalhos futuros.

O trabalho conclui-se com a lista de referências bibliográficas e dois anexos, onde se incluem tabelas com os valores da Rugosidade de Manning, utilizados nas várias simulações, e os valores da média e desvio padrão da Variável de Gumbel.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Sistemas de Informação Geográfica

A informação geográfica (IG), objeto de estudo desde os primórdios da geografia, engloba um vasto conjunto de informações relativas à superfície terrestre e aos fenómenos, físicos e humanos, que nela se desenvolvem, (e.g., IG referente a censos, cadastro predial, limites administrativos, uso e ocupação do solo, geologia e hipsometria, entre outros), sendo intrínseco à IG, a existência de um espaço geográfico concreto. Os SIG não são mais do que sistemas que têm a capacidade de gerar, armazenar, manipular, analisar e representar IG.

A definição de SIG é ampla, podendo ser relativamente divergente segundo diferentes autores e, segundo Chrisman (1999), depende fortemente do contexto em que é aplicada. A exemplo, um SIG pode ser definido como:

"Um poderoso conjunto de ferramentas para recolha, armazenamento, recuperação e exibição de dados do mundo real para determinados propósitos" (Burrough, 1986);

"Qualquer conjunto de procedimentos manuais ou baseados em computador destinados a armazenar e manipular dados referenciados geograficamente" (Aronoff, 1989);

"Um sistema de apoio à decisão que envolve a integração de dados espacialmente referenciados, em um ambiente para resolução de problemas" (Cowen, 1988).

Clarke (1986) definiu um conjunto de características e componentes, comuns aos SIG, que podem ser úteis para a sua definição funcional, sendo estes:

- i) um grupo de dados com propriedades espaciais;
- ii) uma topologia definida (expressão numérica ou lógica das relações estabelecidas entre os dados);
- iii) arquivos ou estruturas de dados comuns;
- iv) habilidade do sistema para executar as funções de recolha, armazenamento, manipulação, análise e produção cartográfica.

De forma simplista Gregory & Ell (2007) definem um SIG como um sistema que nos permite lidar com informação georreferenciada relativa a características da

superfície da terra, recorrendo, para o efeito, a um pacote de *software* projetado para a representação de informação geográfica de forma eficiente.

### 2.1.1. Características dos SIG

A grande diferença que destaca os diferentes pacotes de *software* SIG relativamente aos de desenho assistido por computador e de bases de dados elementares, é a capacidade conjunta de armazenamento em sistemas de bases de dados robustas, genericamente designadas *Database Management Systems* (DBMS) (Cowen, 1988), acompanhada da visualização, manipulação e edição de informação geográfica georreferenciada, através de sistemas de coordenadas (cartográficas ou geográficas), e a produção de documentos cartográficos explicativos e/ou representativos das mais diversas temáticas de análise. De acordo com Cowen (1988), a conexão a um banco de dados fornece a base para distinguir um SIG de um programa de desenho assistido por computador. Contudo, considera-se que o cerne dos SIG se destaca acima de tudo pela sua capacidade analítica, nomeadamente a espacial.

Os modelos de dados geográficos mais comuns são de dois tipos:

Vetorial – compostos por pontos (definidos por um conjunto de coordenadas X, Y e Z, que representam as coordenadas Oeste-Este, Norte-Sul e altitude, respetivamente), linhas (definidas, no mínimo, por dois conjuntos de coordenadas) e polígonos (definidos por  $n$  conjuntos de coordenadas, dos quais o primeiro e o último são geograficamente coincidentes). Estes elementos podem, se topologicamente relacionados, ser analisados de forma conjunta ou disjunta (e.g. comprimentos, perímetros, áreas, distâncias e outras relações estabelecidas entre os diferentes elementos são passíveis de análise). Este tipo de dados permite a modelação a duas ou três dimensões e a diferentes escalas de pormenor, a execução de cálculos geométricos e a inquirição (*query*) da base de dados (BD);

Matricial – uma matriz, ou imagem, que representa o espaço através de uma malha contínua, composta de células, ou *pixéis*, identificando-se cada um deles através dos respetivos índices de linha e de coluna. Cada

uma das células regista um único valor numérico, que pode traduzir informação diversa referente ao tema em análise num espaço geográfico confinado. Este modelo considera-se mais adequado à análise de fenómenos com distribuição contínua. As matrizes beneficiam, entre elas, de alta capacidade de cálculo, devido à possibilidade de sobreposição (*overlay*), que permite o estabelecimento de cálculos entre células adjacentes.

### **2.1.2. Aplicabilidade dos SIG**

O vasto conjunto de fenómenos que podem ser representados e analisados, a capacidade para gerar e gerir informação geográfica georreferenciada e a capacidade eficiente de representação dos resultados em análise, trouxeram aos SIG uma importância cada vez mais relevante desde a última década do séc. XX. O aparecimento desta tecnologia (na década de 1960) teve como precursor o grupo *Canada Geographical Information Systems (CGIS)*.

Atualmente o SIG é uma tecnologia amplamente utilizada, e em tendência crescente, devido ao forte investimento recente em *software* (comercial, *freeware* e/ou *open source*) cada vez mais funcionais e com interfaces progressivamente mais amigáveis e intuitivas (*user friendly*).

De acordo com Matos (2008), considerando que todos os sistemas que envolvam informação georreferenciável possam, em maior ou menor grau, beneficiar de uma representação geográfica, tornar-se-ia uma tarefa em vão tentar enumerar as possíveis aplicações dos SIG. Contudo, o mesmo autor atribui aos SIG cinco grandes domínios de utilização:

- i) informação cadastral e infraestruturas;
- ii) planeamento e gestão de recursos naturais;
- iii) modelação espacial e temporal;
- iv) visualização de informação geográfica;
- v) navegação.

A utilização dos SIG aplica-se na produção de documentos cartográficos e experimentais de:

- i) apoio à gestão e à decisão de diretrizes de ordenamento do território (e.g. utilizado em setores do estado, autarquias e ministérios);
- ii) apoio aos mais diversos ramos do saber, sendo as áreas das geociências e do ambiente as que mais aplicabilidade têm encontrado nos SIG;
- iii) gestão e otimização de frotas de transportes;
- iv) desenvolvimento de cartografia de/para *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS), interativa e *turn-by-turn*, que contém a informação necessária armazenada em BD que permitem, por exemplo, a navegação por morada, pelo caminho mais curto ou mais rápido;
- v) cartografia de aptidão de solos para a produção agrícola;
- vi) análise de perigosidade e vulnerabilidade a riscos naturais e antrópicos;
- vii) modelação tridimensional (3D), entre outros.

Neste contexto os SIG são uma ferramenta poderosa e indispensável para análise de cheias, armazenamento e processamento de dados espaciais e estatísticos, e para a sua representação gráfica. Os SIG representam uma mais-valia preciosa na produção de cartografia de perigosidade, vulnerabilidade e risco, como poderá avaliar-se na secção 2.5.

### **2.1.3. Base de dados**

Visto que o projeto SIG desenvolvido neste trabalho não utiliza um grande volume de informação, não se fará uma abordagem complexa e minuciosa da base de dados, contudo abordaremos e explicaremos de forma sucinta alguns conceitos relacionados com a base de dados utilizada no SIG\_MTEJO.

As bases de dados estão subjacentes a qualquer projeto SIG. Nelas são armazenados os diversos dados e são estabelecidas as diversas relações entre eles. O armazenamento organizado dos dados permite a sua posterior utilização e consulta, de forma simples e eficiente, através de comandos na linguagem informática *Structured Query Language* (SQL). As BD utilizadas podem ser automaticamente criadas e organizadas pelas aplicações SIG, por ordens simples do operador, ou podem ser criadas em programas externos, específicos e mais complexos, de bases de dados (e.g. Oracle<sup>®</sup>, Microsoft SQL Server<sup>®</sup> e PostgreSQL<sup>®</sup>) e posteriormente agregadas ao SIG.

A primeira opção, mais simples, rápida e menos exigente do ponto de vista do conhecimento técnico informático, é geralmente a mais utilizada para pequenos projetos SIG, sendo suficientemente capacitada para o armazenamento, gestão e análise de dados de projetos simples. A segunda opção, mais complexa e capacitada é geralmente utilizada para projetos onde o volume de dados a armazenar é elevado e onde o seu armazenamento, a sua normalização, o relacionamento coerente e não redundante entre diferentes tabelas é imprescindível para que esta possa dar resposta de maneira rápida e eficiente para o efeito para que foi desenhada. Geralmente necessita de alguém especializado que faça a sua gestão e manutenção, sendo comumente utilizada por empresas e outras entidades públicas e privadas que têm a necessidade de armazenar, gerir e analisar grande volume de dados (e.g. administração central do estado, ministérios públicos, bancos, multinacionais, entre outras).

O *software* SIG ArcGis, utilizado neste trabalho apresenta vários formatos de bases de dados, desenvolvidos pela ESRI. Os mais utilizados são o *shapefile* e o *geodatabase*.

O formato *shapefile* é uma BD espacial vetorial simples, não topológico, que permite o armazenamento de dados geométricos (ponto, multiponto, linha, polígono e *multipatch*) georreferenciados (x, y e z) e respetivos atributos, alfanuméricos. Este formato tem capacidade de armazenamento limitada a dados até perfazer dois Gb.

De forma sucinta uma *geodatabase* (ESRI, <http://webhelp.esri.com>) é uma BD relacional estruturada num único ficheiro, que permite o armazenamento, a gestão e a análise de dados. Estes ficheiros guardam a informação geométrica, geográfica, atributos e regras topológicas de comportamento e relacionamento entre os dados espaciais. Dentro de uma *geodatabase* podem ser compilados vários tipos de dados espaciais, onde se incluem dados vetoriais, *raster*, tabelas de atributos, dados relacionais em rede, dados topológicos e muitos outros (Fig. 2.1).

Uma das características fundamentais do formato de dados *geodatabase* é a sua estrutura tabular explícita, constituindo-se como uma forma de armazenamento completa que faz referência às características espaciais, atributos e regras de associação entre os elementos ou características informativas armazenadas.

Uma vez que toda a informação está armazenada numa estrutura tabular é possível desenvolver um conjunto muito vasto de procedimentos de associação, baseados no modelo relacional. Este tipo de aproximação torna possível um conjunto de processos de compatibilização e exploração analítica da informação, bem como a

aplicação de metodologias de classificação e modelação geográfica mais complexas. Outra vantagem efetiva prende-se com o facto de que todo o processo de compatibilização das bases informativas ficar mais simplificado, uma vez que o ambiente de implementação e desenvolvimento passa a estar perfeitamente normalizado e integrado no sistema.

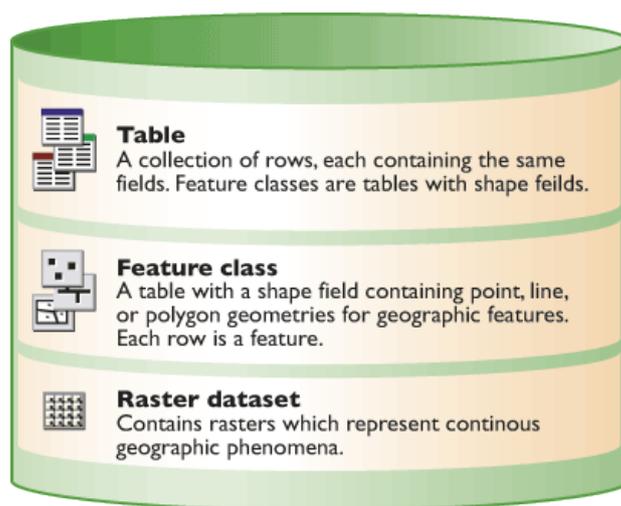


Figura 2.1 Capacidade de armazenamento de uma geodatabase; fonte: (<http://webhelp.esri.com>).

Existem vários tipos de *geodatabases* com diferentes níveis de capacidade e aplicabilidade (ESRI, <http://webhelp.esri.com>):

*File geodatabases* apresentam uma forma de armazenamento como pastas num sistema de arquivos. Cada conjunto de dados é mantido como um arquivo e possui uma capacidade máxima de 1 TB;

*Personal geodatabases* apresentam um sistema onde todos os conjuntos de dados são guardados num ficheiro Microsoft Access que é limitado a uma capacidade máxima de 2 GB;

*Geodatabases empresariais ou externas* (e.g. IBM DB2, IBM Informix, Oracle, Microsoft Access, Microsoft SQL Server e PostgreSQL/PostGis). Constituem um sistema mais complexo e capacitado mas que pode exigir a utilização de *software* dedicado para estabelecer a conexão com o ArcGis. Estas BD apresentam vantagens particulares, como sejam a capacidade ilimitada do volume de armazenamento e de número de utilizadores (ESRI, <http://webhelp.esri.com>).

#### **2.1.4. Modelos numéricos para a simulação de inundações**

Devido ao impacto social, por vezes severo, ou mesmo catastrófico, das cheias (população, infraestruturas e bens socioeconómicos e culturais), foram desenvolvidos vários *software*, por diferentes entidades e com diferentes algoritmos matemáticos, que tentam prever os efeitos das inundações através da simulação da sua extensão, altura, caudal e velocidade da água, entre outros parâmetros, que podem ser esperados durante um determinado período de cheia, numa determinada área (bacia hidrográfica ou troço de rio inundável). Os modelos unidimensionais (1D) são os mais utilizados por serem os mais simples, necessitarem de menos informação na sua calibração, requererem menor capacidade de computação e menos tempo de processamento. De entre os modelos numéricos de previsão hidrológica unidimensional mais utilizados, podem destacar-se, por exemplo, HEC-RAS, MIKE 11 e ISIS, que se baseiam na análise das variações hidrológicas através da equação de St. Venant/Shallow (Pappenberger *et al.*, 2005).

### 2.1.5. HEC-RAS/HEC-GEORAS

O *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*, HEC-RAS, *software* utilizado neste trabalho, foi concebido para a modelação hidráulica e para a simulação de inundações. Este *software* foi desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE), em 1995, na sua primeira versão (1.0), com o intuito de reconhecer o risco e a incerteza na previsão de inundações e respetivos impactos e, ainda, para auxiliar no estudo e na minimização do risco em fenómenos de cheias (USACE, 1996). Tendo em consideração a utilidade e potencialidades do programa, este tem evoluído, encontrando-se atualmente na versão 4.1., utilizada no presente trabalho. As capacidades principais referem-se à predição da extensão, profundidade e velocidade da água que poderão ser atingidas num determinado troço de rio, com base em valores conhecidos de caudal. Este modelo baseia-se na equação de conservação de energia (Eq. 2.1), segundo condições de fluxo unidirecional (1D) para o processamento da simulação hidráulica. Permite a computação de áreas restritas, nomeadamente de um ou vários segmentos de rio, *river reach* (segmento de rio entre duas junções) ou *cross-sections* (conjunto de perfis transversais com informação altimétrica e batimétrica distribuídos ao longo do rio), que representam o canal em termos morfométricos e altimétricos. Na análise da propagação, além da informação geométrica, o modelo necessita ainda dos valores do coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler ( $n$ ) para cada tipo de material constituinte do leito do rio e da área inundável. Estes parâmetros, condicionantes à propagação da água, podem ter de ser calibrados, por forma a minimizar os valores obtidos pelo modelo relativamente à área e cota atingidas pela inundação real (Matgen *et al.*, 2004, Pappenberger *et al.*, 2005, Schumann *et al.*, 2007, Ballesteros *et al.*, 2011).

O HEC-RAS procede à simulação da inundação com base em três componentes: geometria, caudal e/ou nível de água e condições de contorno. Tem capacidade para o cálculo de quatro componentes hidráulicas unidimensionais:

- i) superfície da água em regime permanente;
- ii) simulação em regime não permanente ou variável;
- iii) transporte de sedimentos;
- iv) qualidade da água.

Estas componentes aplicam-se principalmente ao estudo da inserção de represas, barragens e pontes, simulando a área e nível de água a atingir, assim como para o estudo e análise da inundação de planícies aluvionares. Relativamente à componente i), o

HEC-RAS permite o cálculo da altura da água para o rio, troço de rio e afluentes, entre cada perfil transversal e aquele que lhe fica a jusante. A componente ii) permite o cálculo e simulação hidráulica para regimes turbulentos variáveis, para simulação em rios declivosos, meandrizados e de leito acidentado, geralmente em áreas de cabeceira e em vales encaixados. A componente iii) permite quantificar o transporte de sedimentos em episódios repentinos ou continuados, bem como avaliar a alteração de caudais despoletados pela alteração geométrica do leito do rio. A componente iv) permite analisar a temperatura da água e o transporte de determinados poluentes ao longo de um ou vários cursos de água, sendo a sua principal aplicação a análise da qualidade da água, e.g. a jusante de estações de tratamento de águas residuais (ETAR).

O GEO-RAS é uma ferramenta do HEC-RAS e uma extensão do *software* ArcGis da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI). Esta extensão estabelece a ligação entre os programas ArcGis (onde os dados referentes à componente geométrica poderão ser tratados e analisados com as informações topográficas do leito do rio ou canal) e HEC-RAS (para que este, com base na informação topográfica recebida, juntamente com a informação do caudal ou nível da água, possa proceder ao cálculo do modelo de inundação). Essencialmente esta ferramenta procede à conversão de ficheiros de modo a permitir o intercâmbio de dados entre estes programas.

#### 2.1.5.1. Formulação matemática do modelo HEC-RAS

O cálculo básico (1D) da altura da água entre um dado perfil e o perfil que lhe fica imediatamente a jusante, utiliza a equação universal da conservação da energia, que se escreve da seguinte forma (USACE, 2010):

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (\text{Eq. 2.1})$$

onde as variáveis representam, para cada perfil (Fig. 2.2):

$Z_1$  e  $Z_2$  - Altura da água (profundidade; m) em relação ao fundo do canal

$Y_1$  e  $Y_2$  - Cota do fundo (m)

$a_1$  e  $a_2$  - Coeficiente de Coriolis

$V_1$  e  $V_2$  - Velocidade (m/s)

$g$  – Aceleração da gravidade ( $m^2/s$ )

$h_e$  – Perda de carga entre as secções (m)



Figura 2.2. Termos da equação unidimensional da conservação de energia (Eq. 2.1) (USACE, 2010).

O HEC-RAS resolve a equação da conservação de energia com base no denominado *Standard Step Method*. Os dados geométricos de pontes, barragens, estrangulamentos e alargamentos, influentes no leito ou canal, podem ser inseridos no modelo e as perdas de carga localizadas nesses locais poderão ser consideradas e calculadas na equação 2.1.

As perdas de carga são calculadas com base no somatório das perdas, por atrito e por expansão/contração, obtendo-se a perda de carga total ( $h_e$ ) através da resolução da equação 2.2 (USACE, 2010):

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (\text{Eq. 2.2})$$

na qual:

$\bar{S}_f$  - Perda de carga unitária (m/m);

$C$  - Coeficiente de contração/expansão;

$L$  - Comprimento médio do trecho (m), determinado a partir da equação 2.3 (USACE, 2010), que se escreve na forma:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

onde:

$L_{lob}$ ,  $L_{ch}$  e  $L_{rob}$  – Comprimento, entre secções transversais, da margem esquerda, do eixo do canal e da margem direita, respetivamente.

$\bar{Q}_{lob}$ ,  $\bar{Q}_{ch}$  e  $\bar{Q}_{rob}$  - Médias aritméticas dos caudais do troço medidas na margem esquerda, centro do canal e margem direita, respetivamente.

### 2.1.5.1.1 Capacidade de transporte

Para o cálculo da capacidade de transporte, o HEC-RAS divide o escoamento em diferentes áreas, para as quais a velocidade é uniformemente distribuída, em troços que compreendem a margem esquerda, centro do canal e margem direita, respetivamente (Fig. 2.3). Esse cálculo utiliza a equação de Manning-Strickler, representada na equação 2.4 (USACE, 2010), para a qual concorre a determinação da capacidade de transporte ( $K$ ) representada pela equação 2.5 (USACE, 2010).

$$Q = KS_f^{1/2} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

$$K = \frac{1,486}{n} AR^{2/3} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

nas quais:

$K$  – Capacidade de transporte ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$n$  – Coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler, por subdivisão;

$A$  – Área da secção ( $\text{m}^2$ );

$R$  – Raio hidráulico (m);

$Q$  – Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$S$  – Perda de carga unitária (m/m).

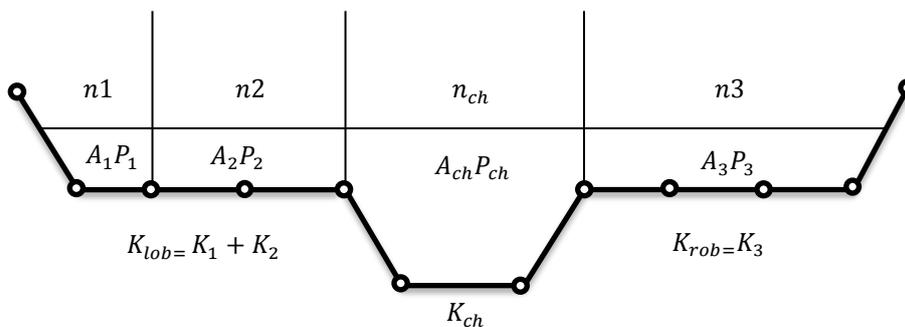


Figura 2.3. Método de subdivisão: a capacidade de transporte resulta do somatório dos valores respetivos, calculados para a margem esquerda, centro do canal e margem direita (USACE, 2010).

### 2.1.5.1.2. Coeficiente de velocidade da água

O coeficiente de velocidade da água ( $a$ ) é calculado com base no transporte verificado em cada um dos três elementos do rio: margem esquerda, centro do canal e margem direita. A equação 2.6 (USACE, 2010) relaciona o transporte com as áreas:

$$a = \frac{(A_t)^2 \left[ \frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right]}{K_t^3} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

onde:

$A_t$  - Área total inundada ( $m^2$ ) por perfil transversal (*cross section*);

$A_{lob}$ ,  $A_{ch}$  e  $A_{rob}$  — Área inundada ( $m^2$ ) por elemento: margem esquerda, centro do canal e margem direita, respetivamente;

$K_t$  - Total transportado ( $m^3/s$ ), por cada secção transversal (*cross section*);

$K_{lob}$ ,  $K_{ch}$  e  $K_{rob}$  - Total transportado ( $m^3/s$ ) por elemento: margem esquerda, canal central e margem direita, respetivamente.

## 2.2. Riscos Naturais

O “risco” beneficiou de uma abordagem científica desde as ações realizadas pela UNESCO em 1987 e 1989 (Rebelo, 2003), onde se trataram os riscos decorrentes das ações empresariais, bem como os riscos naturais e antrópicos. Segundo Faugères (1991) e Rebelo (1999, 2003) as ciências do risco/ciências do perigo designam-se “ciências cindínicas”. A década de 1990 foi proclamada pelas Nações Unidas de Década Internacional para a Redução de Riscos Naturais, tendo sido aplicado, em 1999, o Mandato de Genebra sobre Redução de Catástrofes (Zêzere *et al.*, 2005). Desde então, têm-se desenvolvido e adotado, tanto a nível nacional como internacional, um conjunto de diretrizes de ordenamento e métodos de perceção, avaliação, quantificação, prevenção e mitigação dos riscos de origem natural ou antrópica, existindo atualmente um vasto conjunto de teorias e métodos aplicados na sua análise. Exemplo disso foi, por exemplo, a implementação da diretiva europeia *The Flood Directive of the European Commission* (EU 2007) que exige a produção de cartografia de risco para todas as bacias e sub-bacias hidrográficas que apresentem risco de inundação.

Geógrafos, geólogos, engenheiros e outros investigadores, têm-se dedicado ao estudo do fenómeno de inundação, cuja importância tem aumentado como consequência da aglomeração de população, da infraestruturização de bens e da estruturação de serviços em territórios com índices de perigosidade elevada. Em Portugal, alguns autores, e.g. J. Zêzere, F. Rebelo e C. Ramos, entre outros, têm-se debruçado sobre o estudo dos riscos, nomeadamente os de índole física ou natural, tendo publicados variadíssimos trabalhos desde a década de 1990.

Para que ocorra risco, torna-se essencial a presença humana, cujas vidas, bens económicos, sociais, culturais e estruturais da sociedade se apresentem vulneráveis a um ou mais elementos de perigo, representando-se o produto destes numa probabilidade de risco. Ou seja, para a obtenção do grau de risco torna-se necessário um conhecimento rigoroso das características físicas e humanas do território em estudo. Neste contexto, o risco é obtido pela análise de alguns componentes envolvidos, mais ou menos diversificados e complexos, segundo a interpretação de diferentes autores. Para o efeito, a maioria desses autores considera as componentes Perigosidade, Vulnerabilidade e Risco. Numa convenção internacional organizada pela *United Nations Disaster Relief Co-ordinator* (UNDRO, 1979), definiu-se um modelo conceptual de risco para o qual as componentes acima referidas adotam as definições das secções seguintes.

### **2.2.1. Perigosidade**

A perigosidade natural, traduzido do inglês *hazard*, pode ser definida como a “probabilidade de ocorrência de um fenómeno potencialmente destruidor, num determinado período de tempo, numa dada área” (UNDRO, 1979). Contudo, alguns investigadores como Rebelo (1999), preferem a utilização do termo perigo, na sequência Risco-Perigo-Crise estabelecida em trabalhos patrocinados pela UNESCO em 1987 e 1989 e, particularmente, do trabalho de Faugère (1990) (*in* Cunha & Dimuccio, 2002).

### **2.2.2. Vulnerabilidade**

A Vulnerabilidade é definida pelo grau de perda de um ou vários conjuntos de elementos vulneráveis, resultantes da ocorrência de um fenómeno perigoso com determinada magnitude ou intensidade (UNDRO, 1979).

### **2.2.3. Risco**

Risco é entendido como a probabilidade de ocorrência de um efeito específico causador de danos graves à Humanidade e/ou ao ambiente, num determinado período e em circunstâncias determinadas (UNDRO, 1979). “Exprime a possibilidade de ocorrência e a respetiva quantificação em termos de custos, de consequências gravosas, económicas ou mesmo para a segurança das pessoas, em resultado do desencadeamento de um fenómeno natural ou induzido pela atividade antrópica” (Zêzere, Pereira & Morgado, 2005)

De acordo com Pedrosa (2006), vários autores (Cojean, R. & Gautier, P., 1984; Escourrou, G., 1986; Veyret, Y. & Pech, P., 1993; Rebelo, F., 2003; Stahler, A., 2001) consideram que é possível a obtenção da probabilidade de ocorrência de perdas, humanas ou materiais, num dado território que tenha sido submetido a uma catástrofe, através da análise do risco. Os elementos Vulneráveis ou em Risco dizem respeito à população, propriedades e atividades económicas vulneráveis.

Cartografar os riscos implica: identificar o fenómeno que leva ao risco, determinar a probabilidade de ocorrência, conhecer a área geográfica que eventualmente será afetada e precisar o grau de vulnerabilidade das populações eventualmente afetadas (Pedrosa, 2006).

A avaliação do risco é uma componente importante para a gestão sustentável das cheias e está a ganhar maior atenção com o crescimento da população e as alterações climáticas (Ahmad & Simonovic, 2011).

### 2.3. Cheias e inundações fluviais

As cheias são fenómenos naturais relativamente frequentes, de carácter extremo, temporário e cíclico. São provocadas por precipitações excessivas, que fazem aumentar o caudal dos cursos de água, originando o extravase do leito menor (Zêzere, Pereira & Morgado, 2005) que, conseqüentemente, incita à inundaçãõ do leito maior, ou, de cheia, pela açãõ de espraiamento da água, encontrando-se estas frequentemente associadas à atividade humana, o que promove o fator risco.

“O risco de inundaçãõ é um dos riscos mais comuns na Europa (Craciunescu *et al.*, 2005) e no mundo (...)” (Gharagozlou *et al.*, 2011) e que mais danos económicos, sociais e estruturais provocam (Ahmad & Simonovic, 2011; Alkema, 2007; Yahya *et al.*, 2010). Durante o século XX, as cheias foram o fenómeno mais mortífero em Portugal (Ramos & Reis, 2001; Miranda & Baptista, 2006). Também a Organizaçãõ Mundial de Meteorologia (OMM) tem alertado que os desastres provocados por cheias têm vindo a aumentar devido à expansãõ urbana nas planícies fluviais. A ocupaçãõ agrícola e aglomeraçãõ humana, em polos urbanos extensos, muitos dos quais situados junto de rios e em margens do leito de cheia, o encanamento e estreitamento de linhas de água, a obstruçãõ de troços pelos detritos transportados, o aumento conseqüente da impermeabilizaçãõ dos solos das margens pelo atapetado contínuo de edificado e infraestruturas rodoviárias e de lazer, certamente terão contribuído para o aumento de desastres provocados por inundações.

As cheias podem ser de origem marinha ou fluvial. As cheias fluviais podem dividir-se em dois tipos:

- i) As cheias progressivas (únicas analisadas no presente estudo) são despoletadas por períodos de chuva persistentes, que podem prolongar-se por dias ou semanas, quase sempre relacionadas com circulaçãõ zonal de oeste que varre a Península Ibérica com chuvas frontais provocadas pela passagem sucessiva de depressões subpolares (Zêzere *et al.*, 2007). A chuva prolongada promove a saturaçãõ do solo, levando a que uma volumetria superior de água flua através da rede hidrográfica, pelo aumento da escorrência superficial (Miranda & Baptista, 2006);
- ii) As cheias rápidas devem-se a períodos de chuva curtos, mas de grande intensidade, relacionados fundamentalmente com depressões convectivas (Ferreira, 1985, citado por Ramos & Reis, 2001) compostas por gotas de ar frio,

frequentes em Portugal, que resultam de invasões de ar frio, polar ou ártico, em altitude, sendo o outono a altura do ano mais problemática (Ramos & Reis, 2001).

#### **2.4. As cheias e inundações no rio Tejo**

“As cheias no rio Tejo constituem um tema incontornável da vida do rio, que mexe com a sua história e com as suas gentes. São as cheias que isolam povoações, cortam estradas, que por vezes têm consequências trágicas, mas também as cheias que fertilizam os campos” (Loureiro, 2009a). O rio Tejo é o maior rio da Península Ibérica, com aproximadamente 1010 km de comprimento e uma bacia hidrográfica que apresenta, na parte portuguesa, uma área aproximada de 25 663 km<sup>2</sup> e de 55 944 km<sup>2</sup> na parte espanhola, que perfazem uma vasta extensão total de 81 607 km<sup>2</sup>. Possui um regime fluvial do tipo subtropical, com 3 meses de escoamento elevado (Dezembro a Fevereiro) sendo o seu pico máximo de escoamento atingido em Fevereiro, com 2,5 vezes o caudal médio de 444 m<sup>3</sup>/s (Ramos & Reis, 2001).

De acordo com os registos existentes é notável que o rio Tejo há já muito tempo que comparece com episódios de cheia, provavelmente desde a sua formação, provocando inundações de diferentes intensidades e magnitudes, que têm posto em perigo áreas mais ou menos vastas, sendo perceptível um grau de risco confirmado nas áreas onde a ocupação humana, especialmente nos leitos de cheia, as torna vulneráveis (pelo prejuízo de vidas, bens e fluxos económicos, infraestruturas e estruturas sociais) aos episódios de cheia.

As cheias do rio Tejo podem ser divididas em duas fases associadas a regimes específicos:

- i) a primeira, até 1950, em que o rio tinha um regime natural, não controlado pelo homem. A precipitação da bacia hidrográfica, agrupada desde a cabeceira, exprimia-se a jusante num determinado volume de caudal direto;
- ii) a segunda, relativa a um regime controlado, deveu-se ao *boom* da construção de barragens de aproveitamento hidroelétrico ao longo do rio, primeiramente do lado espanhol e posteriormente do lado português, que permitiu desde então, de algum modo, a regularização do rio. As barragens do rio Tejo, em Portugal e

Espanha, têm hoje uma capacidade de retenção de aproximadamente 95% do escoamento médio anual do rio (Daveau, 1995).

A cheia mais extrema, segundo os registos, foi a de 1876, com regime natural, existindo relatos de que esta terá sido devastadora no baixo Tejo, onde o rio terá transbordado, pondo em risco pessoas, habitações, animais e colheitas agrícolas. “As populações de Vila Franca e Valada, refugiando-se estas últimas (mais de 1500 pessoas) nos pontos altos dada a eminência do perigo. Em Abrantes a cheia atingiu a maior altura desde 1855. No Rossio estão debaixo de água casas, tendo morrido alguns animais” (Loureiro, 2009b).

A 12 de Fevereiro de 1979 deu-se a segunda maior cheia de que há registo (maior do séc. XX), sendo esta a mais utilizada para a modelação do risco de inundação, tanto pela existência de dados de caudal e alturas hidrométricas de algumas estações, imprescindíveis para a análise de risco de inundação, como pelo seu carácter extremo, mesmo com o regime hídrico controlado por barragens. O pico de cheia foi acentuado pela descarga continuada das barragens, nem sempre coordenado entre as autoridades portuguesas e espanholas (Ramos & Reis, 2001), provocando a rutura dos diques de sustentação da água e danificando as captações de água destinada a Lisboa. No concelho de Abrantes, aproximadamente seis mil pessoas ficaram desalojadas, tendo a água atingido uma altura de dez metros dentro da antiga Gare dos Caminhos de Ferro. Ao todo, esta cheia provocou dez mil desalojados, nomeadamente no distrito de Santarém. Linhas de comunicação rodoviária e ferroviária ficaram cortadas em diversos concelhos, em áreas ribeirinhas do Tejo.

Outra cheia do Tejo que importa referir, ainda que seja de carácter repentino e se tenha pronunciado essencialmente na região de Lisboa, deu-se a 25 de Novembro de 1967. Deveu-se a precipitações excepcionais concomitantemente à preia-mar no Tejo. As inundações provocaram cerca de 500 vítimas mortais e muitos danos em edifícios e estradas, estimados em três milhões de dólares a preços da época (Dias, 2006).

Tendo em conta os avultados prejuízos causados pelas cheias do rio Tejo no ano de 1996, foi implementado um Sistema de Vigilância e Alerta de Cheias (SVAC), em ambiente SIG, com base em três estações estratégicas automáticas (Tramagal, Almourol e Omnias). Posteriormente o sistema alterou a sua designação para Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH), com a ligação em tempo real às estações odométricas e barragens, portuguesas e espanholas, mediante a celebração de uma convenção luso-espanhola. Os dados, hidrológicos e meteorológicos, encontram-se

disponíveis na plataforma *online* do “Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH, <http://snirh.inag.pt>), onde também é possível efetuar a análise de caudais em tempo real nas estações atrás referidas e em algumas barragens. Este sistema já foi testado em várias cheias, tendo-se obtido resultados satisfatórios, com tempos de previsão entre 12 e 20 horas de antecedência, que permitiram a minimização do risco de inundação através da atenuação de vulnerabilidades, nomeadamente através da remoção de bens e auxílio a pessoas.

O fenómeno das cheias denota-se na sociedade que habita ou desenvolve as suas atividades à volta do rio, tendo em conta a relação histórica com ele estabelecida e com os períodos de cheia. A população residente em áreas que frequentemente se inundam já construiu apetrechos que permitem minimizar os danos causados pelas inundações. Estas, nomeadamente nas áreas de planície aluvial, são, por ventura, bem-vindas nos campos de cultivo, pela conseqüente fertilização dos solos.

No Médio Tejo as povoações ribeirinhas de Abrantes, Rossio, Tramagal, Praia do Ribatejo, Constância e Vila Nova da Barquinha, sofrem diretamente com o aumento do nível de água do rio, tendo já presenciado avultados danos causados por cenários trágicos de inundação.

## **2.5. A aplicação dos SIG na análise do risco de inundação**

De acordo com a vasta aplicabilidade dos SIG, expressa no ponto 2.1, esta tecnologia demonstra potencialidade na determinação e análise da perigosidade, vulnerabilidade e risco de inundação, através do armazenamento de informação em bases de dados, com potencialidade para análise visual e processamento de cálculos múltiplos, nomeadamente de álgebra linear, sobre os elementos espaciais representados. Neste contexto, pretende-se desenvolver uma metodologia que permita, por um lado, a exploração de um conjunto de ferramentas SIG que possam dar origem a documentos e informações relevantes para o conhecimento e análise do risco de inundação e, por outro lado, atingir conclusões que sirvam de complemento e sejam correlacionáveis com outros dados existentes produzidos por diversas entidades competentes.

Tendo em conta o facto de as inundações provocadas por cheias serem um dos fenómenos de risco mais comum, e de a sua expressão territorial ser alargada, é natural

que a temática do risco de inundação em ambiente SIG já tenha sido abordada por diversos autores, sob diferentes metodologias, aplicadas a diferentes locais.

O *software* HEC-RAS e a extensão HEC-GEORAS, como interface de ligação com o *software* ArcGis, permitem, depois de estruturada a componente geométrica, a simulação de manchas de inundação e o cálculo da profundidade da água, de forma rápida e eficiente. A aptidão destas tecnologias para a análise hidrológica e predição de inundações é, sem dúvida, uma mais-valia para a resposta e mitigação dos riscos de inundação, nomeadamente através de medidas de gestão e ordenamento, como poderá verificar-se adiante, pela apresentação de vários trabalhos que exploram as mesmas problemáticas que aqui se analisam, em ambiente SIG.

## **2.6. Estudos de casos semelhantes**

Com base na Imprensa Periódica, através de relatos por vezes muito pormenorizados, Loureiro (2009b), no seu trabalho intitulado “Rio Tejo – As Grandes Cheias” (1800 a 2007), considerou como grandes cheias do Tejo ( $>10\,000\text{m}^3/\text{s}$ ) as correspondentes aos anos de 1823, 1855, 1876, 1895, 1912, 1949, 1947 (com regime natural), 1978, 1979 e 1989 (com regime controlado).

As cheias do rio Tejo já foram estudadas por vários investigadores e entidades competentes. A concessão de jurisdição da Bacia do Tejo já pertenceu a diversas entidades. A Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo (CCDR LVT) desenvolveu e publicou alguns trabalhos, e.g. Caracterização de caudais do rio Tejo (para diferentes anos hidrológicos), Plano Regional de Ordenamento do Território do Oeste e Vale do Tejo (Zêzere *et al.*, 2008), entre outros. O Instituto Nacional da Água (INAG) também tem colaborado no desenvolvimento de trabalhos como “Plano Nacional da Água” e “Planos de Bacia Hidrográfica (PBH)”, onde são abordados um vasto conjunto de fatores referentes ao rio, nomeadamente diretrizes e parâmetros de preservação e ordenamento. Atualmente são as Administrações de Regiões Hidrográficas (ARH), que tutelam as diferentes bacias hidrográficas portuguesas. No caso do rio Tejo, este encontra-se sob tutela da ARH TEJO, que desenvolve os estudos, executa os planos e projetos de ordenamento, promovendo a preservação da qualidade da água. Os últimos trabalhos, nomeadamente o PBH do rio

Tejo, onde constam os elementos e dados físicos (i.e. dados hidrológicos, hidráulicos, geomorfológicos, litológicos, meteorológicos, altimétricos e de declive, entre outros) e humanos (i.e. dados de população, captações, estações de tratamento de água e poluição de origem antrópica, entre outros) da BH do Tejo. A Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), Bombeiros e Governo Civil de Santarém, também têm dado o seu préstimo. Para além da gestão, alerta e socorro dos riscos, têm estudado e desenvolvido trabalhos no âmbito da vulnerabilidade e risco de cheia no Tejo. A ANPC publicou, em Setembro de 2009, um documento relevante, intitulado Guia Metodológico para a Produção de Cartografia Municipal de Risco e para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica de Base Municipal (Julião *et al.*, 2009), com o objetivo de dar indicações para a análise e produção de cartografia do risco, por parte dos municípios, de forma a desenvolver-se cartografia de riscos, segundo uma metodologia e escala uniformes, para todo o território português. O facto da uniformização da cartografia de risco em todo o território nacional é, com certeza, uma mais-valia muito positiva para o conhecimento e gestão dos riscos, mediante a posterior implementação de métodos de mitigação e reordenamento do território. Para que fosse possível a conceção da mesma por parte das autarquias, foi adotada uma metodologia relativamente simples, tendo em consideração os dados e a capacidade técnica disponíveis para a elaboração da análise do risco.

Vários investigadores universitários têm desenvolvido diversos estudos acerca do rio Tejo e dos fenómenos de cheia e consequentes inundações que nele ocorrem.

Daveau (1995) na sua obra “Portugal Geográfico”, abordou o rio Tejo tendo desenvolvido uma ótima caracterização hidrológica, analisando o seu regime antes e depois da construção das barragens. Pela grandeza que as cheias do Tejo representam, esta autora não pôde deixar de estudá-las, retratando-as neste e noutros trabalhos seus.

Ramos & Reis (2001) publicaram um estudo intitulado “As cheias no Sul de Portugal em diferentes tipos de bacias hidrográficas”. Neste artigo foram caracterizados os tipos de cheia e as condições meteorológicas existentes. Como exemplo de cheias em grandes bacias hidrográficas, utilizaram a bacia hidrográfica do Tejo, onde também procederam à análise das causas, antes e depois da construção das barragens.

Medeiros (2005) desenvolveu um estudo, publicado na revista *Territorium*, intitulado “Cheias e inundações do rio Tejo em Abrantes”. Na sua análise considerou como fatores principais as características geomorfológicas, climáticas e antrópicas de

Abrantes, tendo dado maior atenção à grande cheia de 1979 por ser a maior do século XX.

Azevêdo *et al.* (2004), estudaram e publicaram um trabalho intitulado *Some Morphological Aspects and Hydrological Characterization of the Tagus Floods in the Santarém Region, Portugal*, por existirem poucos trabalhos portugueses que abordassem o rio Tejo nessa área concreta. Analisaram documentos históricos, cartografia e dados hidrológicos (alturas hidrométricas), tendo podido constatar que a intervenção antrópica tem despoletado mudanças morfológicas, nomeadamente a alteração do curso do rio. Foram calculados períodos de retorno para as maiores cheias segundo o método de distribuição Pearson III, e foi ainda apresentada uma escala de risco para a região de estudo, com base em dados hidrológicos do intervalo de anos 1855-1998.

Carvalho & Aranha (2002), na sequência de um trabalho desenvolvido para uma dissertação de mestrado em SIG, publicaram um artigo onde desenvolveram uma metodologia SIG para a análise das cheias na Lezíria do Tejo, nomeadamente para a área geográfica do Vale de Santarém. Esse trabalho permitiu fazer uma análise pormenorizada do espriamento da inundação na Lezíria do Tejo, através de uma simulação, metro a metro, da subida do nível da água. Através da metodologia desenvolvida foi possível perceber, concomitantemente com a subida da água, quais os troços das rodovias que primeiramente ficariam inundados, quais as primeiras povoações a ficar isoladas, quais os serviços que seriam afetados, bem como estipular a localização das equipas de socorro no terreno, por forma a socorrer com a maior brevidade possível as primeiras povoações afetadas.

Investigadores portugueses (Zêzere *et al.*, 2005, 2007, 2009; Rebelo, 1999, 2003; Ramos & Reis, 2001; Ramos & Zêzere, 2001; Ramos *et al.*, 2010) têm incidido no estudo dos riscos naturais e antrópicos, tendo publicados vários trabalhos, nos quais são abordados os riscos de inundação decorrentes das cheias, para diferentes áreas do território nacional.

A nível internacional têm sido desenvolvidos variados trabalhos de predição do risco de inundação com base em modelação SIG e modelação hidráulica, em áreas geográficas distintas e.g.:

Kellens *et al.* (2008) desenvolveram um trabalho denominado *A GIS tool for flood risk analysis in Flanders (Belgium)*, onde, por proposta do governo, desenvolveram uma nova abordagem metodológica do risco através de sistemas de

informação geográfica, tendo sido adotada uma nova ferramenta, LATIS, que oferece a possibilidade de análise do risco, de forma rápida e eficaz, com base no número ou valor dos danos materiais e perda de vidas. Apresenta-se neste trabalho as metodologias atualmente utilizadas para a gestão do risco de inundação, na região de Flandres, mediante a utilização do sistema LATIS, através de uma sequência de cálculos de risco de inundação.

Gharagozlou *et al.* (2011), publicaram o estudo *Spatial Analysis for Flood Control by Using Environmental Modeling* onde desenvolveram uma metodologia inovadora de análise do risco, baseada em cálculos de álgebra linear, em ambiente SIG, com o intuito de prever as áreas afetadas por inundações com base em fatores físicos (e.g. declives, orientações, precipitação, falhas, escarpas, distância ao meio urbano, rural ou rodovias) e humanos (e.g. densidade populacional). Este trabalho teve como principal objetivo contribuir metodologicamente para a gestão e mitigação do risco de inundação em Golestan, no Norte do Irão.

Yahya *et al.* (2010), desenvolveram e publicaram um estudo, intitulado *Flood Hazard Mapping by Integrated GIS SCS Model*, cujo objetivo principal consistiu na adaptação de um modelo SIG, designado SCS, que se mostrasse relevante para a análise da perigosidade da cheia nas bacias hidrográficas *Rivière du Poste* e *Rivière des Anguilles*, nas ilhas Maurícias. Desenvolveram, em interface SIG– HEC1 e com base num MDT, um modelo de predição de áreas inundáveis. Posteriormente previram a probabilidade de inundação, com base no cálculo de um hidrograma unitário, segundo o método SCS.

Ahmad & Simonovic (2011), num trabalho publicado no *Journal Of Flood Risk Management* intitulado *A three-dimensional fuzzy methodology for flood risk analysis*, conceberam uma nova metodologia de análise que inclui a variação do risco de inundação no espaço e no tempo. Aplicaram esta metodologia às inundações do *Red River*, em Manitoba, Canadá. Esta metodologia (El-Baroudy & Simonovic, 2004) utiliza três índices difusos para a análise do desempenho do risco de inundação:

- (i) um índice combinado vulnerabilidade-confiabilidade;
- (ii) um índice de robustez;
- (iii) um índice de resiliência.

O modelo hidrodinâmico 2D foi desenvolvido no *software* MIKE 21, utilizando imagens de satélite RADSAT para a verificação das manchas de inundação.

### **3. MÉDIO TEJO**

#### **3.1. Localização da área em estudo**

O Médio Tejo localiza-se no centro de Portugal continental, correspondendo a uma área geográfica delimitada na Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUT) de nível III. Abrange um conjunto de onze concelhos (Abrantes, Alcanena, Constância, Entroncamento, Ferreira do Zêzere, Mação, Ourém, Sardoal, Tomar, Torres Novas e Vila Nova da Barquinha) pertencentes ao distrito de Santarém, como se pode observar na figura 3.1. O seu limite faz fronteira com diferenciadas regiões NUT III: a norte com o Pinhal Interior Norte, a nordeste com o Pinhal Interior Sul e Beira Interior Sul, a sudeste com o Alto Alentejo, a sudoeste com a Lezíria do Tejo e a noroeste com o Pinhal Litoral.

Relativamente à Carta Militar de Portugal (CMP), Série M888 do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE), utilizada como base para a análise e representação cartográfica deste trabalho, o Médio Tejo abrange trinta e uma folhas, a que correspondem os números 286 a 288, 298 a 302, 308 a 313, 318 a 323, 328 a 333, 341, 343, 344, 355 e 356, como se pode observar na figura 3.2.

No que concerne à orografia e à hipsometria (Fig.3.3), o Médio Tejo pode ser dividido, grosso modo, em três áreas distintas. A sul, abrangendo os concelhos de Torres Novas, Tomar, Vila Nova da Barquinha, Constância e Abrantes, é composto por áreas aplanadas, ou depressionárias, correspondentes à bacia aluvionar do rio Tejo e aos seus vales tributários, com altitudes baixas que variam entre 19 m, no leito de estiagem do Tejo, e 50 m, nos taludes adjacentes ao rio. A oeste, abrangendo os concelhos de Ourém e parte dos concelhos de Alcanena e de Torres Novas, é composto pela Serra de Aire, com predomínio de altitudes entre 250 m e 500 m, atingindo no seu cume 678 m. A norte e nordeste, abrangendo especialmente os concelhos de Mação e Ferreira do Zêzere, as altitudes predominantes também se encontram entre 250 m e 500 m, atingindo-se 643 m no vértice geodésico “Bando dos Santos”, na povoação de Santos, no concelho de Mação.

A análise do risco de inundação irá incidir principalmente sobre as povoações ribeirinhas de Vila Nova da Barquinha, Tancos, Constância e Abrantes/Rossio (Fig. 3.4.), por serem os locais onde o perigo de inundação progressiva se tem evidenciado

mais comumente, devido à proximidade ao rio e à ocupação humana frequente do seu leito de cheia.

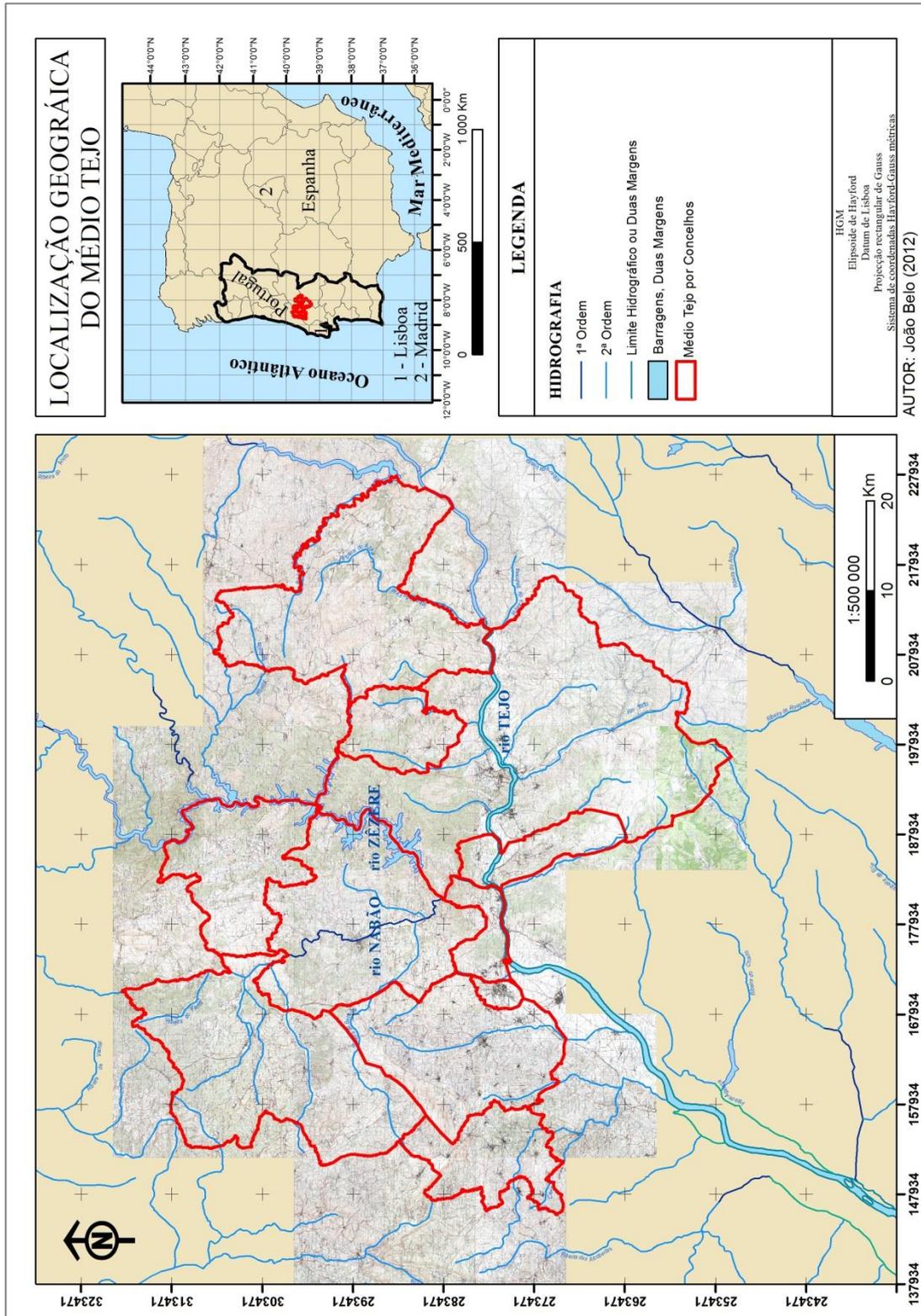


Figura 3.1. Localização Geográfica do Médio Tejo (Carta Militar de Portugal, Série M888, Instituto Geográfico do Exército).

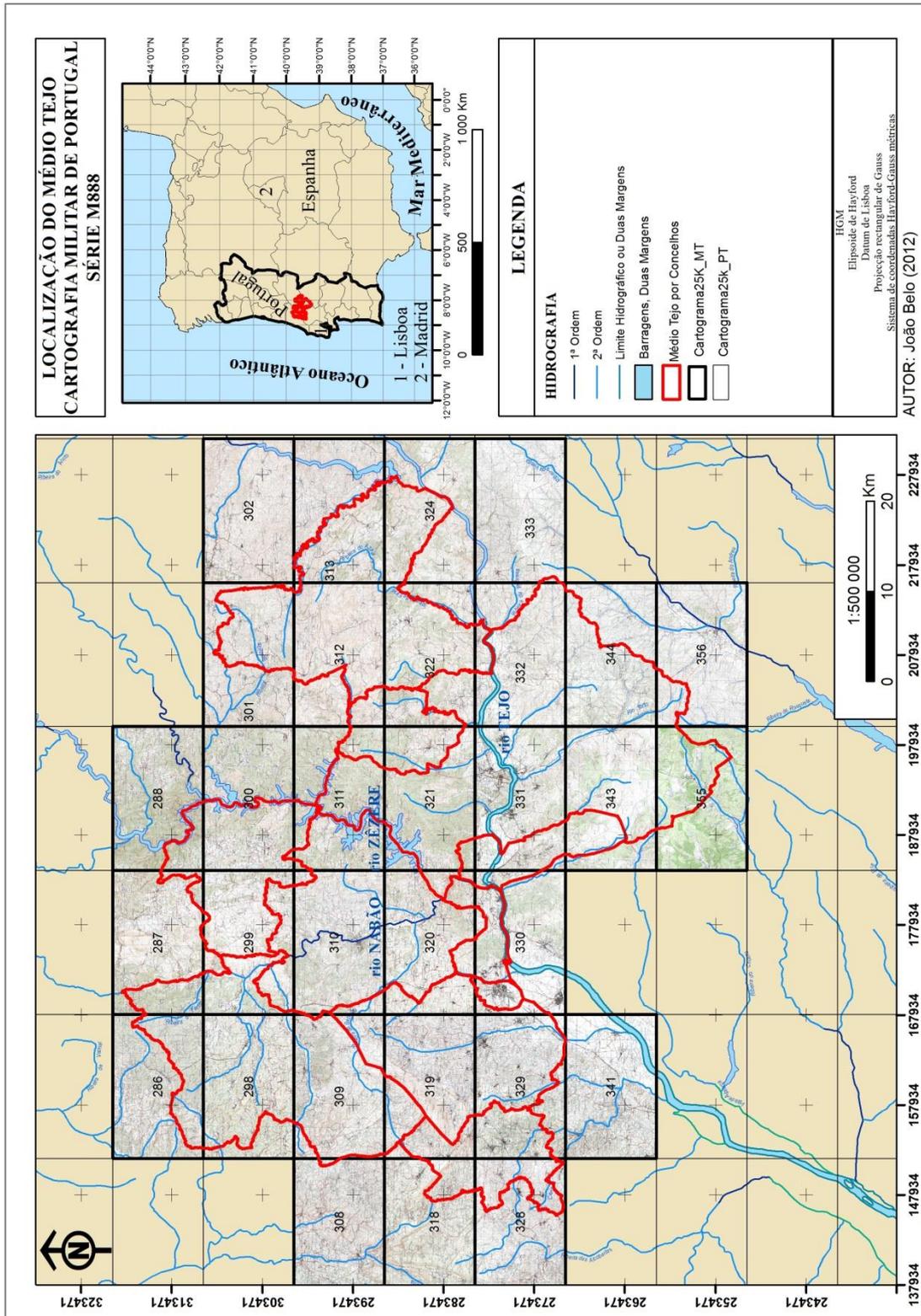


Figura 3.2. Localização do Médio Tejo sobre a Carta Militar de Portugal (Série M888, Instituto Geográfico do Exército).

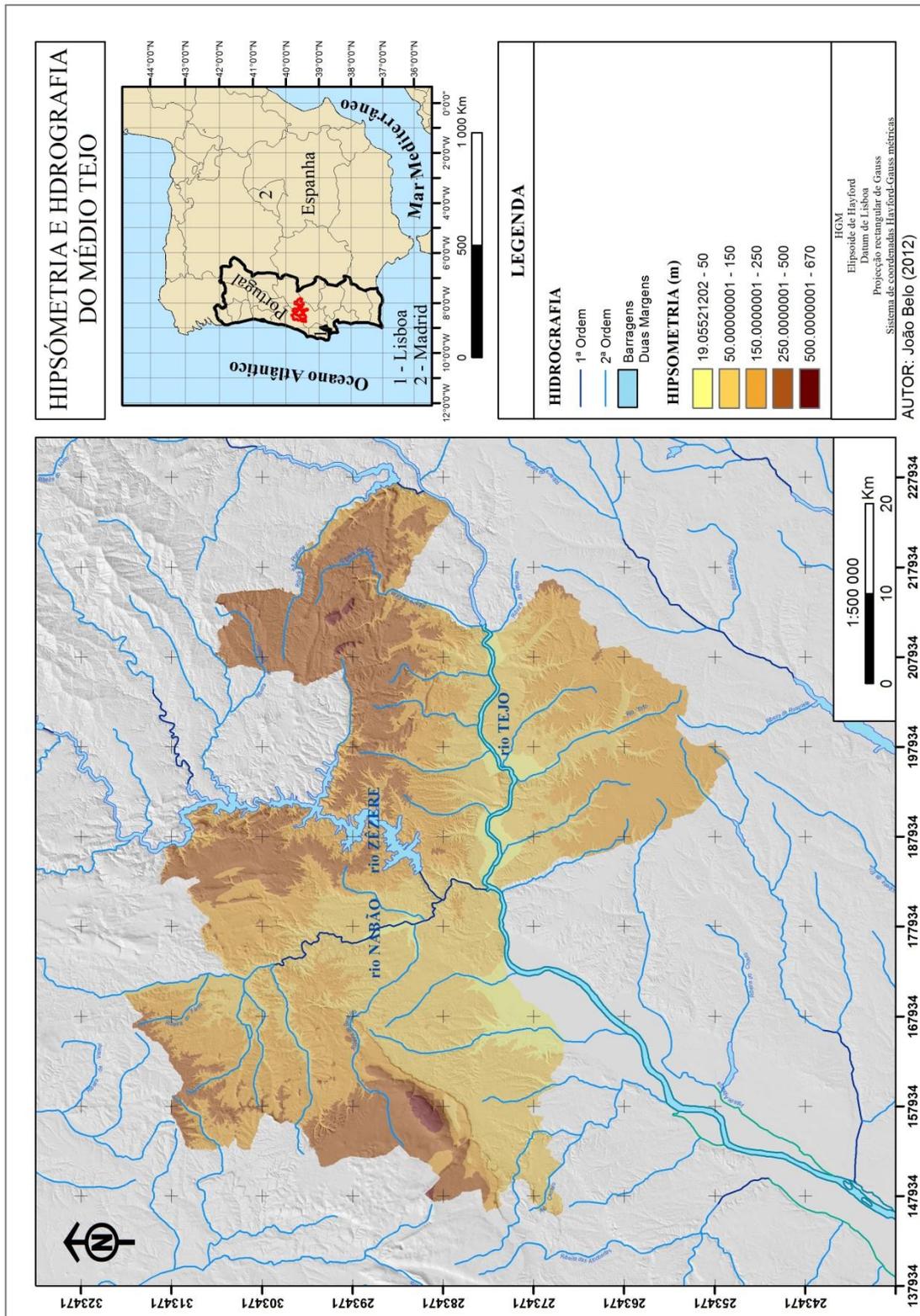


Figura 3.3. Hipsometria e Hidrografia do Médio Tejo (Carta Militar de Portugal, Série M888, Instituto Geográfico do Exército).

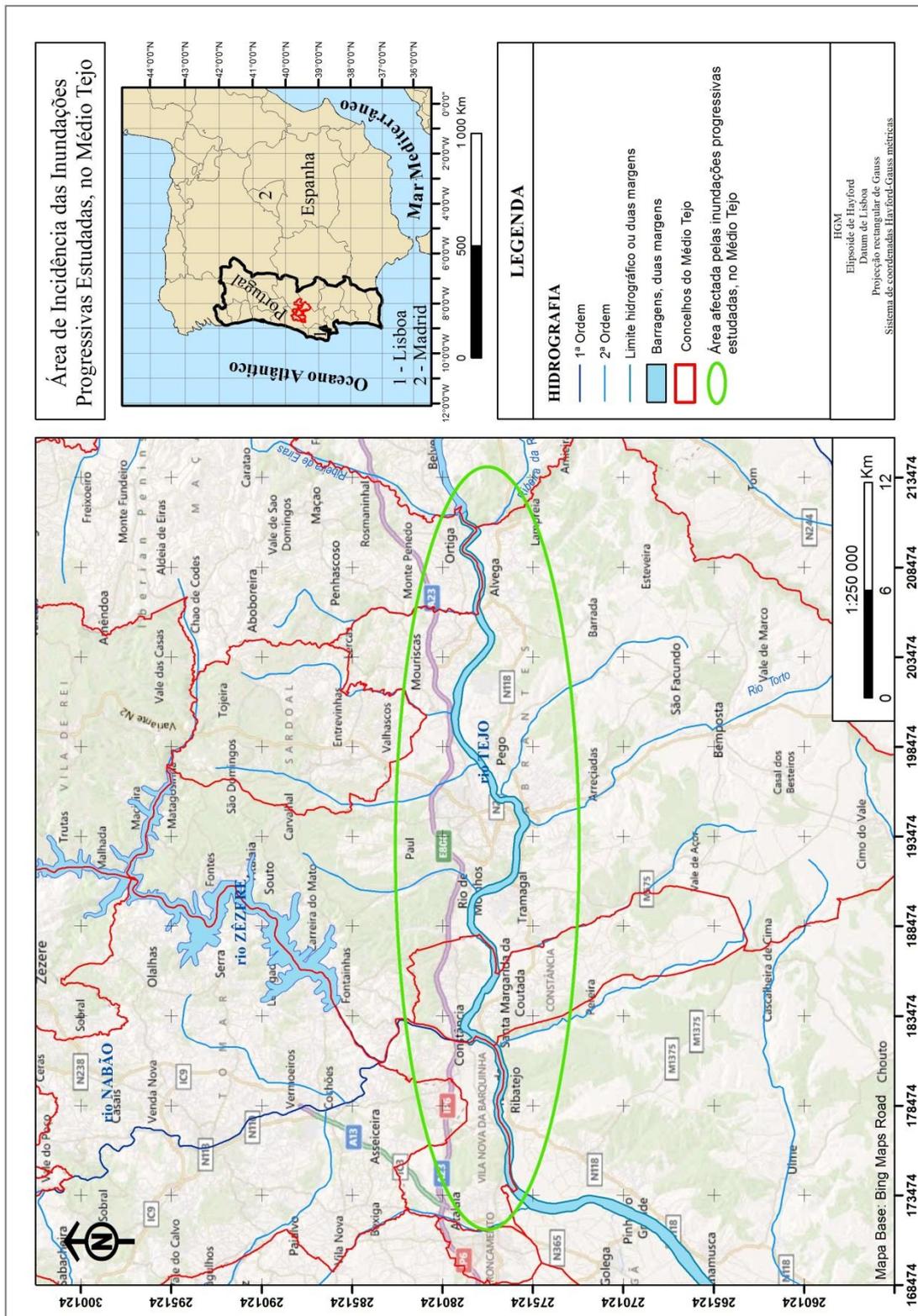


Figura 3.4. Área afetada por inundações progressivas no Médio Tejo (mapa base Bing Maps Road).

## **3.2. Clima**

O Médio Tejo possui um clima mediterrânico caracterizado por duas estações rigorosas e duas temperadas. As primeiras correspondem ao inverno (frio e húmido) e ao verão (quente e seco). As segundas correspondem ao outono e primavera, que fazem a transição entre as estações anteriores. Segundo DAVEAU (1995), o clima mediterrânico caracteriza-se pela presença de “verões sem chuva, solarengos e quentes, e uma estação fresca durante a qual se sucedem desordenadamente os dias de chuva e as abertas (...) sendo o único tipo climático em que o pino do calor e a maior secura coincidem no tempo”.

Quando analisado a uma escala regional, podem denotar-se algumas dissimetrias, proporcionadas por características físicas, nomeadamente a diferenciação altimétrica existente entre as áreas a norte e oeste, mais elevadas (com temperaturas mais baixas e pluviosidade mais frequente) e as áreas a leste e sul, mais baixas, correspondentes à bacia aluvionar do Tejo, (com temperaturas mais elevadas e precipitação menos regular) e a distância ao mar, que se traduz num incremento progressivo da secura pela ação da continentalidade.

### **3.2.1. Pluviosidade**

À escala do Médio Tejo, os elementos físicos que, aparentemente, mais influenciam a precipitação são a orografia e o abrigo à brisa marítima. Quando se analisa a figura 3.5, que representa a precipitação média anual (mm) para o período entre 1931 e 1960 (adaptado de Atlas do Ambiente Digital), verifica-se claramente que existe uma relação direta entre a orografia e a precipitação, encontrando-se os valores mais elevados a norte, correspondendo aos concelhos de Mação e Ferreira do Zêzere, e a oeste, correspondendo aos concelhos de Alcanena e Ourém. Este facto deve-se às maiores altitudes e à orografia acentuada correspondente, no primeiro quadrante, às cristas quartzíticas de Mação e serranias de Ferreira do Zêzere, e, no segundo quadrante, ao Maciço Calcário Estremenho, mais concretamente à Serra de Aire. Em ambos os casos, os valores máximos atingidos correspondem a 1600 mm anuais.

No quadrante sul e octante sudoeste as precipitações são menos abundantes, por vezes escassas (podendo oscilar, nas áreas mais secas, entre 600 mm e 700 mm anuais), correspondentes às altitudes reduzidas da bacia aluvionar do Tejo sob efeito da barreira formada pelo Maciço Calcário Estremenho que impede a chegada de ar húmido da brisa marítima.

Relativamente ao número de dias com chuva, representado na figura 3.6 (média anual do número de dias com precipitação igual ou superior a 1 mm, para o período 1931 a 1960; adaptado de Atlas do Ambiente Digital), genericamente tendem a aumentar de sudeste para noroeste, podendo identificar-se três áreas distintas: a primeira, a leste, correspondente aos concelhos de Mação e Abrantes, com 50 a 75 dias; a segunda, que abrange toda a área central, mais especificamente a totalidade dos concelhos de Sardoal, Constância, Vila Nova da Barquinha, Entroncamento e parte dos restantes concelhos do Médio Tejo, apresenta 75 a 100 dias; a terceira, a oeste, correspondendo à quase totalidade do concelho de Ourém e a parte dos concelhos de Torres Novas, Tomar e Ferreira do Zêzere, apresenta mais de 100 dias. Os meses com maior valor médio de precipitação total correspondem a dezembro e janeiro e os meses com o máximo diário de precipitação correspondem a abril e setembro.

### **3.2.2. Temperatura**

A análise do mapa das temperaturas médias diárias do ar (Fig. 3.7; adaptado de Atlas do Ambiente Digital) sugere a influência da altimetria e do abrigo à brisa marítima, nomeadamente pela coincidência de temperaturas mais reduzidas nas áreas de relevo mais acidentado e elevado, a norte e oeste, em oposição às temperaturas mais elevadas registadas nas áreas depressionárias menos elevadas da bacia aluvionar do Tejo, caracterizando-se genericamente por aumentarem de norte para sul e de leste para oeste. A área mais fria, a norte, (com temperaturas entre 7,5°C e 10°C) abrange uma pequena área do concelho de Ourém, seguindo-se, com uma temperatura média de 10°C a 12,5°C, uma área que abrange os concelhos de Ourém, Ferreira do Zêzere, Sardoal e Mação. Os restantes concelhos, a sul, apresentam uma temperatura média diária entre 16°C e 17,5°C. As temperaturas médias mais reduzidas correspondem aos meses de dezembro e janeiro e as mais elevadas aos meses de julho e agosto.

### 3.3. Hidrografia

O Tejo português, e correspondente *Tajo* espanhol, é um rio exorreico (maior rio da Península Ibérica, com cerca de 1010 km de extensão). Nasce em Espanha, na Serra de Albarracim, a 1593 m de altitude, seguindo desde aí uma direção geral segundo ENE-WSW a caminho do Oceano Atlântico, onde desemboca, em Lisboa. A sua foz é a maior da Península Ibérica, formando um ambiente estuarino de extrema importância social e ecológica, denominada “Mar da Palha”, de onde partiram as naus Portuguesas para as expedições intercontinentais, nos descobrimentos. A sua Bacia Hidrográfica (Fig.3.8), apresenta uma área de 25 663 km<sup>2</sup>, na parte portuguesa, e 55 944 km<sup>2</sup>, na parte espanhola, que perfazem uma vasta extensão total de 81 607 km<sup>2</sup>.

No rio Tejo, em Portugal e Espanha, tributam um conjunto de rios que contribuem para o seu regime hidrológico com maior ou menor importância, destacando-se os seguintes: Alagón, Algodor, Almonda, Alviela, Coína, Erges, Guadarrama, Guadiela, Jamor, Jarama, Ocreza, Pônsul, Sever, Sorraia, Tiéter e Trancão.

O seu regime, atual e desde meados do séc. XX, encontra-se regularizado pelas barragens construídas no Tejo e em alguns dos seus afluentes, a partir das quais se procede à captação de água potável, regadio agrícola e florestal, transvase de água (para a bacia hidrográfica do rio Segura, Espanha), produção hidroelétrica e arrefecimento de centrais nucleares e termoelétricas, entre outros. No troço espanhol existe uma sucessão de barragens (Azután, Valdecañas, Torrejón-Tajo, Alcántara e Cedillo) que monitorizam o caudal do Tejo e exploram os seus recursos. A maior e mais importante barragem das referidas é a de Alcántara, com uma capacidade máxima de armazenamento de 3160 hm<sup>3</sup>, localizada próximo da fronteira com Portugal. No troço português do Tejo, e afluentes principais, também existe uma sucessão de barragens concebidas para as mesmas finalidades. De montante para jusante podemos encontrar as barragens de Fratel, Belver e Castelo de Bode, sendo esta última a que detém maior capacidade máxima de retenção de água (1 095 hm<sup>3</sup>), localizada no rio Zêzere.

Nas povoações ribeirinhas em estudo, o rio Tejo é o que mais contribui para a inundação dos baixios. De entre os seus tributários mais importantes destacam-se o rio Zêzere e o seu afluente Nabão (Fig. 3.3), cuja foz se localiza um pouco a montante da confluência do Zêzere com o Tejo. Mais a jusante, com menor influência nas inundações que se repercutem no Médio Tejo, tributam, na margem direita, os rios Almonda e Alviela, nascidos no Maciço Calcário Estremenho. Mesmo com a

regularização dos caudais do Tejo e seus afluentes, em anos hidrológicos propícios, em especial nas áreas montanhosas da cordilheira central Ibérica, com valores de precipitação elevados e prolongados por períodos consideráveis, a par com alguma descoordenação no controle bilateral dos caudais das barragens, são por vezes potenciados fenómenos de cheia que provocam inundações que atingem níveis de perigosidade elevados, que potenciam o risco nas áreas de maior vulnerabilidade.

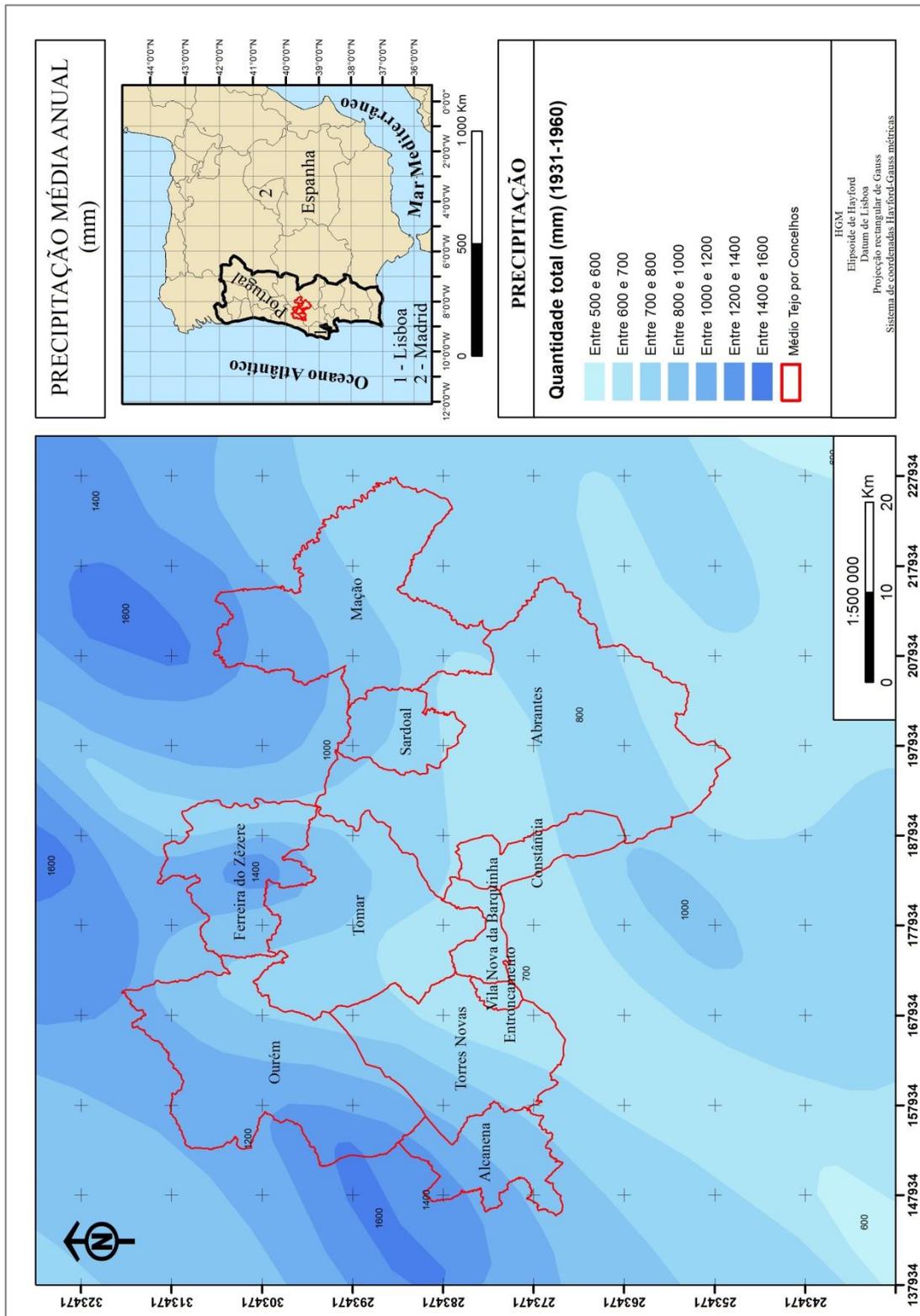


Figura 3.5. Precipitação média anual (mm), período 1931-1960 (adaptado de Atlas do Ambiente Digital).

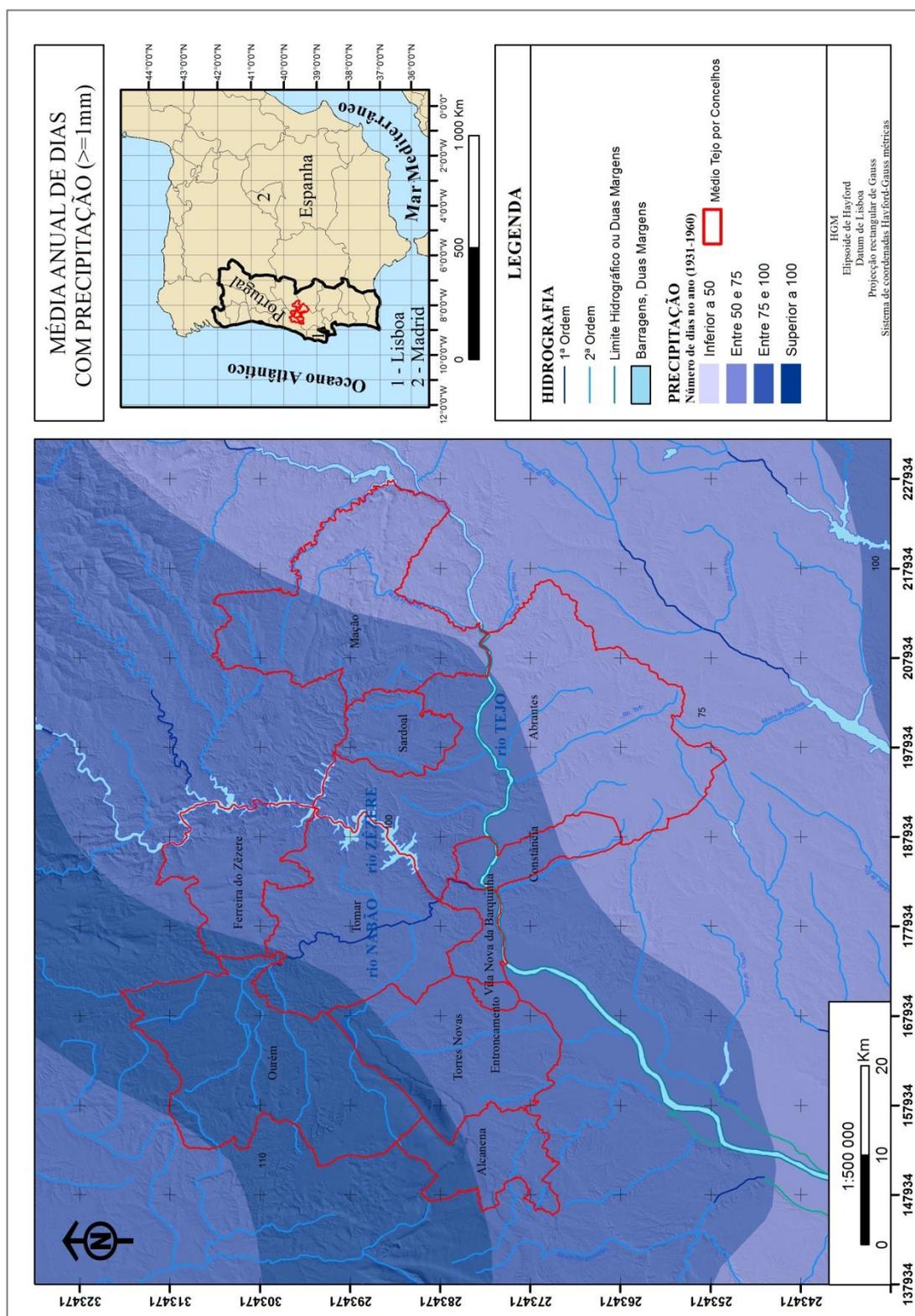


Figura 3.6. Média anual do número de dias com precipitação (igual ou superior a 1 mm), período 1931-1960 (adaptado de Atlas do Ambiente Digital).

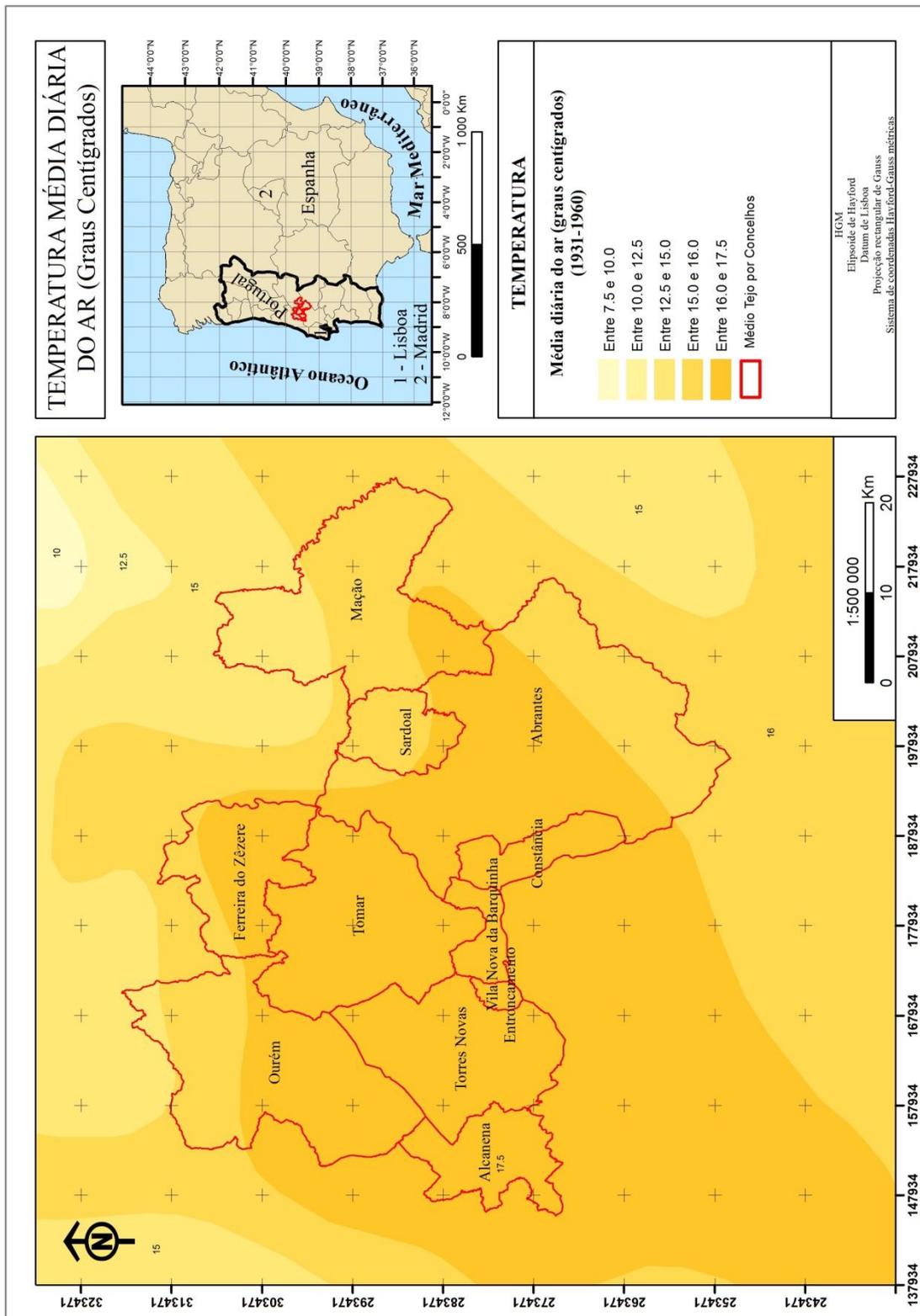


Figura 3.7. Temperatura média diária do ar (°C), período 1931-1960 (adaptado de Atlas do Ambiente Digital).

### 3.4. Geologia

O Médio Tejo apresenta uma enorme diversidade e riqueza de recursos em termos morfoestruturais, hidrogeológicos e geológicos, quando analisado a escalas de diferentes pormenores. No que concerne à morfoestrutura e hidrogeologia (Fig.3.9; adaptado de Atlas do Ambiente Digital) inclui três grandes unidades relacionadas com diferentes fenómenos, em diferentes períodos geológicos, que se caracterizam por diferentes tipos de rochas que servem de base aos diferentes ambientes naturais, ecológicos e hidrogeológicos. O facto de a fronteira entre as diferentes unidades morfoestruturais ser feita dentro da região do Médio Tejo, diversificou e enriqueceu os ambientes atualmente existentes. A oeste e noroeste, abrangendo a totalidade do concelho de Ourém e parte dos concelhos de Alcanena, Ferreira do Zêzere, Tomar e Torres Novas, predomina a Orla Ocidental, mesozóica, sucintamente composta pelo substrato sedimentar cársico do Maciço Calcário Estremenho. Ainda que a paisagem cársica se caracterize por uma elevada secura edafoclimática, esta detém uma enorme importância no que concerne ao armazenamento de água no subsolo e na recarga de aquíferos, pela predominância de pequenas diáclases, falhas tectónicas extensas e pela formação de grutas mediante a dissolução dos calcários. A norte e nordeste, abrangendo os concelhos de Mação e Sardoal e parte dos concelhos de Abrantes, Ferreira do Zêzere e Tomar, predomina a meseta sul do Maciço Hespérico ou Antigo, essencialmente constituída por formações paleozóicas e pré-câmbricas onde predominam os granitóides, xistos, grauvaques e quartzitos. A sul, intersetando os concelhos de Alcanena, Torres Novas, Tomar, Entroncamento, Vila Nova da Barquinha, Constância e Abrantes, encontra-se a Bacia Sedimentar do Tejo e Sado que corresponde a uma área deprimida, em subsidência, formada no cenozóico e mesozóico por movimentos orogénicos alpinos, cujo regime tem vindo a ser invertido mediante a colmatação por materiais erodidos, provenientes do Maciço Antigo.

A sua diversidade geológica não é menos relevante que a sua complexidade morfoestrutural, como se pode analisar na figura 3.10 (adaptado de Atlas do Ambiente Digital). Assim, na Orla Ocidental (Maciço Calcário Estremenho) predominam os arenitos paleogénicos, conglomerados, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos e margas com formações distintas, paleogénicas, jurássicas e jurássico-triássicas. Com menor representação e maior dispersão no espaço, também se pode

encontrar grés vermelhos (Grés de Silves), correspondentes a afloramentos do jurássico e do triássico.

No Maciço Hespérico a litologia dominante do complexo metamórfico é essencialmente composta de metavulcanitos e rochas carbonatadas do carbónico marinho ao precâmbrico, quartzitos com datações entre o devónico e o ordovícico, xistos, grauvaques, quartzitos e corneanas câmblicas, xistos e grauvaques do silúrico e ordovício e xistos, anfibolitos, micaxistos, quartzitos e gneisses do pré-câmbrico. Nesta unidade afloram, ainda, algumas rochas eruptivas plutónicas, nomeadamente granitoides, quartzodioritos, dioritos e gabros.

Na Bacia Sedimentar do Tejo e Sado, nas áreas de menor altitude próximas da rede hidrográfica, predominam, por uma extensão considerável, os depósitos aluvionares holocénicos. À medida que nos afastamos da rede hidrográfica atual, encontram-se areias e cascalheiras pliocénicas, areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados e argilas plioplíocénicas, e arenitos mais ou menos margosos, areias, cascalheiras e argilas mioplíocénicas. A leste, na fronteira da Bacia Sedimentar do Tejo e Sado com o Maciço Hespérico, podem encontrar-se algumas cascalheiras de planalto, arcoses da Beira-Baixa e arenitos datados do paleogénico-miocénico.

O conhecimento do substrato geológico do Médio Tejo, e mais concretamente do que é submerso pelas inundações do Tejo, revela-se importante para a avaliação das inundações, considerando que a maior ou menor permeabilidade destes materiais se repercute no nível de escorrência e nos diferentes valores do coeficiente de rugosidade de Manning.

### **3.5. Demografia**

No que concerne à população residente, o Médio Tejo apresentava, 231 479 habitantes em 1991, 234 532 habitantes em 2001 e contava com 233 998 residentes em 2011, ligeiramente inferior à das NUTS III que a sucedem a noroeste e oeste e significativamente superior às que a sucedem a sudeste e leste. Verificou-se um ligeiro aumento da população entre os anos de 1991 e 2001, que regrediu na década seguinte, ainda que de forma pouco significativa.

Da análise da figura 3.1 (adaptado de INE, 2011) pode verificar-se que os concelhos com mais habitantes presentes são Ourém (44 186), Tomar (39 446), Abrantes (37 754) e Torres Novas (35 111), contrariamente aos quantitativos reduzidos dos concelhos de Sardoal (3 733) e Constância (4 010).

Para permitir uma perceção mais adequada da concentração da população no espaço geográfico, calculou-se a densidade populacional, que relaciona a população total de cada concelho com a área respetiva (habitantes/km<sup>2</sup>).

A figura 3.12 (adaptado de INE, 2011) revela que os maiores valores de densidade populacional dizem respeito aos concelhos de Entroncamento (1 402 habitantes/km<sup>2</sup>), Vila Nova da Barquinha (143 habitantes/km<sup>2</sup>) e Torres Novas (130 habitantes/km<sup>2</sup>). Contrariamente, as menores densidades populacionais encontram-se nos concelhos de Mação (17 habitantes/km<sup>2</sup>) e Ferreira do Zêzere (40 habitantes/km<sup>2</sup>). A enorme discrepância encontrada em termos de densidade populacional entre os concelhos de Entroncamento e Mação, deve-se, no primeiro caso, à distribuição de um número comparativamente elevado de habitantes presentes (19 256) por uma área de aproximadamente 13 km<sup>2</sup>, representado por uma densa área urbana e, no segundo caso, à menor quantidade de habitantes presentes (7 106) numa área comparativamente extensa de aproximadamente 400 km<sup>2</sup>. A tabela 3.1 apresenta um conjunto de dados demográficos relativos aos censos de 2011 para os concelhos do Médio Tejo.

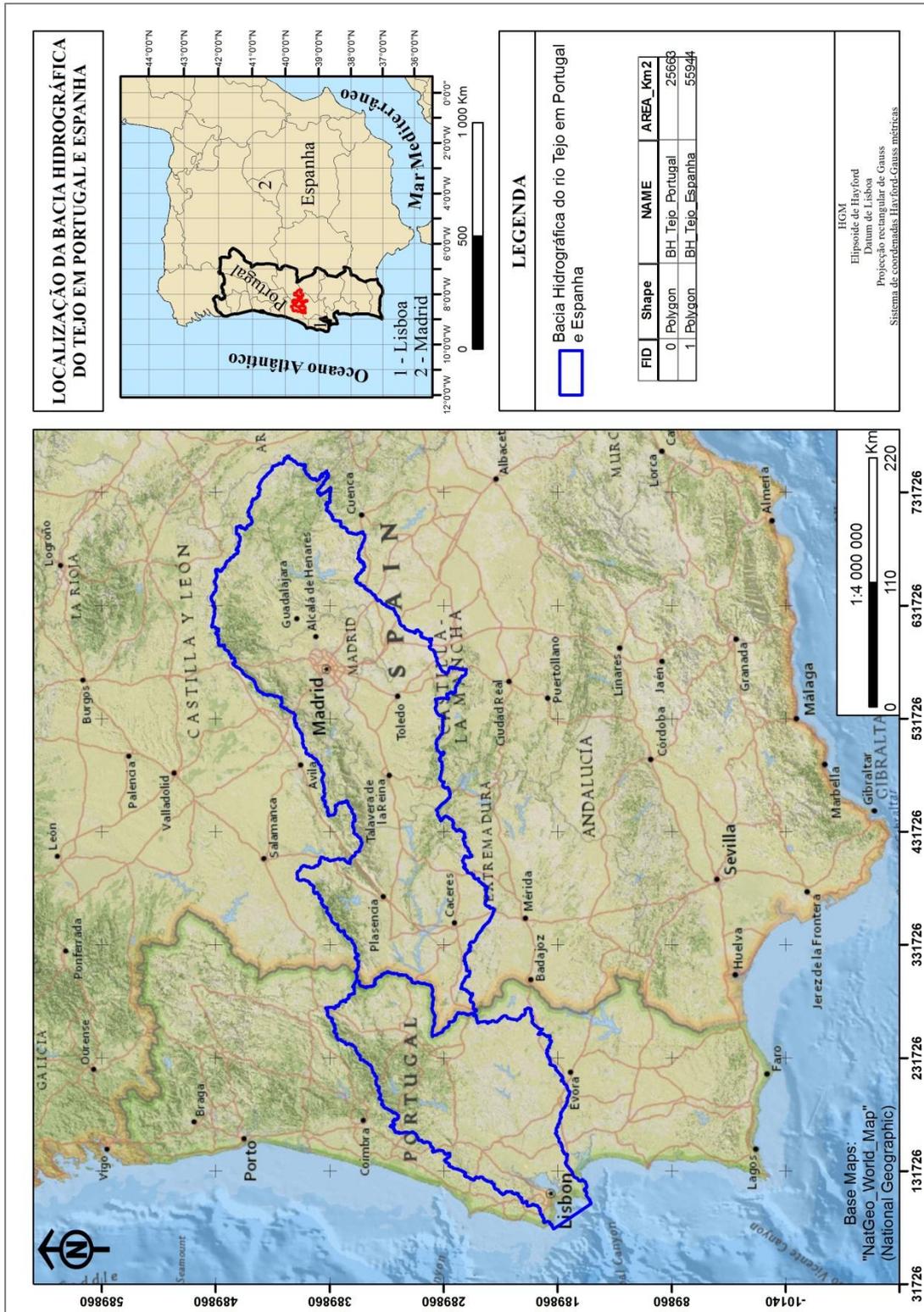


Figura 3.8. Bacia Hidrográfica do rio Tejo em Portugal e Espanha (adaptado de Gobierno de España: <http://www.chtajo.es> e *National Geographic Base Maps*).

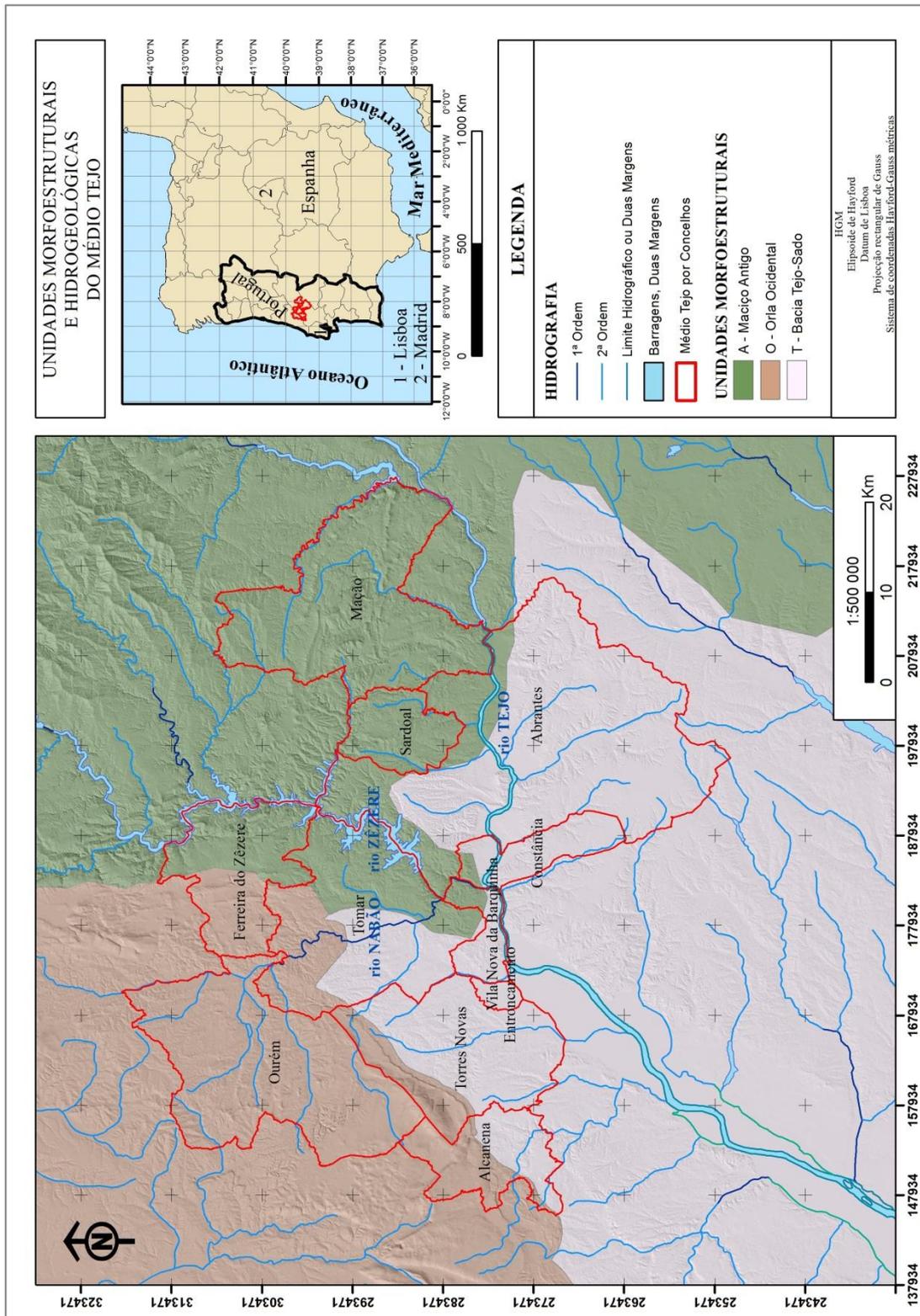
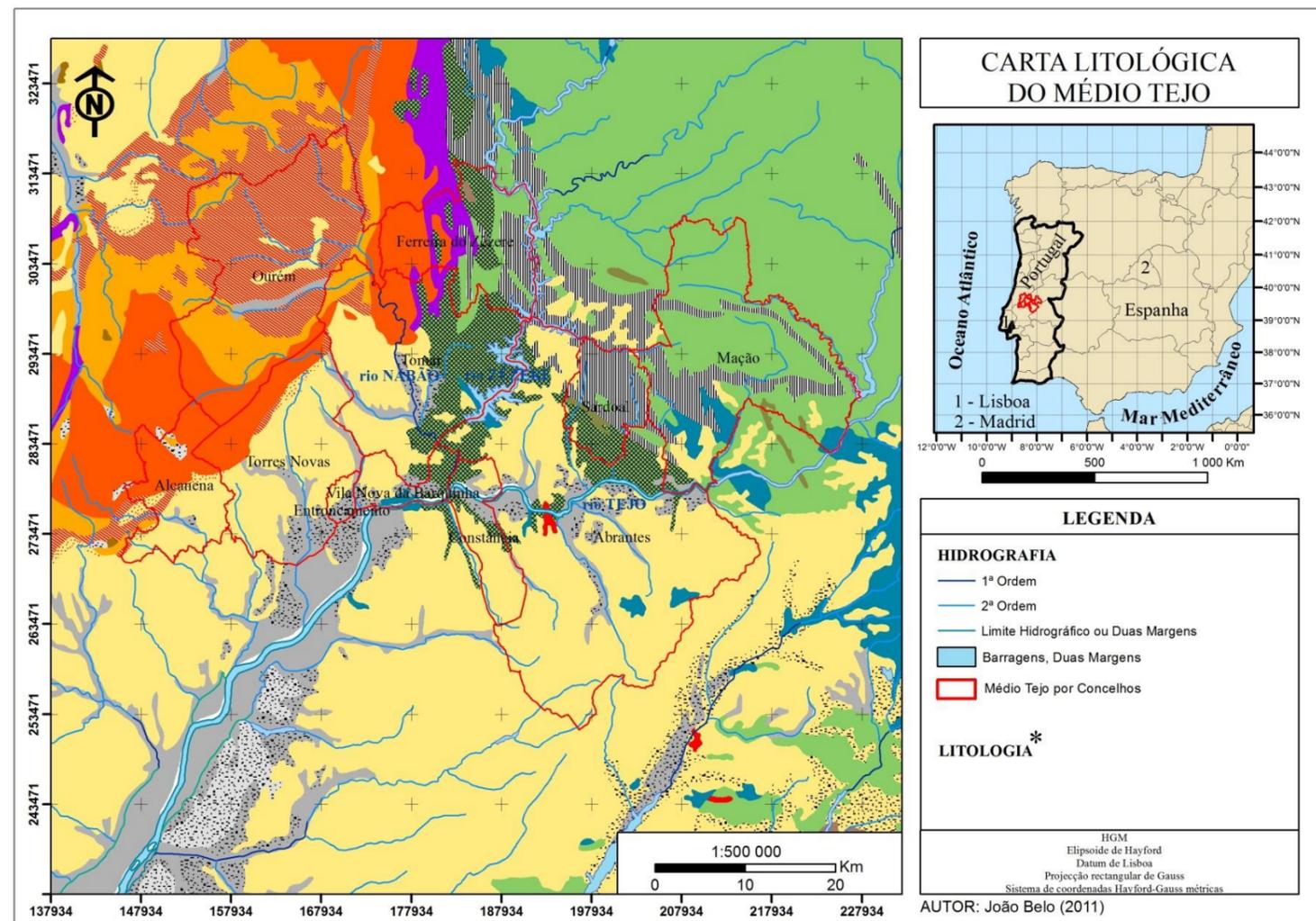


Figura 3.9. Unidades Morfoestruturais e Hidrogeológicas do Médio Tejo (adaptado de Atlas do Ambiente Digital).



\*Legenda da carta litológica

### LITOLOGIA

#### Formações Sedimentares

- Aluviões - HOLOCÉNICO
- Areias e cascalheiras - PLISTOCÉNICO
- Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas - PLIO-PLISTOCÉNICO
- Arenitos, calcários mais ou menos margosos, areias, cascalheiras, argilas - MIO-PLISTOCÉNICO
- Cascalheiras de planalto, arcoses da Beira Baixa, arenitos, calcários - PALEOGÉNICO-MIOCÉNICO
- Conglomerados, arenitos, calcários brancos, margas avermelhadas - PALEOGÉNICO
- Arenitos, conglomerados, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas - PALEOGÉNICO
- Conglomerados, arenitos, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas - JURÁSSICO
- Calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas - JURÁSSICO
- Grês vermelhos (de Silves), conglomerados, margas, calcários geralmente dolomíticos - JURÁSSICO-TRIÁSICO

#### Formações Sedimentares e Metamórficas

- Metavulcanitos - DO CARBÓNICO MARINHO AO PRÉCAMBRICO
- Rochas carbonatadas - DO CARBÓNICO MARINHO AO PRÉCAMBRICO
- Quartzitos - DO DEVÓNICO AO ORDOVÍCIICO
- Xistos, grauvaques, quartzitos, corneanas - CÂMBRICO
- Xistos, grauvaques - SILÚRICO E ORDOVÍCIICO
- Xistos, anfíbolitos, micaxistos, grauvaques, quartzitos, rochas carbonatadas, gnaises - PRÉCAMBRICO

#### Rochas Eruptivas Vulcânicas

- Basaltos; Teschenitos; Doleritos; Andesitos

#### Rochas Eruptivas Plutónicas

- Granitos e rochas afins; Quartzodioritos
- Dioritos; Gabros; Dioritos ou Gabros

Figura 3.10. Carta Litológica do Médio Tejo (adaptado de Atlas do Ambiente Digital).

Tabela 3.1 Valores totais de residentes e presentes, número de famílias, alojamentos e edifícios, valores de densidade populacional e área (km<sup>2</sup>) dos concelhos do Médio Tejo.

CONCELHOS	RESID_T	PRES_T	FAMIL.	ALOJA	EDIFIC.	HAB_Km2	AREA_Km2
Abrantes	39325	37754	16028	25558	20368	52.83	714.69
Alcanena	13868	13186	5554	8073	6697	103.56	127.33
Constância	4056	4010	1568	2181	1848	49.90	80.37
Entroncamento	20206	19259	8074	10714	4150	1402.85	13.73
Ferreira do Zêzere	8619	8334	3445	7523	6932	43.78	190.38
Mação	7338	7106	3126	7018	6648	17.77	399.98
Sardoal	3941	3733	1528	2986	2810	40.51	92.15
Tomar	40674	39446	16391	26367	20756	112.32	351.20
Torres Novas	36717	35111	14664	20905	16603	130.04	270.00
Vila Nova da Barquinha	7322	7093	2915	4114	3414	143.21	49.53
Ourém	45932	44186	17117	29287	23709	106.08	416.55
Médio Tejo	227998	219218	90410	144726	113935	81,01	2705,91

(adaptado de INE, 2011)

Repare-se que os concelhos com maior densidade populacional (Fig. 3.12) coincidem, no espaço, com uma área de elevada perigosidade de inundação, traduzindo-se num incremento de vulnerabilidade.

De modo a representar o total de população presente de forma mais detalhada, elaborou-se, na figura 3.13, uma representação por subsecção estatística, que traduz uma distribuição mais próxima da realidade.

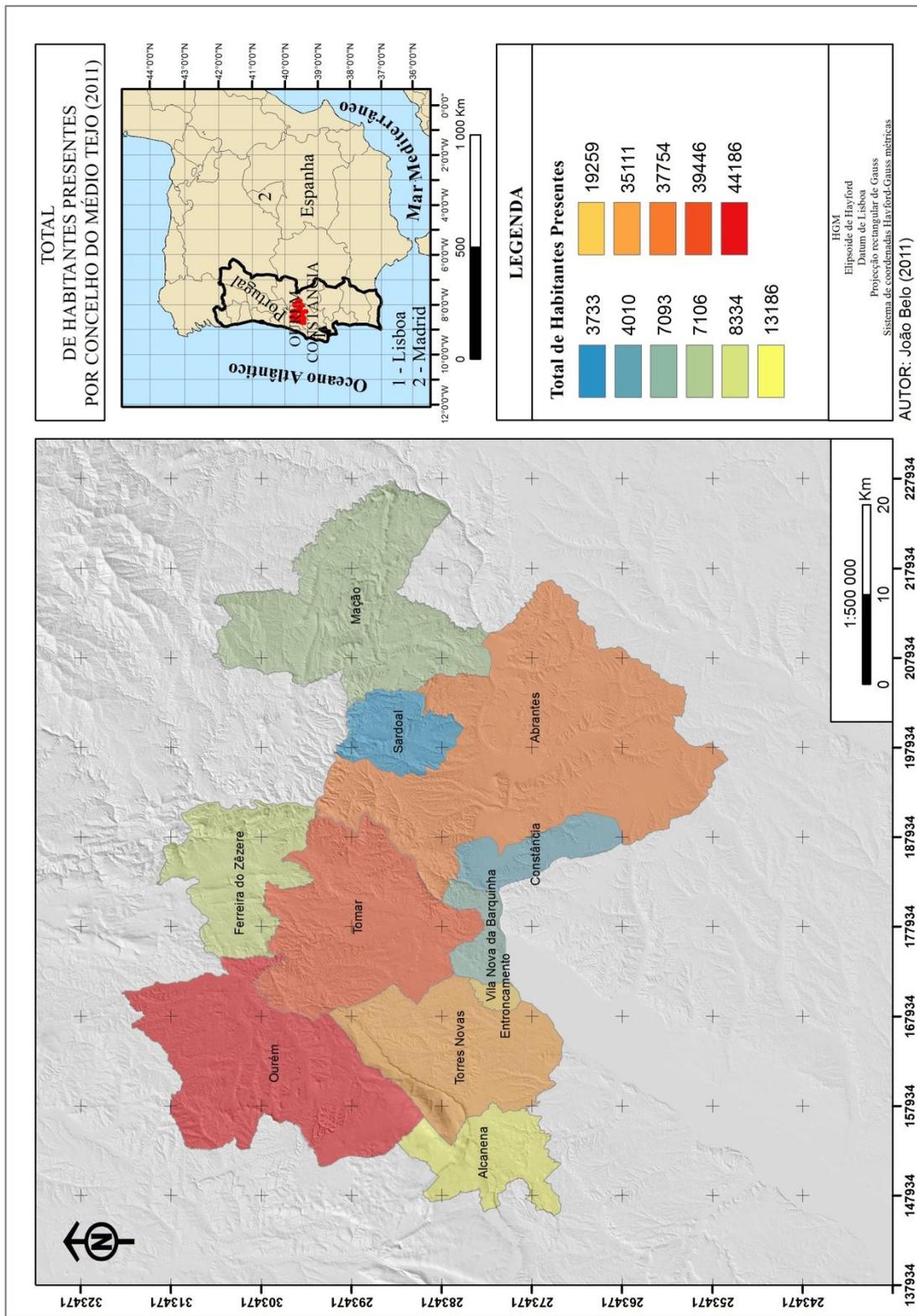


Figura 3.11. Total de habitantes presentes por concelho no Médio Tejo (adaptado de INE,2011).

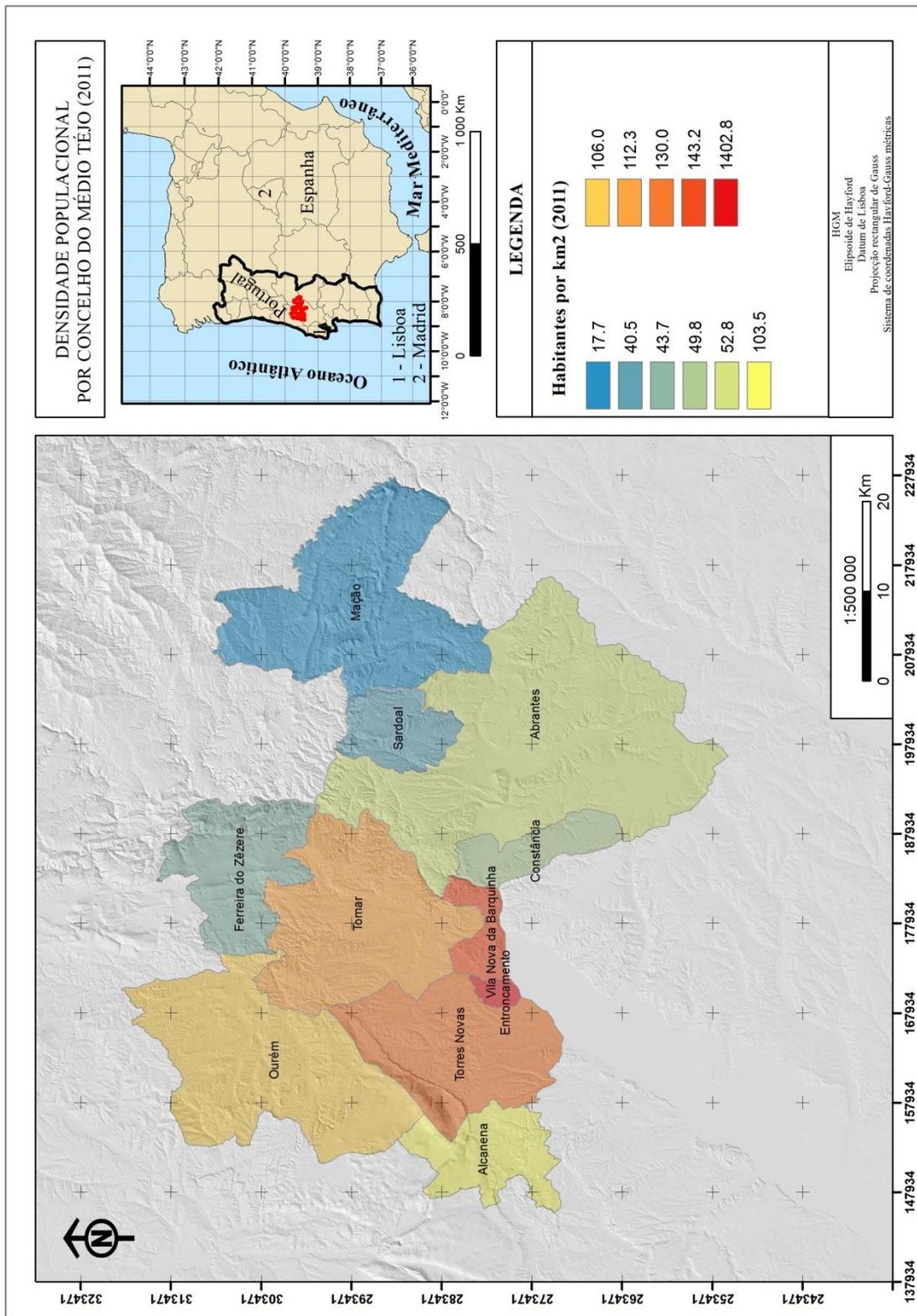


Figura 3.12. Densidade populacional por concelho do Médio Tejo (adaptado de INE, 2011).

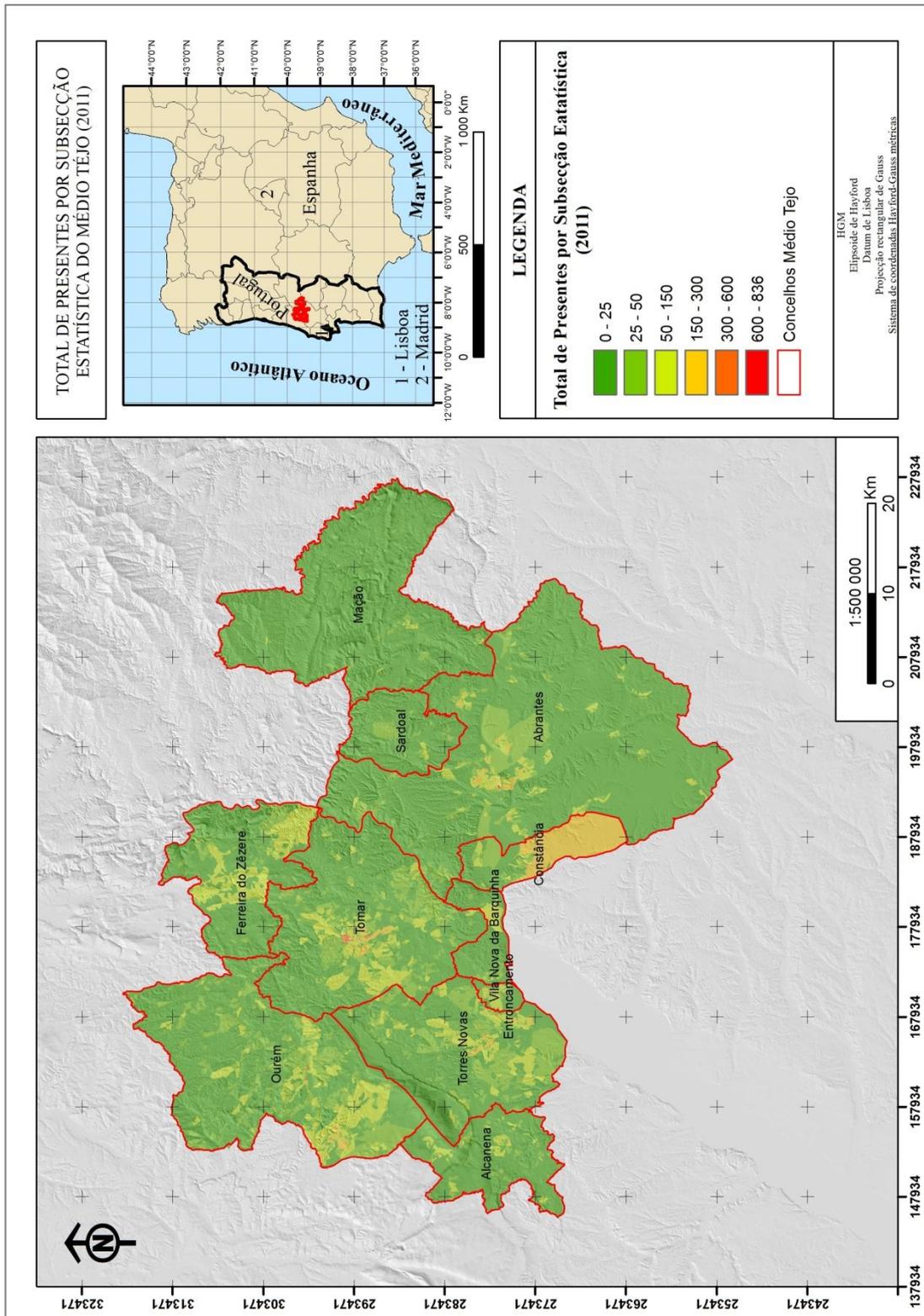


Figura 3.13. Total de presentes por subsecção estatística (adaptado de INE, 2011).

### 3.6. Uso e Ocupação do Solo

Para a análise e apresentação do uso do solo no Médio Tejo, optou-se por utilizar a cartografia Corine Land Cover (CLC) dos anos 1990 (v2 revista), 2000 (revista) e 2006, à escala 1/100 000, com unidade mínima cartográfica de 25 ha, produzida pelo Instituto Geográfico Português (IGP). A escolha deveu-se à disponibilidade da mesma cartografia para duas datas anteriores (1990 e 2000), o que permitiu uma visão diacrónica do uso do solo no Médio Tejo. Por outro lado, na análise SIG utiliza-se a cartografia COS 2007, pela sua maior atualidade e precisão.

Para uma melhor perceção dos dados (CLC), os tipos de uso do solo foram generalizados em apenas cinco usos de nível 1, para os quais as classe do tipo (1%%) correspondem ao uso Urbano, do tipo (2%%) correspondem ao uso Agrícola, do tipo (3%%) ao uso Florestal, do tipo (4%%) a Pauis, Sapais e Salinas e, por último, do tipo (5%%) a Planos de Água (rios e albufeiras, entre outros).

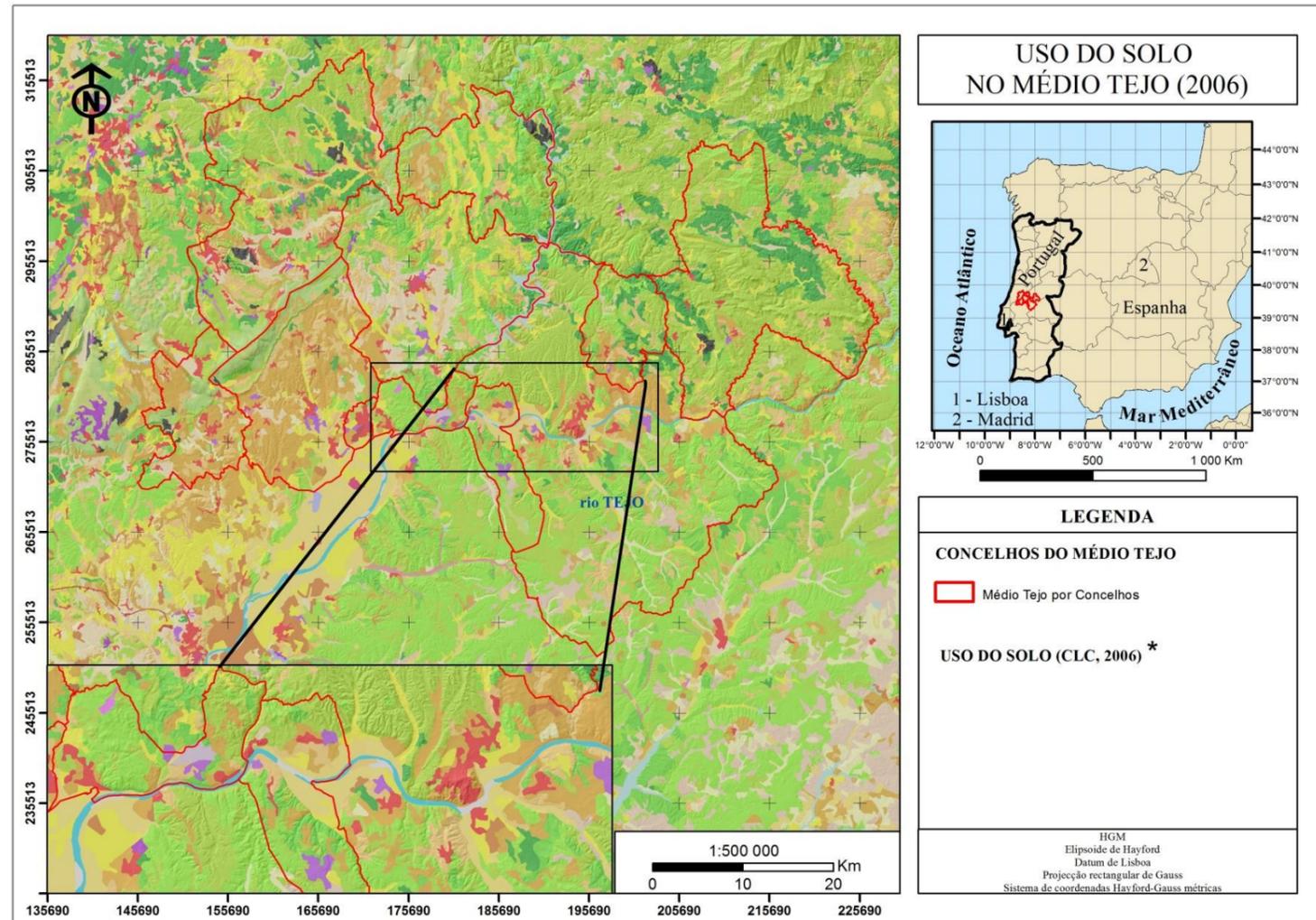
A tabela 3.2 apresenta os valores correspondentes à área (km<sup>2</sup>) e á percentagem da área correspondente a cada um dos cinco usos do solo relativamente à área total (%).

Tabela 3.2. Área (km<sup>2</sup>) e percentagem da área relativamente à área total (%) para os diferentes tipos de uso do solo, nos anos de 1990, 2000 e 2006.

Ano	1999		2000		2006	
	AREA_KM2	PERC_TOT (%)	AREA_KM2	PERC_TOT (%)	AREA_KM2	PERC_TOT (%)
Urbano	68.57	2.53	90.33	3.34	94,87	3,50
Agrícola	1084.82	40.09	1056.47	39.04	1042,83	38,53
Florestal	1521.90	56.24	1527.32	56.44	1537,90	56,82
Pauis, Sapais e Salinas	0.10	0.00	0.11	0.00	0,04	0.00
Planos de Água	30.82	1.14	31.99	1.18	30,67	1,13
Total	2706,21	100,00	2706,21	100,00	2706,21	100,00

(adaptado dos valores publicados na cartografia CLC)

O Médio Tejo apresenta uma área de 2 706,21 km<sup>2</sup>. No ano de 2006, a maior fatia dessa área (1 537,90 km<sup>2</sup> correspondentes a 56,82% do território) pertence ao uso Florestal, seguindo-se o uso Agrícola (1 042,83 km<sup>2</sup> correspondentes a 38,53%), Urbano (94,87 km<sup>2</sup> correspondentes a 3,50%), Planos de Água (30,67 km<sup>2</sup> correspondentes a 1,13%) e Pauis, Sapais e Salinas (área inferior a 1 km<sup>2</sup> e a 1% do território).



\* Legenda do Uso do Solo, Carta Corine Land Cover, 2006.

- |   |  |
|---|--|
| 111 - Tecido urbano contínuo  | 311 - Florestas de folhosas                        |
| 112 - Tecido urbano descontínuo   | 312 - Florestas de resinosas                       |
| 121 - Indústria, comércio e equipamentos gerais                             | 313 - Florestas mistas                             |
| 122 - Redes viárias e ferroviárias e espaços associados                     | 321 - Vegetação herbácea natural                   |
| 123 - Áreas portuárias  | 322 - Matos  |
| 124 - Aeroportos e aeródromos   | 323 - Vegetação esclerófila                        |
| 131 - Áreas de extração de inertes  | 324 - Florestas abertas, cortes e novas plantações |
| 132 - Áreas de deposição de resíduos  | 331 - Praias, dunas e areais                       |
| 133 - Áreas em construção   | 332 - Rocha nua                                    |
| 141 - Espaços verdes urbanos  | 333 - Vegetação esparsa                            |
| 142 - Equipamentos desportivos, culturais e de lazer e zonas históricas     | 334 - Áreas áridas                                 |
| 211 - Culturas temporárias de sequeiro                                      | 335 - Neves eternas e glaciares                    |
| 212 - Culturas temporárias de regadio                                       | 411 - Paúis  |
| 213 - Arrozais  | 412 - Turfeiras                                    |
| 221 - Vinhas  | 421 - Sapais                                       |
| 222 - Pomares   | 422 - Salinas e aqüicultura litoral                |
| 223 - Olivais   | 423 - Zonas entre-marés                            |
| 231 - Pastagens permanentes   | 511 - Cursos de água                               |
| 241 - Culturas temporárias e/ou pastagens associadas a culturas permanentes | 512 - Planos de água                               |
| 242 - Sistemas culturais e parcelares complexos                             | 521 - Lagoas costeiras                             |
| 243 - Agricultura com espaços naturais e semi-naturais                      | 522 - Desembocaduras fluviais                      |
| 244 - Sistemas agro-florestais  | 523 - Oceano                                       |

Figura 3.14. Uso do solo no Médio Tejo (adaptado de CLC, 2006).

A figura 3.14 apresenta a classificação do uso do solo da carta CLC para o ano de 2006. Mediante a sua análise, é possível verificar que no quadrante oeste, nos concelhos de Alcanena e Torres Novas, predominam as classes associadas ao uso agrícola, nomeadamente olivais, vinhas, pomares e milho, entre outros. No octante noroeste, correspondendo aos concelhos de Ourém, Tomar e Ferreira do Zêzere, o uso predominante é o florestal, maioritariamente composto por folhosas, com ocorrência de vários tipos agrícolas. A nordeste, no concelho de Mação, também predomina o uso florestal mas com forte ocorrência das classes resinosas e mistas. As classes de uso urbano e agrícola, ainda que se encontrem por toda a área, têm maior incidência nas áreas próximas aos rios, como é possível verificar mediante a análise das figuras 3.13 e 3.14. Numa perspetiva diacrónica, baseada na tabela 3.2 e na figura 3.15, pode inferir-se que a classe de uso do solo que mais aumentou entre os anos de 1990 e 2006, foi o urbano (passando de 2,5% em 1990 para 3,5% em 2006), que se traduz num provável aumento de vulnerabilidade social. O uso agrícola perdeu uma área superior a 40 km<sup>2</sup>, entre as mesmas datas, e o uso florestal apresenta um aumento de área pouco significativo.

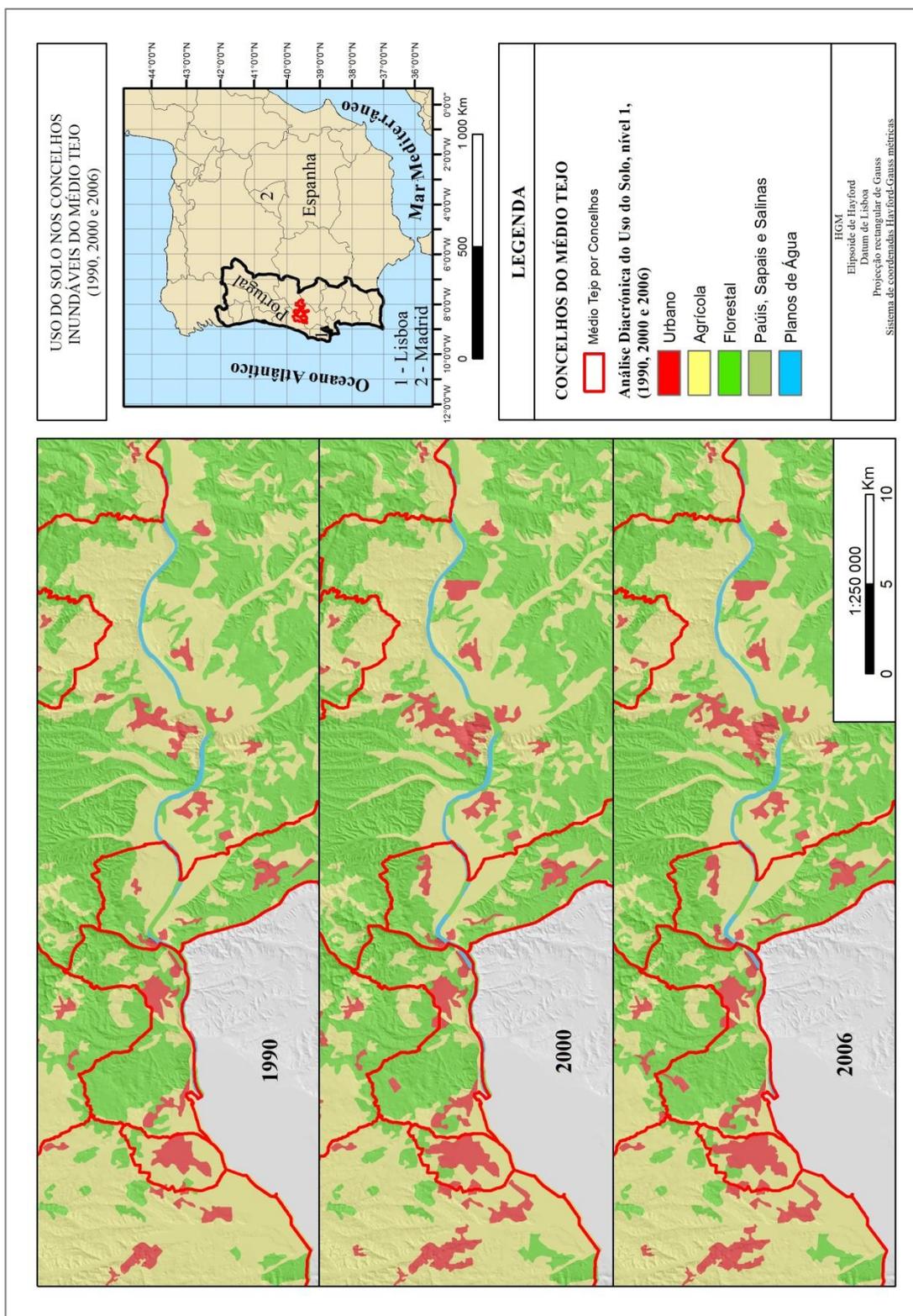


Figura 3.15. Uso do solo (nível 1) na área com maior perigosidade de inundação no Médio Tejo (adaptado de CLC 1990, 2000 e 2006).

## **4. SOFTWARE, DADOS E METODOLOGIA**

### **4.1. Software**

Para a realização do presente estudo, foram utilizados diferentes programas informáticos, aplicados em diversas fases do trabalho, com finalidades distintas.

O projeto SIG foi concebido no pacote ArcGis10<sup>®</sup> (ArcMap<sup>™</sup>, ArcCatalog<sup>™</sup>, ArcToolBox<sup>™</sup> e ArcScene<sup>™</sup>), desenvolvido pela ESRI, tendo-se aplicado algumas funcionalidades das extensões Spatial Analyst, 3D Analyst e Arc Scan.

Para o processamento de texto e cálculos foram utilizados os programas Word<sup>®</sup> e Excel<sup>®</sup> (Microsoft Office).

#### **4.1.1. Sistema de referência**

Qualquer projeto a desenvolver em SIG implica a georreferenciação dos dados, tendo por isso subjacente um sistema de referência, seja ele um sistema de coordenadas cartográficas ou geográficas. Se bem que as diferentes aplicações SIG possuam ferramentas que permitem reprojetar os dados de modo a que estes se conjuguem espacialmente, à medida que são carregados no sistema (transformação *on-the-fly*), no nosso caso optou-se por proceder à reprojeção definitiva dos dados para um único sistema. Os diferentes dados utilizados neste projeto SIG encontravam-se georreferenciados em diferentes sistemas coordenados (e.g. coordenadas geográficas com Datum WGS84, Hayford-Gauss Militar e ETRS89/PT-TM06).

A base cartográfica utilizada neste trabalho (Carta Militar de Portugal, série M888 do Instituto Geográfico do Exército) encontra-se georreferenciada no Sistema Hayford-Gauss Militar (HGM).

O sistema ETRS89/PT-TM06 foi recentemente oficializado como o sistema de coordenadas a utilizar em Portugal, por questões lógicas de uniformização internacional, contudo a nossa opção recaiu sobre o sistema HGM, já que a grande maioria dos dados recolhidos se encontravam referenciados nesse sistema, nomeadamente os de base, evitando-se assim a reprojeção de um grande conjunto de dados e minimizando-se, por conseguinte, os erros dela decorrentes.

A projeção foi realizada com o auxílio da ferramenta *Projections and transformations* do ArcGis, utilizando sempre os parâmetros de projeção mais recentes.

#### 4.1.2. Base de dados

Neste trabalho, tendo em conta que envolve um volume de dados limitado e que não necessita de continuação de agregação de informação espaço-temporal, optou-se pela criação de bases de dados do tipo *file geodatabase* cuja criação e edição são extremamente simples. Contudo, se por ventura vier a haver necessidade de a ampliar, existe sempre a possibilidade de a importar para outro qualquer sistema mais adequado e eficaz. Os dados originais coligidos foram inicialmente estruturados em pastas. De igual modo, os dados produzidos por análise dos originais, nomeadamente no *software* HEC-RAS/HEC-GEORAS, foram mantidas em pastas individualizadas. Mais tarde, por questões de organização metódica, surgiu a necessidade de reagrupar toda a informação numa única *geodatabase*, tendo-se procedido à sua importação (Fig.4.1.).

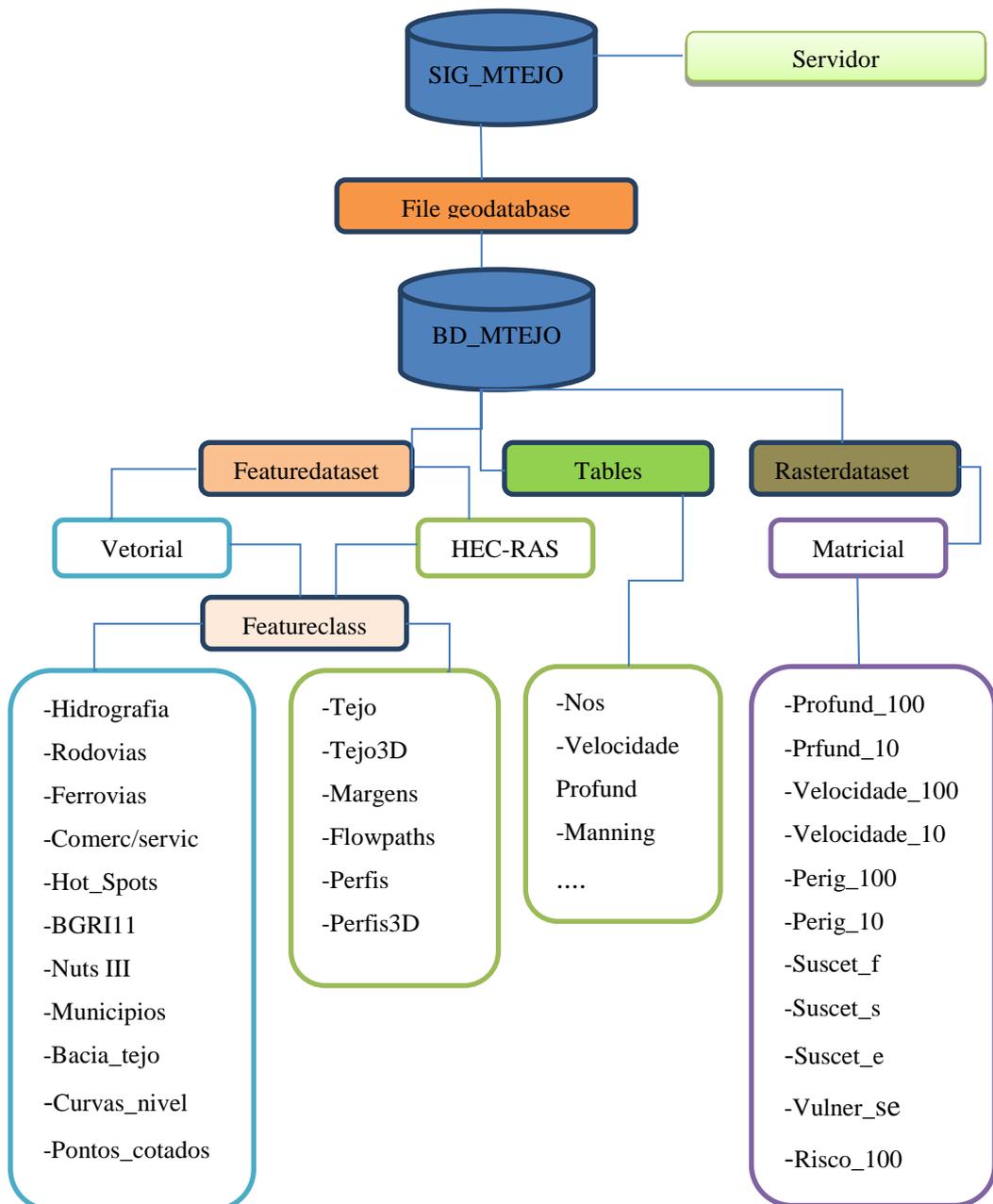


Figura 4.1. Estrutura simplificada da geodatabase BD\_MTEJO.

Para o cálculo e simulação unidimensional das manchas de inundação, utilizadas na conceção da cartografia de perigosidade, recorreu-se ao *freeware* HEC-RAS<sup>®</sup> 4.1, desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE; disponível no sítio web <http://www.hec.usace.army.mil/>), apresentado no ponto 2.1.5.

A interoperabilidade dos dados foi garantida pela aplicação HEC-GEORAS.

### **4.1.3. Modelação numérica da inundação HEC-RAS/HEC-GEORAS**

#### **4.1.3.1. Criação dos dados geométricos ArcGis/HEC-GEORAS**

De acordo com o descrito no ponto 2.1.5, o primeiro conjunto de dados necessário para a simulação das manchas de inundação diz respeito aos dados geométricos da área inundável do troço em estudo. A sua criação foi feita com recurso ao ArcGis, sobre o qual foi instalada a extensão HEC-GEORAS. Como primeiro passo, procedeu-se à criação dos temas centro do rio, margens do leito menor, margens do leito maior e secções transversais. Este procedimento fez-se com recurso ao comando *Create Ras Layer*, do menu *Ras geometry* (HEC-GEORAS). Dele resultaram os elementos *Stream Center line*, *Banklines*, *Flow Path Centerlines* e *Cutlines* (todos eles elementos 2D), armazenados como temas individualizados sob a forma de *Personal Geodatabase*, tendo-se-lhes atribuído as designações Tejo, Margens\_1\_m, FlowPaths\_Tejo e Perfis\_Tejo, respetivamente. Aquando da vectorização foram respeitadas duas regras fundamentais destes elementos: a primeira consistiu em desenhar todos os elementos necessários de montante para jusante e, a segunda, aplicada às *Banklines* e às *Flow Path Centerlines*, foi proceder à vectorização no sentido da esquerda para a direita, visto que o HEC-RAS irá interpretá-las segundo essa ordem. Os perfis transversais foram traçados o mais perpendicularmente possível ao leito do rio.

A vectorização foi executada sobre as ortofotografias do servidor *Bing Maps Aerial*, com uma resolução aproximada de 30 cm. Para que os elementos fossem desenhados de forma tão coerente quanto possível adotou-se uma escala de visualização fixa 1/2 000.

Após a criação dos dados tornou-se necessária a sua validação, com vista à sua computação no *software* HEC-GEORAS, mediante a seleção do rio (*Assign river code e Reachcode to river*), das estações inicial e final (*Select from station and to station*) e margens do leito de cheia (*Select flow path and Assign linetype attribute*). Nesta fase, os

dados criados ainda se encontram a duas dimensões, por isso, o próximo passo diz respeito à atribuição das coordenadas altimétricas ( $z$ ) respectivas com base no MDE, previamente desenvolvido. No menu *Ras Geometry*, na opção *Stream Center lines Attribute* procedeu-se à criação da topologia, à medição do comprimento do rio e à atribuição da altimetria. Este procedimento cria uma nova *geodatabase* (Tejo\_3D) de temas 3D, que posteriormente foi importada para a *geodatabase* de trabalho (Hec). Ainda no menu *Ras Geometry*, no submenu *XS Cut Lines Attribute* procedeu-se à atualização dos perfis transversais, mediante a atribuição das distâncias, a criação de nós entre as várias secções (de jusante para montante) e à atribuição altimétrica (cota  $z$ ). Esse procedimento criou um novo tema (Perfis\_3D) a três dimensões, posteriormente transferido para a *geodatabase* (Hec). O processo de criação dos dados geométricos de referência (Fig. 4.2), termina com a sua gravação (Geometria\_Tejo\_F) e posterior exportação por forma a serem processados no *software* HEC-RAS.

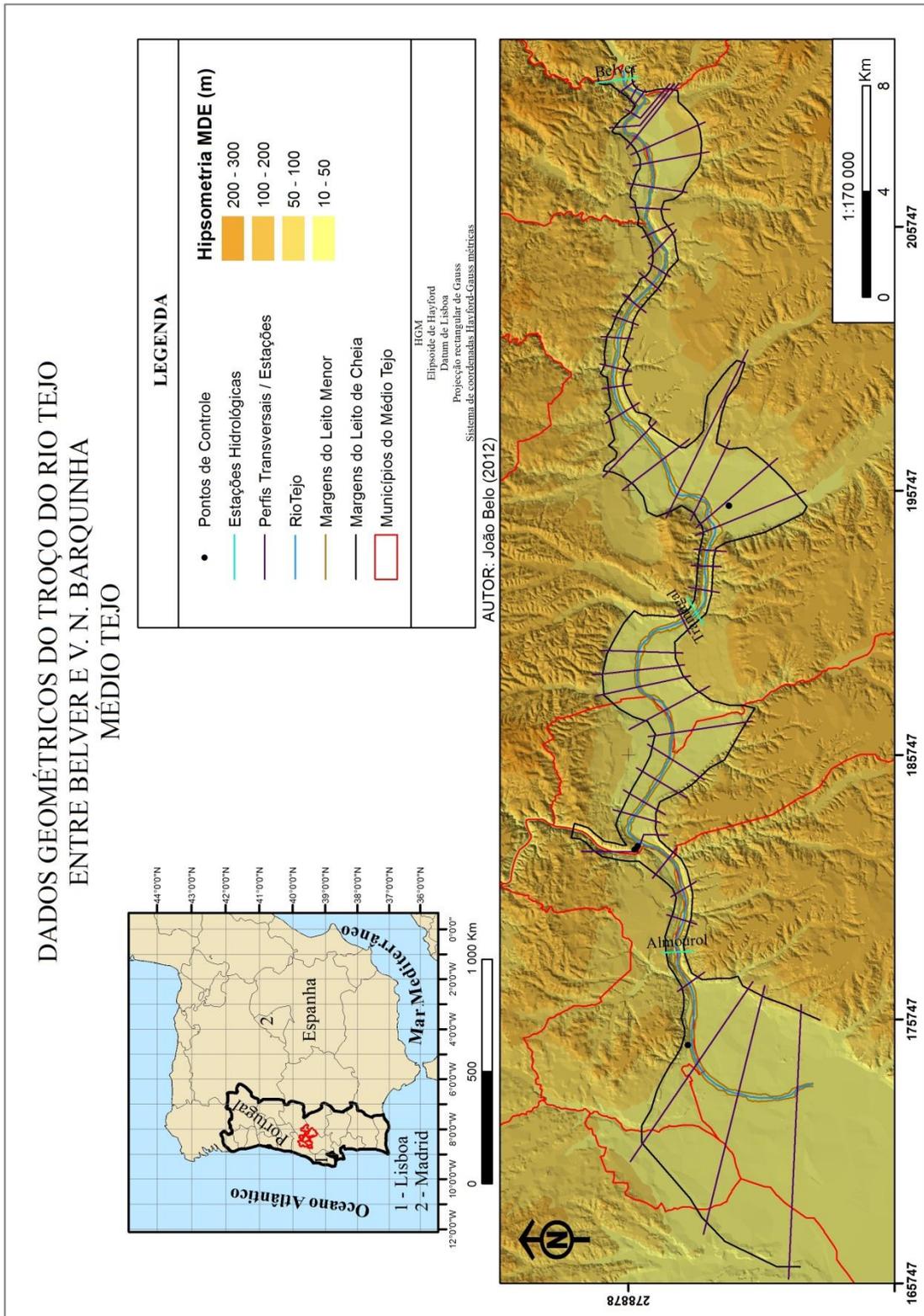


Figura 4.2. Mapa dos dados geométricos e hipsometria do MDE elaborado: rio, margens de leito de cheia e perfis transversais (CMP, série M888 do Instituto Geográfico do Exército).

#### **4.1.3.2. Simulação de inundações no modelo numérico HEC-RAS**

Os modelos de escoamento unidimensionais, gradualmente variados, em regime permanente, são geralmente os mais utilizados para a análise de cenários extremos de risco de inundação (Sousa, 2010). Estes modelos assumem que o pico de vazão não é reduzido pelo armazenamento em áreas periféricas do canal, onde geralmente as águas ficam retidas, em pequenas depressões, por perda considerável da velocidade.

O HEC-RAS apresenta várias hipóteses de simulação, para fluxos permanente e não permanente, mediante diferentes algoritmos matemáticos. Apresenta ainda a possibilidade de inserção, no modelo, de um conjunto de dados geométricos que poderão ter influência no comportamento das inundações a simular, nomeadamente pontes, taludes, estreitamentos e canais, entre outros. A grande quantidade de pontes presentes na área de estudo e a impossibilidade de aceder às plantas respetivas não permitiram a sua inserção no modelo.

O HEC-RAS também permite a inserção, e posterior análise hidrológica, dos tributários do rio principal. Neste trabalho, por não terem sido conseguidos dados hidrológicos referentes às estações do rio Tejo e às estações dos seus principais tributários, para um mesmo período de tempo que fosse suficientemente alargado para a sua análise estatística, também não foi possível a sua inserção no modelo. De qualquer modo, as estações escolhidas para análise, relativamente ao rio Zêzere (tributário mais importante), encontram-se a montante e jusante do troço em estudo, tendo assim sido possível verificar os caudais acima e abaixo do ponto de confluência.

Considerando o troço do rio Tejo em análise, entre Belver (montante) e Vila Nova da Barquinha (jusante), os meandros pouco acentuados, o baixo declive e o fluxo constante e pouco turbulento que apresenta, mesmo em cenário de pico de cheia, optou-se pelo desenvolvimento da simulação numérica para um fluxo permanente, mediante a aplicação da fórmula da conservação de energia.

Em primeiro lugar procedeu-se à simulação da inundação com base nos valores registados nas estações hidrológicas de Belver (11430 m<sup>3</sup>/s), Tramagal (11042 m<sup>3</sup>/s) e Almourol (13855 m<sup>3</sup>/s), durante o pico da cheia de 12 de fevereiro de 1979. Além dos dados hidrológicos referentes à ponta de cheia, são também necessários os dados das condições de contorno. Para este tipo de simulação (fluxo permanente), os dados das condições de contorno dizem respeito ao declive do rio a jusante do troço estudado, para

o cálculo da conservação de energia com base no declive (*normal depth*), que deverá ser inferior a 0,1. O rio Tejo, a jusante do troço entre Belver e Vila Nova da Barquinha, apresenta um declive aproximado de 0.039%.

Foram consultadas várias tabelas com valores do coeficiente de rugosidade de Manning para diferentes tipos de materiais (Mendes & Cirilo, 2001). Contudo, optou-se pela utilização dos valores apresentados no manual HEC-RAS 4.1 (USACE, 2010), para a primeira simulação (tabela 4.1). Estes valores foram aplicados às cinquenta e duas estações (perfis transversais), de acordo com os materiais existentes (e.g. rocha, cascalho, vegetação herbácea, arbustiva, arbórea, etc.), conferidos por fotointerpretação.

Tabela 4.1. Valores (*n*) do coeficiente de rugosidade de Manning

Tipo de canal e descrição	Valores ( <i>n</i> ) do coeficiente de Manning		
	Mínimo	Médio	Máximo
<b>1. Canais principais</b>			
a. Limpos, retilíneos, sem poços profundo	0.025	0.030	0.033
b. Igual ao “a”, mas com pedras e vegetação	0.030	0.035	0.040
c. limpo, sinuoso, com alguns poços e bancos de areia	0.033	0.040	0.045
d. Igual ao “c”, com pedras e vegetação	0.035	0.045	0.050
e. Igual ao “d”, com secções e declives menos acentuados	0.040	0.048	0.055
f. Igual ao “e”, mais pedregoso	0.045	0.050	0.060
g. Troço lento com vegetação e poços profundos	0.050	0.070	0.080
h. Muita vegetação, poços profundos, arbustos densos	0.070	0.100	0.150
<b>2. Bacia aluvial</b>			
a. Pastagens sem arbustos			
1. Erva curta	0.025	0.030	0.035
2. Erva comprida	0.030	0.035	0.050
b. Áreas de cultivo			
1. Inculto	0.020	0.030	0.040
2. Talhões de cultivo maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c. Arbustos			
1. Arbustos dispersos, muita vegetação rasteira	0.035	0.050	0.070
2. Poucos arbustos e árvores, no inverno	0.035	0.050	0.060
3. Poucos arbustos e árvores, no verão	0.040	0.060	0.080
4. Densidade média de arbustos, no inverno	0.045	0.070	0.110
5. Densidade média de arbustos, no verão	0.070	0.100	0.160
d. Árvores			
1. Área aberta com troncos, sem rebentos	0.030	0.040	0.050
2. Igual ao “1”, mas com rebentos	0.050	0.060	0.080
3. Árvores grandes, sem árvores e vegetação abaixo destas, o fluxo não interseta a ramagem	0.080	0.100	0.120
4. Igual ao “3”, o fluxo interseta as ramagens	0.100	0.120	0.160
5. Salgueirais densos	0.110	0.150	0.200
<b>3. Materiais.</b>			
<b>Asfalto</b>			
1. Liso	0.013	0.013	
2. Rugoso	0.016	0.016	

(adaptado de USACE, 2010)

Na tabela 4.2 são apresentados os valores do coeficiente de rugosidade de Manning utilizados na primeira simulação, para a margem esquerda (n#1), centro do canal (n#2) e margem direita (n#3), respetivamente.

Tabela 4.2. Valores do coeficiente de rugosidade de Manning utilizados na primeira simulação.

Estações	n #1	n #2	n #3
Belver	0.045	0.033	0.035
49686.25	0.045	0.033	0.045
49344.46	0.08	0.033	0.045
49056.16	0.08	0.033	0.045
48096.08	0.035	0.033	0.045
47464.09	0.035	0.033	0.035
46779.84	0.035	0.033	0.035
46190.85	0.035	0.033	0.035
45603.73	0.035	0.033	0.035
44659.25	0.06	0.033	0.035
43832.77	0.06	0.033	0.035
42832.6	0.06	0.033	0.045
42246.54	0.08	0.033	0.045
41135.46	0.08	0.033	0.045
40535.09	0.08	0.033	0.035
39545.17	0.08	0.033	0.035
38802.41	0.08	0.033	0.035
38088.07	0.08	0.033	0.035
36943.42	0.08	0.033	0.035
36190.65	0.08	0.033	0.035
35150.48	0.045	0.033	0.035
33998.91	0.045	0.033	0.035
32813.79	0.035	0.033	0.035
31341.9	0.035	0.033	0.035
30433.42	0.035	0.033	0.035
Abrantes	0.016	0.033	0.016
29093.96	0.035	0.033	0.035
28180.29	0.045	0.033	0.035
27562.63	0.045	0.033	0.035
26641.52	0.045	0.033	0.045
Tramagal	0.035	0.033	0.06
25082.83	0.035	0.033	0.06
24176.87	0.035	0.033	0.035
23594.49	0.035	0.033	0.035
22936.84	0.035	0.033	0.035
22228.88	0.035	0.033	0.035
21589.59	0.035	0.033	0.035

(Continua na página seguinte)

(Continuação da página anterior)

Estações	n #1	n #2	n #3
Constância	0.035	0.033	0.035
19263.14	0.035	0.033	0.035
18296.83	0.035	0.033	0.035
17337.44	0.035	0.033	0.035
16367.46	0.035	0.033	0.035
15740.65	0.035	0.033	0.035
14412.15	0.035	0.033	0.016
13198.84	0.06	0.033	0.035
11827.81	0.06	0.033	0.035
10661.02	0.06	0.033	0.06
Almourol	0.06	0.033	0.045
8061.777	0.016	0.033	0.016
4955.366	0.035	0.033	0.035
Barquinha	0.035	0.033	0.035
617.4155	0.035	0.033	0.035

Os valores numéricos correspondentes às estações dizem respeito à distância (m) em que cada estação se encontra, contabilizados desde o ponto mais a jusante do rio, para montante.

Como não se conseguiu obter bibliografia concreta relativa ao coeficiente de contração/expansão, optou-se por usar os valores assumidos por defeito pelo *software*, para todas as estações (contração = 0,1; expansão = 0,3).

Os resultados obtidos da primeira simulação, desenvolvida segundo os parâmetros de entrada anteriormente descritos, apresentaram erros consideráveis, de ordem métrica, como se poderá confirmar mediante a análise da tabela 4.3. Assim tornou-se desde logo imprescindível proceder à calibração do modelo, por forma a conseguir os melhores resultados possíveis.

Tabela 4.3 Erros obtidos por comparação dos valores das cotas de inundação simuladas e observadas, para a cheia de 1979

	Cota de inundação (m)	S1	Erro (m)
<b>Estação</b>	<b>Cheia 1979</b>		
<b>Abrantes</b>	<b>34.92</b>	38.8	+3.80
<b>Tramagal</b>	<b>33.42</b>	29.5	-3.92
<b>Almourol</b>	<b>27.7</b>	27.5	-0.2
<b>Barquinha</b>	<b>23.99</b>	21.03	-2.96

(cotas da inundação de 1979; Loureiro, 2009b)

### 4.1.3.3. Calibração

Para analisar a validade dos resultados simulados usaram-se algumas estações e pontos de controlo, que permitiram comprovar a profundidade, ou altura da água simulada, nesses locais. Foram assim utilizadas as estações de Abrantes, Tramagal, Almourol e Vila Nova da Barquinha, para as quais são conhecidas as cotas atingidas pela inundação de 12 de fevereiro de 1979 (Loureiro, 2009b).

Fez-se ainda um levantamento de quatro pontos de controlo da referida cheia (marcas da cheia assinaladas pela população, geralmente em paredes, Fig. 4.3 a 4.6), para que fosse possível verificar a fidedignidade dos valores da simulação e se pudesse proceder à sua calibração, até que os valores de profundidade de água simulados se aproximassem o mais possível dos valores reais conhecidos.

A calibração dos modelos de simulação de inundações é geralmente necessária, e é tanto maior quanto maior a complexidade do rio e dos materiais da superfície e quanto menor for a precisão dos dados geométricos de entrada no modelo.

A pequena escala de análise, regional, e a equidistância altimétrica utilizada para a elaboração dos dados geométricos de entrada (10 metros entre curvas de nível), aliados à ausência de dados tridimensionais relevantes relativos a casas, muros, estradas e taludes, entre outros, assim como algum erro associado aos algoritmos matemáticos do modelo, não permitiram a obtenção de resultados simulados que fossem totalmente exatos. Segundo o USACE (1993), a melhor prova de precisão dos dados é a habilidade e experiência do modelador na realização da análise.



Figura 4.3. Ponto de controlo (Vila Nova da Barquinha).

Mesmo nestas circunstâncias, ambicionou-se conseguir calibrar o modelo para um erro mínimo possível.

Na generalidade dos trabalhos consultados, a calibração é feita com base nos valores do coeficiente de rugosidade de Manning, que imprimem a maior ou menor rugosidade dos materiais atravessados pela água, e com base no coeficiente de contração/expansão.



Figura 4.4. Ponto de controlo (Constância).



Figura 4.5. Ponto de controlo (Constância).



Figura 4.6. Ponto de controlo (Rossio).

Neste contexto, após uma análise atenta dos resultados da primeira simulação, nomeadamente dos erros encontrados, por excesso e por defeito, procedeu-se a um conjunto de simulações, e subsequentes calibrações baseadas no coeficiente de rugosidade dos materiais atravessados pela água (valores  $n$  de Manning) e de contração/expansão, até se atingirem resultados o mais próximo possível dos valores reais conhecidos. O anexo 1 apresenta a tabela com os valores dos coeficientes de rugosidade de Manning utilizados nas diversas simulações, cujas cotas atingidas, e respetivos erros associados, são apresentados abaixo na tabela 4.4.

Tabela 4.4. Cotas e respetivos erros obtidos nas diferentes simulações de calibração do modelo (cheia de 1979).

Estação	Cotas de inundação (m)												
	1979	S1	Erro (m)	S2	Erro (m)	S3	Erro (m)	S4	Erro (m)	S5	Erro (m)	S6	Erro (m)
<b>Abrantes</b>	<b>34.92</b>	38.8	3.88	38.8	3.88	38.8	3.88	38.8	3.88	38.8	3.88	38.8	3.88
<b>Tramagal</b>	<b>33.42</b>	29.5	-3.92	30.4	-3.02	31.8	-1.62	32.6	-0.82	33	-0.42	33.4	0.05
<b>Almourol</b>	<b>27.7</b>	27.5	-0.2	28.1	0.4	28.1	0.48	28.1	0.48	28.1	0.4	28.1	0.4
<b>Barquinha</b>	<b>23.40</b>	21	-2.96	20.7	-3.29	21.7	-2.29	22.1	-1.89	23.5	-0.59	23.5	0.14

Através da análise da tabela 4.4 (simulações 1 a 6), é possível depreender que os erros associados foram reduzindo com os processos de calibração, em todas as estações, exceto na de Abrantes/Rossio. A explicação para este facto é-nos difícil, visto que foram feitas diversas análises de pormenor aos dados geométricos e aos diversos passos do processo de simulação, sem se ter concretamente percebido qual, ou quais, os problemas que imprimem o erro que lhe está associado. No entanto, a maior possibilidade deverá recair sobre um possível erro do MDE, embora, depois de verificar minuciosamente a informação altimétrica da área em questão, não ter sido identificado qualquer erro. Assim sendo, se o erro tiver origem na informação altimétrica, deduz-se que o mesmo já viria impresso na cartografia topográfica utilizada, ou então o registo da cota que a água atingiu na estação de Abrantes (34,92 m, Loureiro, 2009b e Medeiros, 2005) poderá estar errado.

Tentando clarificar este aspeto, foi-se ao terreno, com um altímetro barométrico de precisão métrica para tentar perceber se as cotas inscritas na cartografia topográfica, na área de Rossio, estariam coerentes com a realidade. A utilização de um aparelho GNSS de precisão centimétrica ou de outro equipamento com precisão semelhante, para verificação das cotas, não foi possível. Procedeu-se à calibração do altímetro

barométrico no vértice geodésico de Caneiro (134 m) a oeste de Rossio. Posteriormente procedeu-se à sua validação no vértice geodésico de Ferrugenta (90 m), a leste de Rossio, e só depois se procedeu à verificação da altitude na estação de Abrantes e na área do respetivo ponto de controlo. Os resultados obtidos apenas se podem considerar indicativos, considerando a precisão do aparelho de medição. Por exemplo, no ponto de controlo, a altitude obtida foi 30 m, próximo dos 31,5 m obtidos da cartografia topográfica. Este facto, leva-nos a crer que a cartografia esteja correta. No entanto, quando analisamos a delimitação desenvolvida pelo LNEC, para o INAG, calculada por um modelo hidráulico, em ambiente SIG, para a cheia de 1979, percebemos que na área de Rossio também aparenta existir uma extensão ligeiramente superior aos registos reais, o que torna possível que se tenham deparado com um problema semelhante. Ainda que se tenha tentado não se conseguiu obter atempadamente a bibliografia que sustenta tecnicamente os processos de simulação utilizados pelo LNEC para o desenvolvimento deste estudo.

Relativamente aos pontos de controlo levantados, são apresentas, na tabela 4.5, as profundidades aproximadas, atingidas durante a inundação de 12 de fevereiro de 1979, à esquerda, e os dados de profundidade obtidos pela simulação 6, à direita.

Tabela 4.5. Profundidade da inundação de 1979 nos pontos de controlo e valores médios de profundidade obtidos por simulação.

P. Controlo	Profundidade (m)		Erro (m)
	1979	Simulação 6	
<b>Rossio</b>	4.5	7.4	2.9
<b>Constância 1</b>	3	3.2	0.2
<b>Constância 2</b>	4.2	4.2	0
<b>Barquinha</b>	3.8	3.1	0.7

Os resultados das simulações no HEC-RAS, cujos processos serão discriminados adiante, dão origem a *rasters*. Optou-se pela utilização de pixels com o tamanho de 10x10 metros, pela boa relação precisão/peso, e para que estes sejam da mesma dimensão dos produzidos no ArcGis, visto que, para a análise matricial é imprescindível que todas as matrizes contenham o mesmo tamanho de pixel. O facto de a altimetria utilizada apenas ter uma equidistância de dez metros entre curvas de nível, também justifica a não existência de necessidade de utilização de um tamanho de pixel inferior,

considerando que não aumentaria a precisão dos dados altimétricos e das profundidades a representar, tendo, apenas, como contrapartida, o aumento do seu volume. A profundidade calculada durante este processo resulta da diferença entre o modelo da superfície da água, calculado com base nos valores da cota atingida pela água nas diferentes estações (perfis transversais), e o modelo digital de elevação previamente calculado. Cada célula da matriz resultante representa uma unidade de superfície (10x10m) à qual está associado o valor médio da profundidade de inundação.

O facto de o valor representado por cada célula ser o valor médio da profundidade dentro dessa área, que ainda é extensa (100m<sup>2</sup>), dificilmente permitirá, exceto se a área for plana e regular, que o valor representado seja exatamente o mesmo que se verifica nos pontos de controlo. Outro fator que poderá contribuir para este facto é a ausência de dados físicos tridimensionais (e.g. taludes, muros, casas e estradas), que na realidade não permitiriam o espriamento da água, alterando o seu nível, localmente.

Foram assim conseguidos, mediante a calibração sistemática do modelo, os melhores resultados possíveis (inferiores a 1 m), considerando a precisão dos dados de entrada. Contudo, na área de Rossio, obteve-se um erro de profundidade superior (2,9 m), que se manteve mesmo depois da calibração do modelo, sem ter sido possível descobrir a sua causa. À frente far-se-á a análise comparativa dos resultados obtidos por simulação HEC-RAS com os resultados obtidos por delimitações de áreas inundadas feitos por outras entidades.

## 4.2. Dados

### 4.2.1. Dados hidrológicos

Tentou recolher-se dados hidrológicos referentes ao máximo de estações hidrométricas influentes no processo de cheia do Tejo, o que implicaria a obtenção de dados de caudal máximo anual e alturas hidrométricas no troço em estudo, referentes ao rio Tejo e aos seus tributários principais (e.g. rios Almonda, Alviela, Nabão, Torto e Zêzere, entre outros). No entanto, os dados necessários não foram conseguidos para o número desejável de estações de interesse, durante um período de tempo contínuo não inferior a trinta anos.

Para a pesquisa de dados sistemáticos dos caudais máximos anuais e alturas hidrométricas máximas anuais, foram utilizadas diversas fontes, nomeadamente a BD *online* do SNIRH e publicações editadas em papel, tendo-se esta última revelado particularmente proveitosa quanto à recolha de dados mais adequados para a análise estatística dos períodos de retorno (anos) e probabilidades de ocorrência (%).

Os dados hidrológicos históricos consideraram-se importantes para a análise da ocorrência de cheias e inundações do Tejo, por vezes severas, causadoras de prejuízos vários, nos seres humanos, nas infraestruturas e outros bens que estes utilizam.

Alguns dados históricos foram recolhidos do trabalho de Loureiro (2009b), “Rio Tejo, as grandes cheias 1800-2007”, que reúne um conjunto de descrições das várias cheias do Tejo baseadas na imprensa periódica. Também foram recolhidas informações de um artigo de Rodrigues *et al.* (2010), intitulado “Cheias no Tejo, Uma Evolução Histórica” (Tabela 4.6.). Os dados recolhidos nestas duas fontes, referem-se essencialmente às áreas geográficas inundadas do Médio Tejo e da Lezíria do Tejo, interessando particularmente a informação relativa às estações hidrométricas de Abrantes, Constância, Almourol e Vila Nova da Barquinha. Este tipo de dados, especialmente os mais antigos, são essencialmente descritivos. No entanto, para alguns anos mais recentes, existem informações de alturas hidrométricas atingidas na régua das estações, ou cotas atingidas pelo nível da água, durante os episódios de cheia.

Tabela 4.6 Registos históricos dos eventos de cheia do rio Tejo, entre 1823 e 1989.

REGIME	ANO	MÊS	REGISTOS DOS EVENTOS DE CHEIA E IUNDAÇÕES DO RIO TEJO
Regime natural	1823	Fevereiro	Trinta e quatro dias de copiosas e não interrompidas chuvas, a par de ventos tempestuosos, trouxe à ribeira de Coruche e ao Tejo, uma cheia tão grande, de cuja igual não há memória.
	1855	Fevereiro	As sucessivas chuvas que começaram em força no dia 13, deram lugar ao receio do crescimento das águas do Tejo. Abrantes foi um dos concelhos fortemente atingido.
	1876	Dezembro	É a maior cheia conhecida e referenciada com as respetivas marcas, é a cheia mais devastadora na região do baixo Tejo inundando e pondo em perigo haveres e populações de Vila Franca de Xira. Em Abrantes a cheia atingiu a maior altura desde 1855.
	1895	Março	Em Santarém, depois de 1876, o Tejo atingiu a maior altura. Foram novamente afetados os concelhos de Abrantes e Vila Velha de Ródão
	1912	Fevereiro	No dia 9 de Fevereiro o Tejo inundou os terrenos até à cota 81,79 m em Vila Velha de Ródão. Em certos pontos, o rio apresentou cinco vezes a largura habitual
	1940	Fevereiro	Valentíssimos temporais assolaram o Ribatejo. O Tejo inundou o Rossio, Abrantes e Rio Maior.
	1941	Fevereiro	O rio inundou os terrenos até à cota de 84,09 m em Vila Velha de Ródão, 34,44 m em Abrantes, 23,53m na Barquinha e 11,66 m na Ponte de Santarém.
Regime controlado	1947	Fevereiro	Cheias nos rios Sorraia e Almansor. O Tejo invadiu os campos de Santarém.
	1978	Março	Atingiu 11,66 m na ponte de Santarém. Neste século só foi ultrapassada pela cheia de 1941.
	1979	Fevereiro	Duas mil pessoas evacuadas pela maior cheia do rio Tejo no Século XX, só ultrapassada pela de 1876.
	1989	Dezembro	Pluviosidade obriga a novas descargas nas barragens de Fratel e Castelo de Bode.

(adaptado de Rodrigues *et al.*, 2010)

#### 4.2.1.1. Caudais e alturas hidrométricas

Para desenvolver uma análise que permita perceber a frequência de ocorrência de cheias, torna-se indispensável a aquisição de um conjunto contínuo de dados que abranja o maior período de tempo possível, para o máximo de estações, em particular para as mais próximas da área de estudo. A primeira fonte pesquisada com vista à aquisição de dados relativos aos caudais e alturas hidrométricas pertencentes a vários eventos de cheia, ocorridos na área em estudo (SNIRH, <http://snirh.inag.pt>), mostrou-se temporalmente pouco abrangente e, em algumas estações, os parâmetros necessários (caudal e altura hidrométrica) não estavam disponíveis ou, quando estavam, não eram contínuos nem coincidentes no período de tempo durante o qual foram registados, para as diferentes estações pretendidas.

De certa forma, a inexistência ou indisponibilidade dos dados hidrológicos necessários, dificultou e impediu a produção de resultados finais mais completos do que aqueles que se conseguiram apurar. Os melhores dados sistemáticos de caudal instantâneo máximo anual foram obtidos num relatório da CCDR-LVT que caracteriza os caudais do Tejo (Macedo *et al.*, 2006) para as estações de Tramagal e Almourol, localizadas, respetivamente, a montante e jusante da confluência do rio Zêzere com o rio Tejo, para um período contínuo de trinta anos (1973-2004), conforme se apresenta na tabela 4.7. Os melhores dados encontrados, referentes às alturas hidrométricas (Tabela 4.8), encontram-se publicados por Loureiro (2009b) na revista *Tágides*. Estes contêm informação da altura hidrométrica instantânea, referentes às cheias mais significativas decorridas entre 1876 e 1989, para as estações de Abrantes, Tramagal, Almourol e Barquinha, e serão analisados adiante.

Tabela 4.7. Dados sistemáticos de caudal máximo instantâneo anual para as estações de Tramagal e Almourol, para um período contínuo de 30 anos

Almourol					Tramagal				
Caudal máximo instantâneo					Caudal máximo instantâneo				
Série	Ano	Q (m3/s)	Dia	Mês	Série	Ano	Q (m3/s)	Dia	Mês
	-	-	-	-	1	1973/74	982	16	Fev
1	1974/75	1331	5	Mar	2	1974/75	1185	5	Mar
2	1975/76	764	15	Fev	3	1975/76	699	27	Dez
3	1976/77	5586	24	Fev	4	1976/77	3991	24	Fev
4	1977/78	11520	3	Mar	5	1977/78	8004	3	Mar
5	1978/79	13855	11	Fev	6	1978/79	11042	11	Fev
6	1979/80	1427	16	Out	7	1979/80	1334	17	Out
7	1980/81	700	10	Dez	8	1980/81	416	3	Dez
8	1981/82	3844	30	Dez	9	1981/82	5585	30	Dez
9	1982/83	949	9	Nov	10	1982/83	973	9	Nov
10	1983/84	3601	20	Nov	11	1983/84	3542	20	Nov
11	1984/85	3669	22	Jan	12	1984/85	3585	22	Jan
12	1985/86	1580	21	Fev	13	1985/86	1563	21	Fev
13	1986/87	1968	25	Fev	14	1986/87	1809	25	Fev
14	1987/88	2441	30	Jan	15	1987/88	1893	14	Dez
15	1988/89	1374	9	Nov	16	1988/89	1574	8	Nov
16	1989/90	10082	26	Dez	17	1989/90	10019	26	Dez
17	1990/91	2298	8	Nov	18	1990/91	2043	8	Nov
18	1991/92	791	29	Jan	19	1991/92	753	22	Out
19	1992/93	694	15	Jul	20	1992/93	849	14	Jul
20	1993/94	1923	4	Nov	21	1993/94	1454	3	Nov
21	1994/95	1558	13	Fev	22	1994/95	1293	13	Fev
22	1995/96	6442	24	Jan	23	1995/96	7005	9	Jan
23	1996/97	3025	20	Jan	24	1996/97	2479	20	Jan
24	1997/98	4996	22	Dez	25	1997/98	4820	6	Nov
25	1998/99	721	2	Jun	26	1998/99	715	2	Jun
26	1999/00	1628	24	Out	27	1999/00	1590	24	Out
27	2000/01	6017	28	Jan	28	2000/01	4978	6	Mar
28	2001/02	816	24	Jan	29	2001/02	959	14	Mar
29	2002/03	2517	3	Jan	30	2002/03	1998	3	Jan
30	2003/04	1692	10	Dez		-	-	-	-

(adaptado de Macedo *et al.*, 2006)

Tabela 4.8. Cotas (m) atingidas nas estações hidrométricas de Abrantes, Tramagal, Almourol e Vila Nova da Barquinha, em diversos cenários de cheia, entre 1876 e 1989.

<b>ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA</b>				
	<b>Abrantes</b>	<b>Tramagal</b>	<b>Almourol</b>	<b>Barquinha</b>
<b>Anos</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Cota (m)</b>
1876	36.65	33.42	27.7	23.99
1912	36.01	32.18	26.44	23.07
1940	34.92	32.04	26.8	23.13
1941	34.51	28.01	23.77	21.42
1947	34.49	28.01	22.55	21.09
1977	34.44	27.18	21.57	20.19
1978	33.81	-	-	-
1979	34.92	-	-	22.96
1981	29.48	-	-	22.31
1983	29.15	-	-	23.53
1989	28.57	-	-	23.21

(adaptado de Loureiro, 2009b)

#### **4.2.2. Dados cartográficos**

Para a construção ideal de um SIG que permitisse uma análise da perigosidade, suscetibilidade, vulnerabilidade e risco de inundação seria necessária a aquisição de um conjunto específico de dados, preferencialmente em formato digital (vetor ou matricial), que nem sempre foi conseguida. Por exemplo, um conjunto de dados considerado relevante para o estudo da vulnerabilidade e do risco, diz respeito ao edificado, a uma escala grande e detalhada, que contemplasse os atributos cadastrais referentes ao tipo de edifício, uso respetivo, número de pisos, fogos por piso, estado de conservação, e, no caso de edificado habitacional, o número de residentes, entre outros. As câmaras municipais são geralmente proprietárias dessa informação, mas a burocracia existente e a ausência de resposta às nossas solicitações por parte de alguns concelhos da área em estudo, inviabilizaram a sua aquisição mediante este procedimento. Alternativamente, solicitou-se essa informação à Comunidade Intermunicipal do Médio Tejo, que reúne e publica informação cartográfica para todos os concelhos desta região. Após vários contactos, inclusive através de um protocolo de disponibilização de informação estabelecido entre essa entidade e o Instituto Politécnico de Tomar, instituição corresponsável pelo desenvolvimento do presente estudo, foi negada a cedência da informação pretendida, por motivos que nos são alheios, apesar de os resultados obtidos neste trabalho poderem ser do interesse de toda a comunidade do Médio Tejo.

Como consequência, teve de se proceder à vectorização de alguns dados analógicos disponíveis, apenas para a área inundável, o que afetou certamente o pormenor dos resultados, por ausência de informação que seria pertinente. Procedeu-se assim à vectorização de um conjunto de dados, de entre os quais se destacam dados altimétricos, ferrovias, hidrografia (apenas referente ao troço do Tejo na área em estudo), escolas, refúgios sociais, polícia e bombeiros.

Alguns dados temáticos (temperaturas, precipitações, geologia, entre outros) foram adaptados do Atlas Digital do Ambiente (<http://sniamb.apambiente.pt/webatlas/>).

Quanto ao uso e ocupação do solo foi usada a informação publicada nas cartas CLC referentes aos anos de 1990 (v.2, revista), 2000 (revista) e 2006, bem como a da carta COS, referente a 2007, publicada pelo IGP.

Os dados demográficos são da autoria do Instituto Nacional de Estatística e referem-se aos censos de 2011.

As tabelas 4.9 e 4.10 apresentam uma listagem dos dados utilizados.

Tabela 4.9. Dados cartográficos (modelo vetorial) discriminados por tipo, escala e fonte.

Dados Cartográficos (Modelo Vetorial)			
Dados	Tipo	Escala	Fonte
Altimétricos	Linhas e Pontos (3D)	1/25 000	Vectorização sobre a CMP, Série M888, IGeoE
Ferrovias	Linhas (2D)	1/10 000	Adaptado de OpenStreetMap.org
Rodovias	Linhas (2D)	1/10 000	Adaptado de OpenStreetMap.org
Hidrografia	Linhas (2D)/(3D)	1/2 000	Vectorização sobre ortofotografias do servidor Bing Maps
	Linhas (2D)	1/500 000	Carta Militar Itinerária de Portugal, IGeoE
Litologia	Polígonos (2D)	1/1 000 000	Atlas Digital do Ambiente (adaptado de <a href="http://sniamb.apambiente.pt">http://sniamb.apambiente.pt</a> )
Unidade Morfoestrutural	Polígonos (2D)	1/1 000 000	Atlas Digital do Ambiente (adaptado de <a href="http://sniamb.apambiente.pt">http://sniamb.apambiente.pt</a> )
Precipitação Total	Polígonos (2D)	1/1 000 000	Atlas Digital do Ambiente (adaptado de <a href="http://sniamb.apambiente.pt">http://sniamb.apambiente.pt</a> )
Precipitação Dias	Polígonos (2D)	1/1 000 000	Atlas Digital do Ambiente (adaptado de <a href="http://sniamb.apambiente.pt">http://sniamb.apambiente.pt</a> )
Temperatura	Polígonos (2D)	1/1 000 000	Atlas Digital do Ambiente (adaptado de <a href="http://sniamb.apambiente.pt">http://sniamb.apambiente.pt</a> )
Escolas	Polígonos (2D)	1/2 000	Vectorização sobre ortofotografias do servidor Bing Maps (adaptado de <a href="http://sig.mediotejo.pt">http://sig.mediotejo.pt</a> )
Refúgios Sociais	Polígonos (2D)	1/2 000	Vectorização sobre ortofotografias do servidor Bing Maps (adaptado de <a href="http://sig.mediotejo.pt">http://sig.mediotejo.pt</a> )
Polícia	Polígonos (2D)	1/2 000	Vectorização sobre ortofotografias do servidor Bing Maps (adaptado de <a href="http://sig.mediotejo.pt">http://sig.mediotejo.pt</a> )
Bombeiros	Polígonos (2D)	1/2 000	Vectorização sobre ortofotografias do servidor Bing Maps (adaptado de <a href="http://sig.mediotejo.pt">http://sig.mediotejo.pt</a> )
Indústria	Polígonos (2D)	1/2 000	Vectorização sobre ortofotografias do servidor Bing Maps (adaptado de <a href="http://sig.mediotejo.pt">http://sig.mediotejo.pt</a> )
Comércio e Serviços	Polígonos (2D)	1/2 000	Vectorização sobre ortofotografias do servidor Bing Maps (adaptado de <a href="http://sig.mediotejo.pt">http://sig.mediotejo.pt</a> )
Uso do Solo	Polígonos (2D)	1/100 000	CLC 1990, 2000, 2006, IGP
	Polígonos (2D)	1/25 000	COS 2007, IGP
Demográficos	Polígonos (2D)	1/ 2 000	Adaptado de INE ( <a href="http://mapas.ine.pt">http://mapas.ine.pt</a> )

Tabela 4.10. Dados cartográficos (modelo matricial) segundo tipo, escala/resolução e fonte.

Dados Cartográficos (Modelo Matricial)			
Dados	Tipo	Escala/Resolução	Fonte
Ortofotografias	Fotografia	30 cm	Bing Maps
Mapa Topográfico	Imagem	1/25 000	CMP, Série M888, IGeoE
Mapa Topográfico	Imagem	1/100 000	National Geographic Base Maps

### 4.2.3. Criação do MNT

Para o desenvolvimento deste estudo foi necessária a criação de um modelo numérico do terreno (MNT) cujos valores refletissem a altimetria ou a elevação (modelo digital de elevação, MDE), relativamente ao geóide representativo do nível médio da água do mar (altitudes ortométricas). A sua elaboração foi desenvolvida para a extensa área de estudo do Médio Tejo. Como os únicos dados altimétricos digitais disponíveis estavam em formato matricial (Carta Militar de Portugal, série M888 do Instituto Geográfico do Exército) tornou-se necessário desenvolver um árduo trabalho de vectorização manual e semiautomática de todas as curvas de nível (equidistância de 10 metros) para a referida área, e de todos os pontos cotados da área inundável publicados na série M888 da CMP. Para o processo de vectorização utilizou-se a extensão ArcScan e as ferramentas de edição do ArcGis. O ruído das imagens cartográficas dificultou o bom desempenho do ArcScan no processo de vectorização semiautomática, obrigando a um prolongado trabalho de tratamento, correção, extração das curvas de nível e validação. Relativamente aos pontos cotados, tendo em conta que a área de interesse é substancialmente menor, optou-se por fazer a sua vectorização de forma manual. Em ambos os casos, a vectorização produziu objetos 2D, cuja altitude foi introduzida sob a forma de atributo. Esta informação altimétrica, complementada pelo limite (2D) da área a modelar, foi usada para criar o MDE, mediante aplicação da ferramenta *create TIN*, com as opções:

*Height field* – atributo Z, para curvas de nível e pontos cotados, e sem informação altimétrica quanto ao limite da área a modelar;

*Surface feature type* – *hardline* para as curvas de nível, *mass points* para os pontos cotados e *softclip* para o limite da área a modelar.

Este MDE é do tipo TIN (*triangular irregular network*, Fig. 4.7). Os vértices, integralmente localizados sobre os pontos cotados ou sobre as curvas de nível, são ligados por um conjunto de arestas que formam a rede de triângulos irregulares. Existem vários métodos possíveis para proceder à interpolação da triangulação (e.g. método de Delaunay e distância ordenada). Neste estudo optou-se pelo método de interpolação de Delaunay. Este método garante que nenhum vértice se localiza no interior de qualquer um dos círculos que se podem criar a partir dos três vértices de cada triângulo (Fig. 4.7). Ao cumprir este requisito o processo de triangulação de Delaunay

maximiza o menor ângulo de todos os triângulos, o que tende a evitar triângulos (alongados) com ângulos internos muito pequenos.

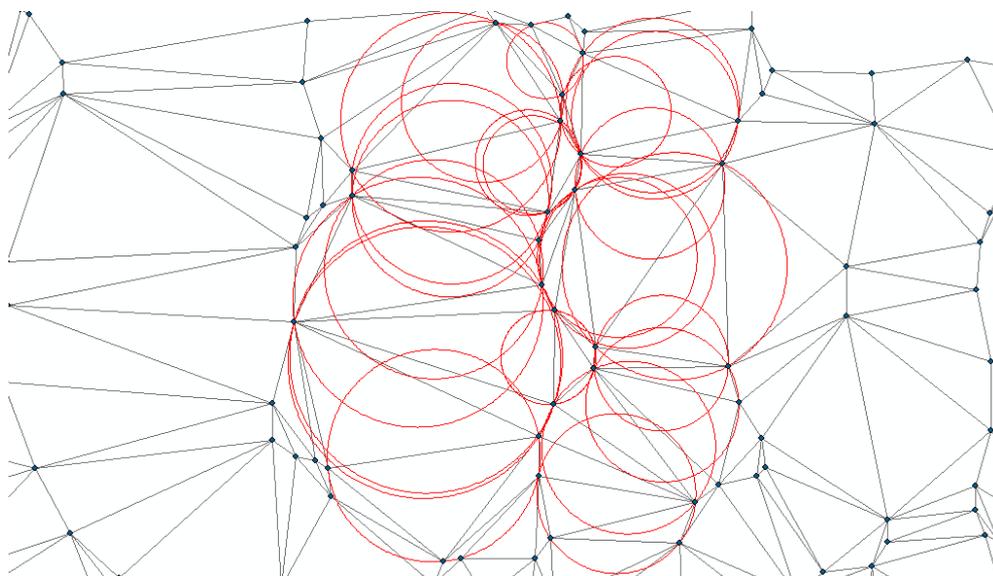


Figura 4.7. Exemplo de triangulação de Delaunay: a preto é representado a triangulação e os vértices que a formam (nós), a vermelho os círculos formados com base nos vértices dos triângulos, sendo possível verificar que não existe nenhum vértice no interior de cada um dos círculos formados.

A hipsometria resultante do MDE pode observar-se nas figuras 3.3 e 4.2.

### 4.3. Metodologia

De entre as várias referências bibliográficas consultadas para o desenvolvimento deste trabalho, constata-se a utilização de diferentes fórmulas, com parâmetros distintos, para o cálculo do risco. Ainda assim, quase todas apresentam o risco sob a forma do produto da perigosidade (*hazard*) pela vulnerabilidade (*vulnerability*). Os trabalhos elaborados nos países de charneira, quanto às metodologias de análise do risco, contemplam frequentemente um parâmetro de análise dos danos potenciais, com base nos prejuízos económicos e sociais causados pelos fenómenos de inundação. Neste caso a inserção desse parâmetro na análise do risco de inundação não foi possível, devido à inexistência de dados coerentes relativos aos prejuízos e danos económicos causados por cheias anteriores, o que obrigou a desenvolver uma metodologia de análise com base nos dados disponíveis. Contudo, dentro das possibilidades proporcionadas pelos

dados disponíveis para a análise do risco de inundação, tentou seguir-se, dentro do possível, os processos metodológicos sugeridos pela ANPC, publicados no Guia para a Caracterização de Risco no Âmbito da Elaboração de Planos de Emergência de Proteção Civil (ANPC, 2009), esquematizado na figura 4.8.

O ponto 1 da metodologia ANPC consta do terceiro capítulo deste trabalho. Os pontos 2 e 3 são abordados nos capítulos quarto e quinto. Por fim, o ponto 4 da metodologia ANPC será apenas sucintamente abordado no capítulo quinto, considerando que as estratégias para a mitigação não constituem um objetivo principal deste trabalho.

## MONITORIZAÇÃO E REVISÃO

### 1. Situação de referência

- Definição do território em análise
- Caracterização física, socioeconómica e de infraestruturas
- Elaboração de cartografia



### 2. Identificação do risco

- Identificação de riscos com possibilidade de ocorrência
- Levantamento de dados



### 3. Análise do risco

- Definições de cenários
- Estimativa do grau de probabilidade e de gravidade
- Determinação do grau de risco de inundação segundo a metodologia de análise SIG desenvolvida



### 4. Estratégias para a mitigação

- Medidas de prevenção
- Instrumentos de planeamento
- Identificação de meios e recursos

Figura 4.8. Processos metodológicos aconselhados pela ANPC para o estudo do risco, (adaptado de ANPC, 2009).

Para o cálculo do risco optou-se pela adaptação da fórmula utilizada por Westen (2004):

$$\text{Risco} = \sum (H * \sum (V * A)) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

na qual:

H - perigosidade, expressa a probabilidade de ocorrência de um determinado evento perigoso, associado a um período de referência;

V - vulnerabilidade, representa a vulnerabilidade física de elementos particulares que estejam em risco;

A - quantidade ou custo dos elementos particulares em risco.

Com base nos dados disponíveis para o desenvolvimento da análise do risco de inundação adaptou-se a equação 4.1, mediante substituição do parâmetro A (custo dos elementos particulares em risco) pelo parâmetro S (suscetibilidade física), definindo-se assim o risco de inundação através do produto da perigosidade (P) pela suscetibilidade física (S) e vulnerabilidade social e económica (V), conforme se mostra na equação 4.2.

$$\text{Risco} = (P*S) * (V) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Sendo:

P - Perigosidade (*hazard*), corresponde ao perigo de um determinado evento de cheia e consequente inundação, com uma determinada magnitude, associada à sua probabilidade e período de retorno, se fazer sentir num território;

S - Suscetibilidade física, corresponde à propensão do território à inundação, proporcionada pelos elementos físicos permeabilidade e declive.

V - Vulnerabilidade, corresponde à identificação e classificação dos elementos sociais e económicos vulneráveis aos eventos de inundação.

Foram analisadas diversas metodologias SIG desenvolvidas para a análise dos riscos naturais, empregues em diferentes trabalhos bibliográficos consultados, tendo-se encontrado métodos de diferente complexidade, geralmente associada ao maior ou menor número de critérios e ao grande volume de dados em análise.

Um primeiro objetivo prendeu-se em tentar encontrar uma metodologia SIG para a análise do risco de inundação já desenvolvida e validada por outros autores, aplicável à área em estudo. Por outro lado, ambicionou-se a sua aplicação de uma forma mais abrangente do que aquela encontrada em algumas das metodologias mais simples que foram consultadas. Assim, como resultado tentou-se desenvolver uma metodologia que cumprisse os requisitos iniciais objetivados para este estudo: por um lado encontrar uma

metodologia simples e executável com base nos dados disponíveis, e que, por outro lado, produzisse um conjunto de resultados coerente e válido.

Neste contexto optou-se pelo desenvolvimento de uma análise matricial, baseada em operações aritméticas simples (somadas e multiplicações), ponderadas empiricamente com base numa matriz de cinco classes qualitativas.

Todos os dados a introduzir no modelo são convertidos num modelo matricial que posteriormente são ponderados de acordo com o grau de importância que cada classe apresenta para a análise do risco de inundação.

Em baixo apresenta-se a legenda das figuras correspondentes aos fluxogramas da metodologia de análise do risco de inundação desenvolvida neste trabalho. Os processos de classificação ou reclassificação (R) encontram-se numerados. Os valores da ponderação atribuídos empiricamente a cada classe serão apresentados na secção 4.3.1.

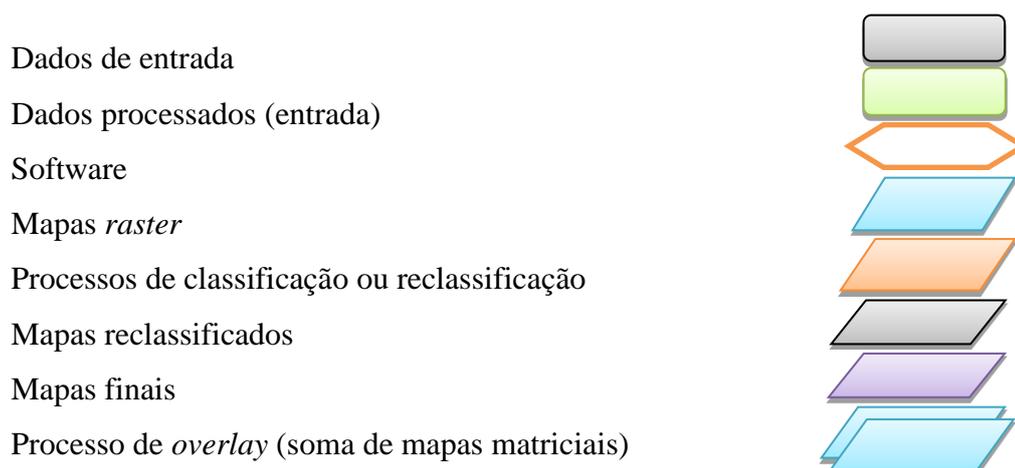


Figura 4.9. Legenda dos fluxogramas da metodologia.

Para o cálculo da perigosidade optou-se pela simulação de vários cenários de inundação, para diferentes probabilidades e períodos de retorno (10 anos e 100 anos). Para essa finalidade utilizou-se o *software* HEC-RAS/HEC-GEORAS desenvolvendo a simulação, para um fluxo constante, com base na equação da conservação de energia, conforme tem sido utilizado por outros autores, a diferentes níveis (e.g. Gurer & Ucar, 2010; Matgen *et al.*, 2004; Pappenberger *et al.*, 2005; Schumann *et al.*, 2007; Ballesteros *et al.*, 2011; Pistrika & Jonkman, 2010). A simulação dá origem a novos dados referentes à extensão, profundidades e velocidades da inundação. A perigosidade resulta da adição do mapa de profundidades com o mapa de velocidades. O método

utilizado para o cálculo da perigosidade encontra-se pormenorizado no fluxograma apresentado na figura 4.10.

P - Perigosidade

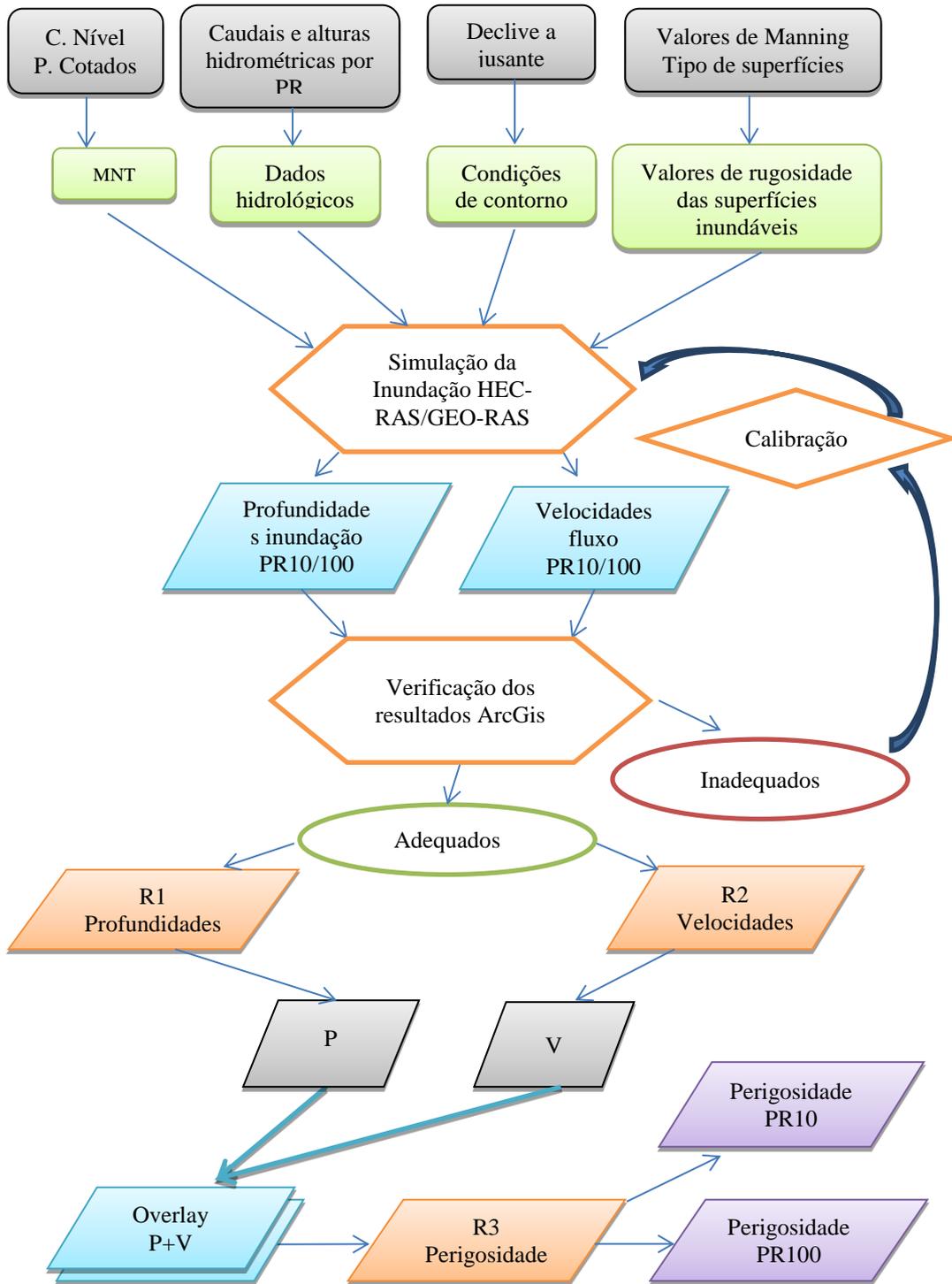


Figura 4.10. Fluxograma para o cálculo da perigosidade de inundação.

A permeabilidade varia segundo os materiais litológicos predominantes, sendo mais suscetível a inundações os materiais mais impermeáveis. O declive, proporcionado pela orografia, também tem influência, sendo as áreas mais planas as mais suscetíveis de serem inundadas e por períodos de tempo mais prolongados. A suscetibilidade resulta da adição dos mapas de permeabilidade geológica e declives. O mapa da suscetibilidade física multiplicado pela perigosidade dará origem à perigosidade total ( $P * S$ ). O método de cálculo da suscetibilidade encontra-se pormenorizado no fluxograma apresentado na figura 4.11.

S\_F – Suscetibilidade física

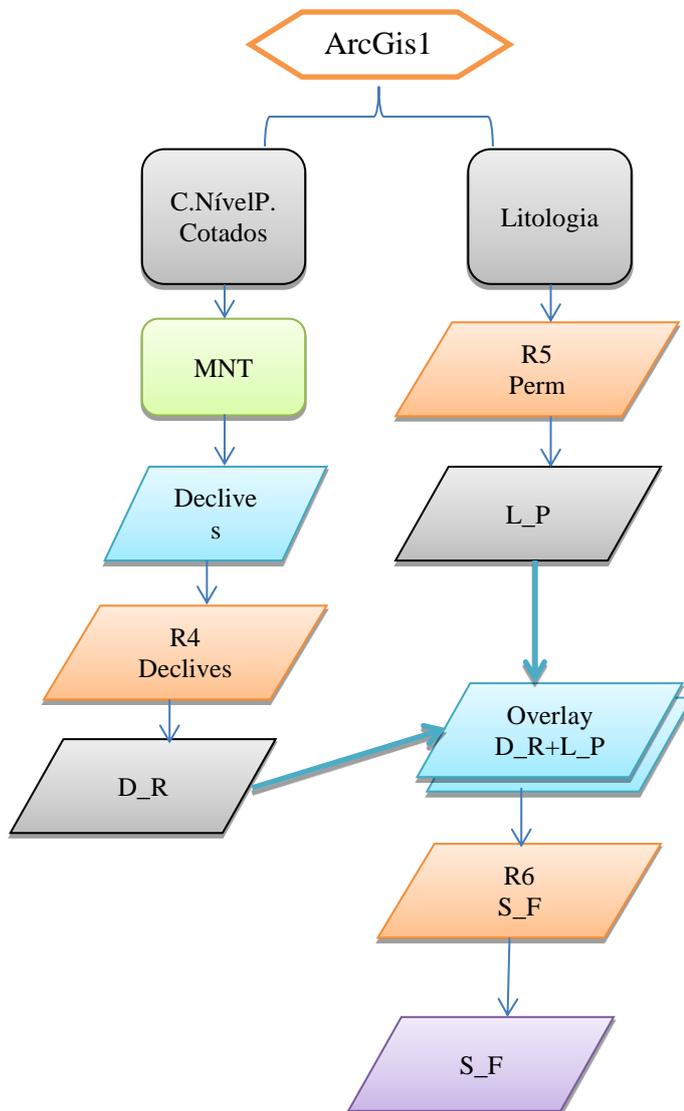


Figura 4.11. Fluxograma para o cálculo da suscetibilidade física à inundação.

Na análise social utiliza-se a densidade demográfica e os *hot-spots* constituídos por polícia, bombeiros, câmaras municipais e refúgios sociais (infantários e lares de idosos). Não foram identificados outros *hot-spots* vulneráveis à inundação na área de estudo. Na análise económica utilizam-se dados de densidade de edifícios, ferrovias, rodovias e a carta de uso do solo COS 2007, discriminada segundo os tipos urbano (tecido urbano, indústria, comércio e transportes), agrícola, florestal e planos de água. Para a obtenção da vulnerabilidade, procede-se à adição de todos os parâmetros anteriormente descritos após a sua classificação. O método encontra-se detalhado no fluxograma apresentado na figura 4.12.

V\_S\_E – Vulnerabilidade social e económica.

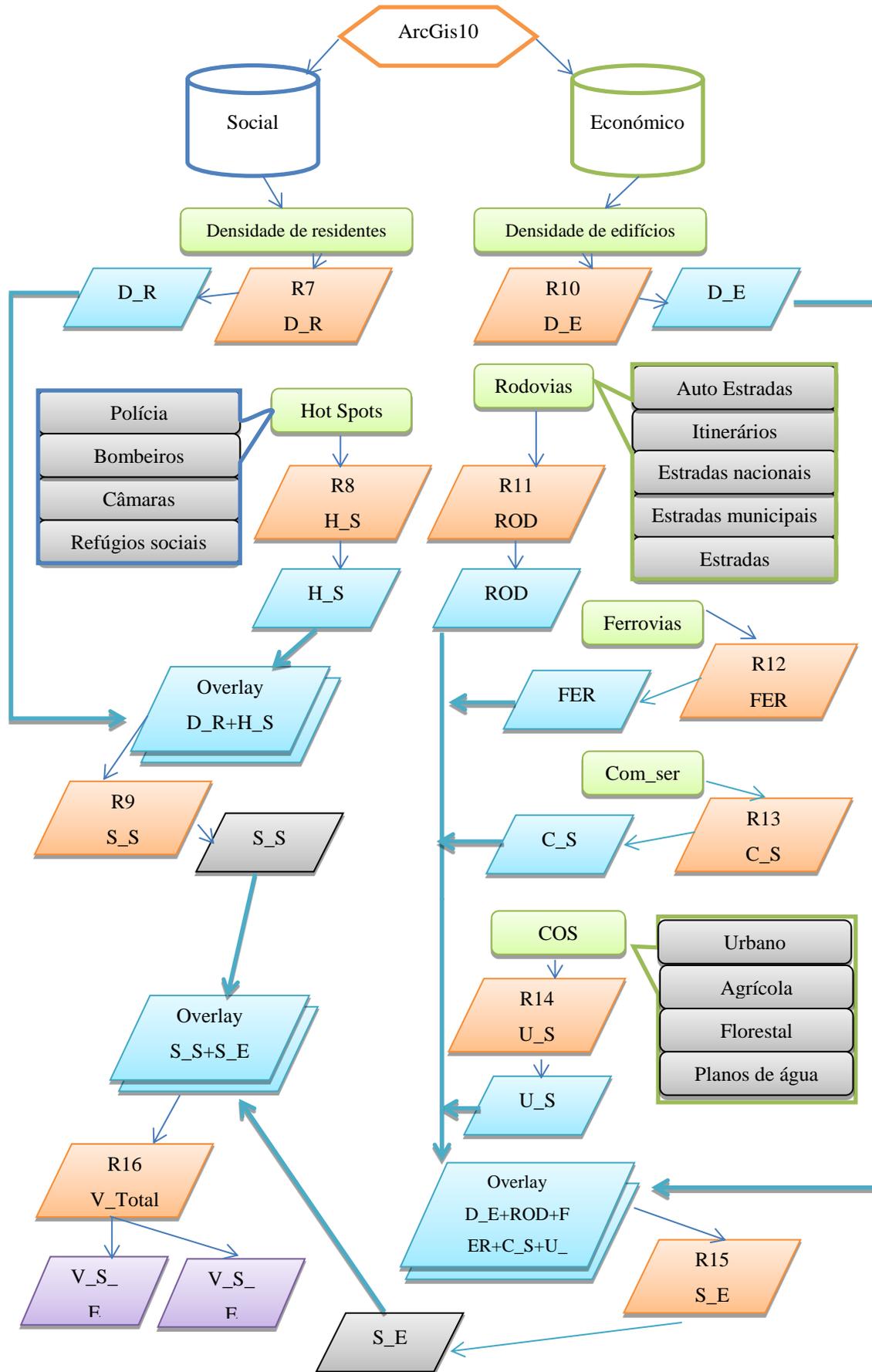


Figura 4.12. Fluxograma para o cálculo da vulnerabilidade social e económica.

#### **4.3.1. Definição dos critérios de classificação para o cálculo da perigosidade, vulnerabilidade e risco de inundação**

Para a análise da perigosidade, vulnerabilidade e risco de inundação, de acordo com a metodologia SIG criada, foi necessário estabelecer uma classificação dos dados matriciais de acordo com o peso a atribuir-lhes (código). Optou-se pela classificação da quase totalidade dos dados com base numa análise qualitativa de cinco classes (muito baixo ou nulo, baixo, moderado, elevado e muito elevado, correspondentes, respetivamente, a um código entre 1 e 5), excetuando os dados lineares e pontuais (e.g ferrovias, *hot-spots* e comércio/serviços), onde a análise é do tipo booleana. Pela importância que se pretende que representem no cálculo, quando estão ausentes atribuiu-se-lhes o valor 0 e quando estão presentes atribuiu-se-lhes o valor 5. Este processo multicritério empírico pretende ser simples, rápido de executar e, acima de tudo, coerente e eficaz. Contudo, para a maioria dos critérios intervenientes na análise, as classificações basearam-se em pressupostos claros e científicos. A título de exemplo, passa a explicar-se quais os raciocínios utilizados para a atribuição dos pesos/classes de alguns dados intervenientes na análise:

- relativamente aos mapas da profundidade e velocidade utilizados no cálculo da perigosidade foi considerado que os danos materiais e o perigo representado para as populações aumentam diretamente com a profundidade ou altura e velocidade atingida pela água. Considerou-se que uma profundidade até 25 cm de altura e uma velocidade até 1,5 m/s apresentam incómodo mas um perigo muito baixo, permitindo a fuga e a elevação de bens materiais. Um aumento da profundidade e velocidade para 50 cm e 3 m/s, respetivamente, representa um incómodo maior, mas com perigosidade baixa, continuando a permitir a elevação de bens materiais e não pondo em perigos vidas. No entanto, a partir de uma profundidade de 1,5 m e uma velocidade de 4,5 m/s (16,2 km/h), o perigo é elevado, tornando-se extremamente difícil a deslocação controlada sobre a água, podendo ser impossível a elevação ou remoção de bens materiais (tabela 4.11);
- quanto ao mapa de declives, até aproximadamente 2,5% praticamente não existe escorrência (Faria & Pedrosa, 2005) e esta só começa a existir para valores superiores. Esse facto indica claramente que as áreas aplanadas apresentam a maior probabilidade de ser inundáveis (classe de suscetibilidade

muito elevada), e que à medida que o declive vai aumentando a probabilidade do estabelecimento de lençóis de água vai-se reduzindo, até um declive aproximado de 15% (classe de suscetibilidade muito baixa), visto que a partir desta inclinação, mesmo considerando fatores de fixação como estruturas e vegetação, a água tende a escorrer para locais menos elevados (tabela 4.11);

- relativamente ao mapa litológico, a permeabilidade das unidades litológicas encontra-se bem estudada e documentada, embora não se tenham encontrado valores específicos para as unidades litológicas representadas no mapa. No entanto, segundo os níveis de fracturação, porosidade, compactidade, granulometria e presença de argila, características dos diferentes constituintes litológicos, é possível inferir uma classificação. Atribuiu-se a classe de permeabilidade muito baixa aos xistos e grauvaques, pelo elevado teor de argila, a classe baixa às rochas ígneas e metamórficas, pela sua elevada compactidade mesmo com elevado grau de meteorização e fracturação, correspondendo, em contrapartida, as classes de permeabilidade elevada aos depósitos de vertente, arenitos e conglomerados, e muito elevada aos aluviões, pela baixa compactidade e granulometria elevadas (tabelas 4.11 e 4.12).
- quanto ao uso do solo (COS2007) apenas foram criadas quatro classes. Os critérios para a atribuição das classes basearam-se em pressupostos económicos, sociais e ambientais, tendo-se atribuído ao tipo urbano a classe de vulnerabilidade muito elevada, considerando os maiores valores económicos e sociais presentes. O tipo de uso agrícola inseriu-se na classe de vulnerabilidade moderada, pela perda das culturas e respetivo valor económico que as mesmas representam para os agricultores. O florestal inseriu-se na classe de vulnerabilidade baixa, considerando algum impacto ambiental para o ecossistema florestal. Os tipos de uso correspondentes às áreas alagadas e planos de água terão um impacto muito baixo, considerando que, de certa forma, o aumento do nível da água poderá contribuir para a limpeza de poluentes acumulados nos canais e até beneficiar os ecossistemas paludícolas, pelo que lhes foi atribuída a classe de vulnerabilidade muito baixa (tabela 4.13).

No processo de reclassificação dos mapas finais, i.e. resultantes do produto de outros mapas por análise algébrica (e.g. perigosidade total, suscetibilidade física,

vulnerabilidade, risco), optou-se pela aplicação de classes com intervalos equivalentes, adaptados segundo a amplitude da escala.

Este tipo de aplicação intervalar regular da classificação teve como objetivo principal a tentativa de seguir sempre o mesmo método de classificação, sem alterar em nenhum dos mapas a expressão de determinados dados em detrimento de outros, por forma a não correr o risco de evidenciar demasiado nenhum dos parâmetros em análise. Desta forma, o método empenhado baseou-se na divisão do total de classes do mapa em cinco classes iguais.

A tabela 4.11 identifica as classificações estabelecidas para todos os conjuntos de dados intervenientes no processo ( $R_1, R_2, R_3, \dots R_n$ ).

Para melhor compreensão da metodologia, pode analisar-se esta tabela conjuntamente com as tabelas 4.12 e 4.13, bem como com os fluxogramas da metodologia respeitantes à análise da perigosidade, vulnerabilidade e risco de inundação, que constam das figuras 4.9 a 4.12.

Tabela 4.11. Valores e intervalos utilizados na (re)classificação de mapas.

Classificação/reclassificação	Código	Classificação qualitativa
<b>R1 – Profundidades (m)</b>		
0 - 0,25	1	Muito baixa ou nula
0,25– 0,50	2	Baixa
0,50 – 1,50	3	Moderada
1,50 – 6	4	Elevada
>6	5	Muito elevada
<b>R2 – Velocidades (m/s)</b>		
0 – 1,5	1	Muito baixa ou nula
1,5 – 3	2	Baixa
3 – 4,5	3	Moderada
4,5 – 6	4	Elevada
>6	5	Muito elevada
<b>R3 – Perigosidade</b>		
0 – 2	1	Muito baixa ou nula
2 – 4	2	Baixa
4 – 6	3	Moderada
6 – 8	4	Elevada
>8	5	Muito elevada
<b>R4 – Declives (%)</b>		
0 – 2,5	5	Muito elevada
2,5 – 5	4	Elevada
5 – 7,5	3	Moderada
7,5 – 15	2	Baixa
>15	1	Muito baixa ou nula
<b>R5 – Permeabilidade da litologia*</b>		
1	5	Muito elevada
2	4	Elevada
3	3	Moderada
4	2	Baixa
5	1	Muito baixa ou nula
<b>R6 – Suscetibilidade física</b>		
0 – 2	1	Muito baixa ou nula
2 – 4	2	Baixa
4 – 6	3	Moderada
6 – 8	4	Elevada
>8	5	Muito elevada
<b>R7 – Densidade residentes (Res/ha)</b>		
0 – 5	1	Muito baixa ou nula
5 – 25	2	Baixa
25 – 75	3	Moderada
75 – 150	4	Elevada
>150	5	Muito elevada
<b>R8 – <i>Hot-spots</i></b>		
ausente	0	Ausência
presente	5	Presença

(Continua na página seguinte)

(Continuação da página anterior)

<u>Classificação/reclassificação</u>	<u>Código</u>	<u>Classificação qualitativa</u>
R9 – Suscetibilidade social		
0 - 1.5	1	Muito baixa ou nula
1.5 - 3	2	Baixa
3 - 4.5	3	Moderada
4.5 - 6	4	Elevada
>6	5	Muito elevada
R10 – Densidade edifícios (Edif/ha)		
0 – 10	1	Muito baixa ou nula
10 – 25	2	Baixa
25 – 50	3	Moderada
50 – 100	4	Elevada
>100	5	Muito elevada
R11 – <u>Rodovias</u>		
Autoestradas	5	Muito elevada
Itinerários principais	4	Elevada
Estradas nacionais	3	Moderada
Estradas municipais	2	Baixa
Estradas secundárias	1	Muito baixa ou nula
R12 – <u>Ferrovias</u>		
ausente	0	Ausência
presente	5	Presença
R13 – Comércio e serviços		
ausente	0	Ausência
presente	5	Presença
R14 – Uso do solo**		
1.Urbano	5	Muito elevada
2.Agrícola	3	Moderado
3.Florestal	2	Baixo
4. e 5.Planos de água	1	Muito baixa ou nula
R15 – Suscetibilidade económica		
0 - 2	1	Muito baixa ou nula
2 - 3	2	Baixa
3 - 4	3	Moderada
4 - 5	4	Elevada
>5	5	Muito elevada
R16 – Vulnerabilidade SE		
0 - 2	1	Muito baixa ou nula
2 - 3	2	Baixa
3 - 4	3	Moderada
4 - 5	4	Elevada
>5	5	Muito elevada
R17 – <u>Risco</u>		
0,0001 – 3	1	Muito baixo ou nulo
3 – 6	2	Baixo
6 – 9	3	Moderado
9 – 12	4	Elevado
>12	5	Muito elevado

Tabela 4.12. Classificação dos tipos litológicos com base na sua permeabilidade.

<b>* - Permeabilidade da litologia</b>	<b>Código</b>
Xistos, grauvaques (complexo xisto-grauváquico)	1
Xistos, grauvaques	1
Xistos, anfibolitos, micaxistos, grauvaques quartzitos, (...),gneisses	1
Xistos argilosos, grauvaques, arenitos	1
Rochas carbonatadas	2
Quartzitos	2
Pórfiros graníticos	2
Microgranitos	2
Grés vermelhos de Silves, conglomerados, margas, calcários, (...)	3
Granitos e rochas afins	2
Gabros	2
Depósitos de vertente, areias coluviais e de terraço	4
Conglomerados, arenitos, calcários dolomíticos, margosos e margas	3
Conglomerados, arenitos, calcários brancos, margas avermelhadas	3
Calcário, calcário dolomítico, calcário margoso e margas	3
Arenitos, conglomerados, calcários dolomíticos, margosos e margas	4
Arenitos, calcários mais ou menos margosos, areias, cascalheiras, (...)	4
Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados	5
Areias e cascalheiras	5
Aluviões	5

Tabela 4.13. Classificação dos tipos de ocupação do solo (nível 1, COS2007).

<b>** – Uso do Solo (COS2007)</b>	<b>Código</b>
1.1.Tecido urbano	5
1.2.Indústria, comércio, transportes	5
1.3.Extracção de inertes, deposição de resíduos e estaleiros	5
1.4.Espaços verdes urbanos, equipamentos desportivos, culturais, de lazer e zonas históricas	5
<b>1 Urbano</b>	<b>5</b>
2.1.Culturas temporárias	3
2.2.Culturas permanentes	3
2.3.Pastagens permanentes	3
2.4.Áreas agrícolas homogéneas	3
<b>2 Agrícola</b>	<b>3</b>
3.1.Florestas	2
3.2.Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea	2
3.3.Zonas descobertas e com pouca vegetação	2
<b>3 Florestal</b>	<b>2</b>
4.1.Zonas húmidas interiores	1
5.1.Águas interiores	1
<b>4 e 5 Planos de água</b>	<b>1</b>

### 4.3.2. Definição de caudais para diferentes probabilidades de ocorrência e períodos de retorno

A perigosidade e o risco de inundação são normalmente associados a um determinado período de retorno, que é tanto maior, e conseqüentemente mais danoso, quanto maior for esse período de retorno, ou seja, será de esperar valores mais extremos de caudal num período de retorno longo (maior ou igual a 100 anos). Contrariamente, em períodos de retorno inferiores, a probabilidade de ocorrência de valores extremos será mais reduzida.

A maioria dos investigadores contemporâneos do ramo da hidrologia, especialmente os engenheiros, tendem a definir inundações em termos de probabilidade, expressa em percentagem, preferencialmente à utilização do termo período de retorno (intervalo de recorrência). Contudo, segundo o cálculo do período de retorno de uma inundação (T), este é inverso à probabilidade (P) de ocorrência de um determinado valor, ou seja:

$$T = \frac{1}{P} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Assim, uma inundação com um período de retorno de 100 anos é comumente expressa como uma inundação com a probabilidade de ocorrência de 0,01 (1% de hipótese de ser excedido num determinado ano, dos 100). Estes dados estatísticos relacionam o grau de risco, representado por cartografia de risco, com uma determinada probabilidade e/ou frequência, de forma a induzir no leitor/analista, a noção da excecionalidade do fenómeno representado.

Existem vários métodos e fórmulas estatísticas que podem ser utilizadas para o cálculo da probabilidade e período de retorno. Contudo, de acordo com Fisher-Typpett (1927), *in* Miranda & Baptista (2006), existem apenas três distribuições que podem ser utilizadas para a representação dos valores extremos, dentro de condições razoáveis: Gumbel, Weibull e Frechet.

A precisão do cálculo estatístico é tanto maior quanto mais numerosos forem os dados disponíveis para a análise. Além disso, para que os resultados sejam o mais coerente possíveis, o número de registos utilizados na análise estatística deve ser

superior ao período de retorno para o qual se pretende obter os resultados. Todavia, por motivo de inexistência, ou inacessibilidade, não foi possível aceder a um conjunto de registos dos caudais máximos instantâneos anuais para todas as estações de interesse, para um mesmo período de tempo o mais alargado possível, como atrás já foi explicado.

Os dados obtidos foram registados nas estações de Tramagal e Almourol, e reportam a um período temporal de 30 anos (tabela 4.7).

Para obtenção dos caudais correspondentes aos períodos de retorno estipulados, 100 anos (P=1%) e 10 anos (P=10%), optou-se pela utilização do método de Gumbel, segundo PONCE (1989), pelo acesso fácil a uma folha de cálculo *online* (<http://ponce.tv/onlinegumbel2.php>), predefinida segundo a formulação abaixo descrita.

A distribuição de Gumbel (Ponce, 1989) é expressa por:

$$P(X \geq x) = 1 - e^{-e^{-y}} \quad \text{Eq. 4.4}$$

onde,

$P(X \geq x)$  - probabilidade de um valor extremo qualquer X da série ser maior ou igual a x;

y - variável reduzida ou variável Gumbel.

A partir das equações 4.3 e 4.4 é possível obter:

$$y = -\ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right) \quad \text{Eq. 4.5}$$

Os caudais podem ser estimados pela equação de Ven Te Chow (Ponce, 1989), que mostrou que a maioria das funções de frequência teóricas aplicáveis na análise hidrológica podem ser resolvidas por:

$$X = \bar{X} - K\sigma_x \quad \text{Eq. 4.6}$$

onde:

X - caudal estimado;

$\bar{X}$  - média dos valores extremos observados X;

$\sigma_x$ - desvio padrão das variáveis X;

K - fator de frequência, que depende do número de valores extremos que constituem a série ( $n$ ) e do período de retorno (T), e é expresso por:

$$K = \frac{y - \bar{y}_n}{\sigma_n} \quad \text{Eq. 4.7}$$

Os valores de  $\bar{y}_n$  e  $\sigma_n$  encontram-se listados no anexo 2, em função do período de observação  $n$ . Neste trabalho consideraram-se os valores de 0,5362 e 1,1124 respetivamente.

Assim, os caudais são calculados pela expressão (Ponce, 1989):

$$X = \bar{X} - \left( \frac{-\ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right) - \bar{y}_n}{\sigma_n} \right) \times \sigma_x \quad \text{Eq. 4.8}$$

e os resultados obtidos encontram-se registados na tabela 4.14.

Tabela 4.14. Caudais obtidos para os períodos de retorno de 10 anos e 100 anos, nas estações de Tramagal e Almourol (segundo o método de Gumbel).

	Almourol		Tramagal	
	10	100	10	100
Período de retorno (Anos)	10	100	10	100
Probabilidade (%)	10	1	10	1
Caudais (m <sup>3</sup> /s)	8478	15539	7330	13305

No caso da estação de Belver, que corresponde à barragem com o mesmo nome, não existem dados contínuos dos caudais instantâneos máximos anuais para o mesmo período. Contudo, considerando um possível cenário, extremo, optou-se por atribuir a esta estação o valor da capacidade máxima de vazão da barragem. Para um PR de 100 anos assumiu-se um caudal máximo de 16 500 m<sup>3</sup>/s e para um PR de 10 anos um caudal máximo de 8 250 m<sup>3</sup>/s.

Esta opção é justificável num cenário como o que a seguir se descreve: suponha-se a possibilidade de a grande barragem espanhola de Alcântara estar na sua capacidade máxima, assim como as barragens portuguesas de Fratel e Belver. Um padrão meteorológico com precipitações intensas e prolongadas pode aumentar de forma rápida, e bem consistente, o volume de água disponível na bacia hidrográfica do

Tejo e, por consequência, o caudal do rio. Se por motivos de segurança a barragem de Alcântara fosse obrigada a descarregar um grande volume de água, as barragens de Fratel e Belver, a jusante, ao receberem um grande volume de água, também por motivos de segurança, poderiam ter de libertá-la até atingir o valor máximo de vazão respetivo. Este cenário, com influência antrópica, não deve ser desprezado, visto que uma falha humana deste tipo poderá vir a ocorrer, pelo que se optou pela sua aplicação, tanto mais que na análise do risco são relevantes os cenários extremos possíveis.

#### **4.3.3. Simulação de inundações para os cenários com probabilidade de ocorrência de 10% e 1%**

Posteriormente à calibração e validação do modelo, procedeu-se à simulação para os períodos de retorno de 10 anos e 100 anos, com as probabilidades de ocorrência de 10% e 1%, respetivamente, calculados no ponto anterior.

Os dados de entrada necessários para a simulação numérica da inundação em fluxo permanente, no HEC-RAS, expressos no fluxograma de análise da perigosidade (Fig. 4.10), dizem respeito aos dados geométricos, aos dados hidrológicos, às condições de contorno e aos valores do coeficiente de rugosidade de Manning.

Em baixo descreve-se a sequência de processos necessária para a obtenção da simulação hidrológica:

No *software* HEC-RAS, criou-se um novo projeto (Tejo\_b\_vnb\_f). De seguida procedeu-se à importação dos dados geométricos “Gemetria\_tejo\_f”, criados anteriormente em ambiente ArcGis / HEC-GEORAS, através do comando *Import geometry data* do menu *file* do módulo *Geometric data* (Fig. 4.13).

Ainda no painel *Geometric data*, no menu *Tables*, comando *Manning's n or k values* foram inseridos os valores *n* de Manning finais, resultantes dos vários processos de calibração, para cada uma das estações consideradas. Os valores *n1* correspondem à margem esquerda, *n2* ao centro do canal e *n3* à margem direita, respetivamente. Foram mantidos os valores do coeficiente de contração/expansão utilizados por defeito pelo HEC-RAS.

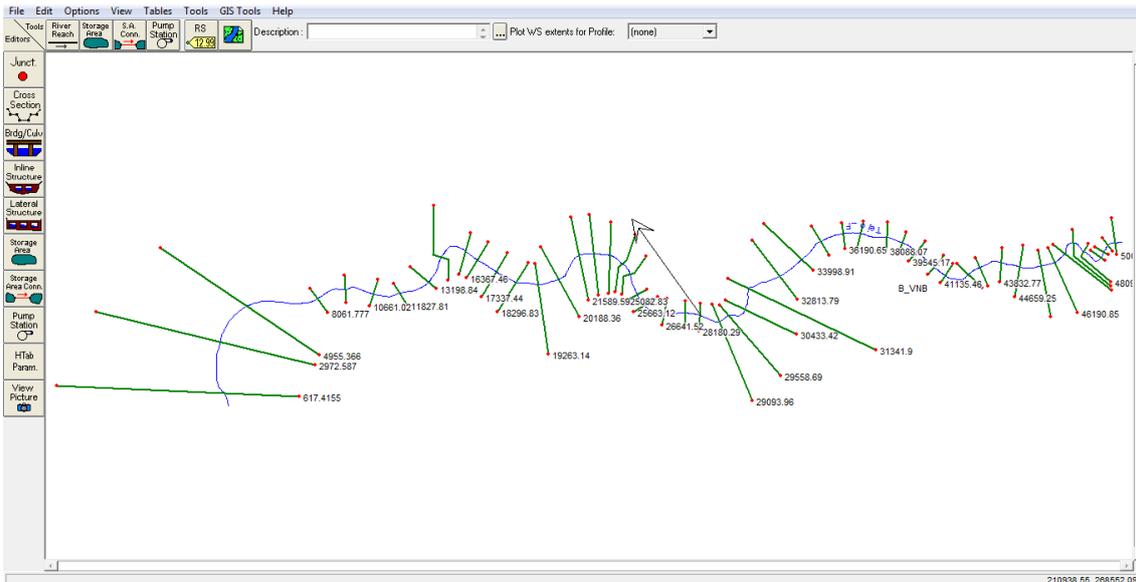


Figura 4.13. Painel Geometric HEC-RAS: dados geométricos.

O próximo passo diz respeito à inserção dos dados hidrológicos e condições de contorno. Para isso, no *software* HEC-RAS, no painel *Steady Flow Data* (Fig. 4.14), inseriram-se três estações, tendo-se selecionado o rio (Tejo\_f) e o troço (B\_VNB), a partir das quais serão feitos os cálculos de simulação de inundação (Belver, Tramagal e Almourol), onde foram colocados os valores dos caudais obtidos durante a inundação de 1979 e para as probabilidades de retorno de 1% e 10%. No campo *Steady Flow Boundary Conditions*, no parâmetro *Down stream* inseriu-se o declive aproximado do rio a jusante do troço em análise (0.039%). De seguida guardou-se a informação hidrológica (*Steady Flow*), à qual se deu o nome *Flow\_data\_tejo\_f*.

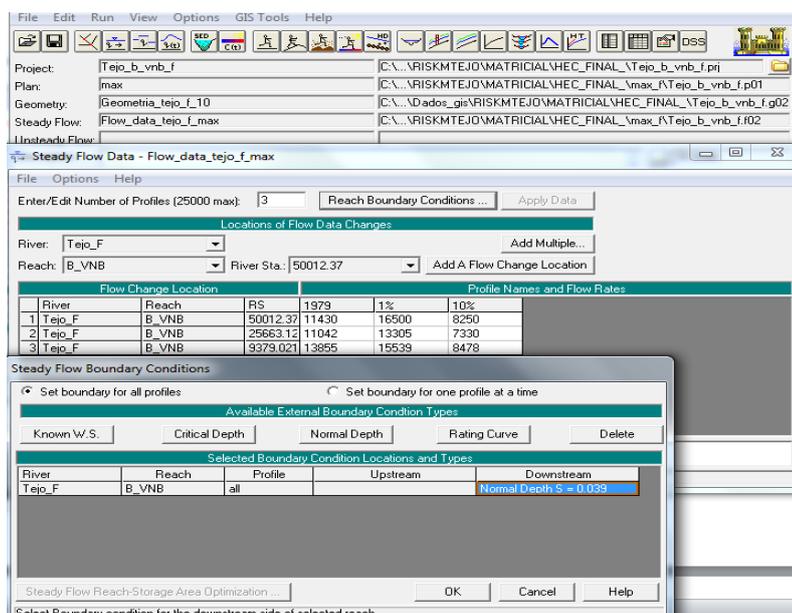


Figura 4.14. Painel *Steady flow data*: dados dos caudais e das condições de contorno.

Inseridos os dados de *input* necessários ao cálculo da inundação no HEC-RAS, procedeu-se à simulação, através do campo *Compute* do painel *Perform a Steady Flow Simulation*, cujo resultado se designou *Plan\_tejo\_f10*.

O próximo passo consistiu em guardar o projecto HEC-RAS e proceder à sua exportação para o software HEC-GEORAS (Export GIS data), de acordo com o painel apresentado na figura 4.15.

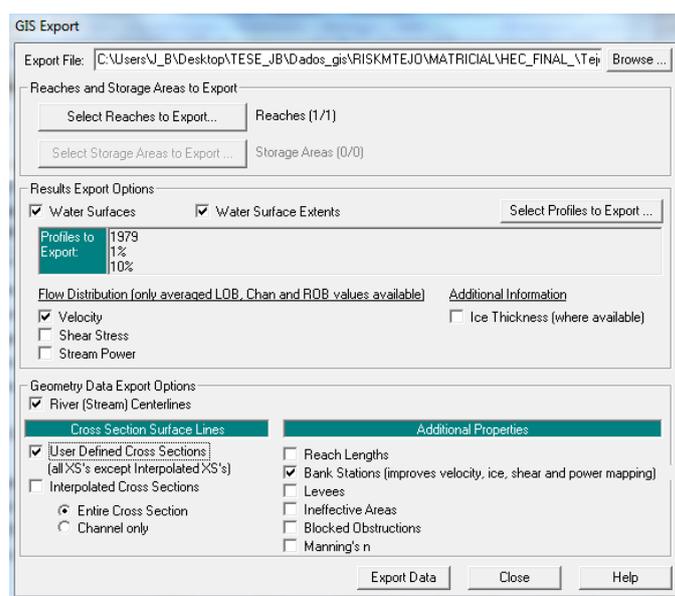


Figura 4.15. Painel *Gis Export*: opções para a exportação dos dados para formato Gis (HEC-GEORAS).

No painel de exportação seleccionam-se as opções de exportação pretendidas, que neste caso são os dados da profundidade, extensão e velocidade da água, para as probabilidades de 1% e 10%.

Já no ArcGis, na extensão HEC-GEORAS, o passo seguinte consistiu na conversão do ficheiro exportado do HEC-RAS, do formato RAS SDF File para RAS XML File, para o qual se utilizou a ferramenta *Convert RAS Export SDF to XML*. O menu a utilizar no processo de simulação é o *RAS Mapping*. No submenu *Layer Setup* procede-se a nomeação de uma nova análise, selecciona-se a fonte altimétrica, neste caso o MDE anteriormente desenvolvido, a pasta onde serão guardados os resultados e escolhe-se a dimensão do pixel que, por defeito é de 20 metros. Contudo, para que os resultados possam ser analisados com as restantes matrizes, e para que o rigor seja superior, optou-se por adotar um pixel de 10 metros por 10 metros.

O passo seguinte prende-se com a importação do ficheiro RAS, para proceder ao processamento dos dados propriamente ditos, seguindo uma sequência de passos

automatizados que permitem a posterior simulação da inundação. A janela correspondente (Fig.4.16) vai dando informação acerca dos processos desenvolvidos e do seu estado de sucesso, reportando, se for caso disso, os erros encontrados.

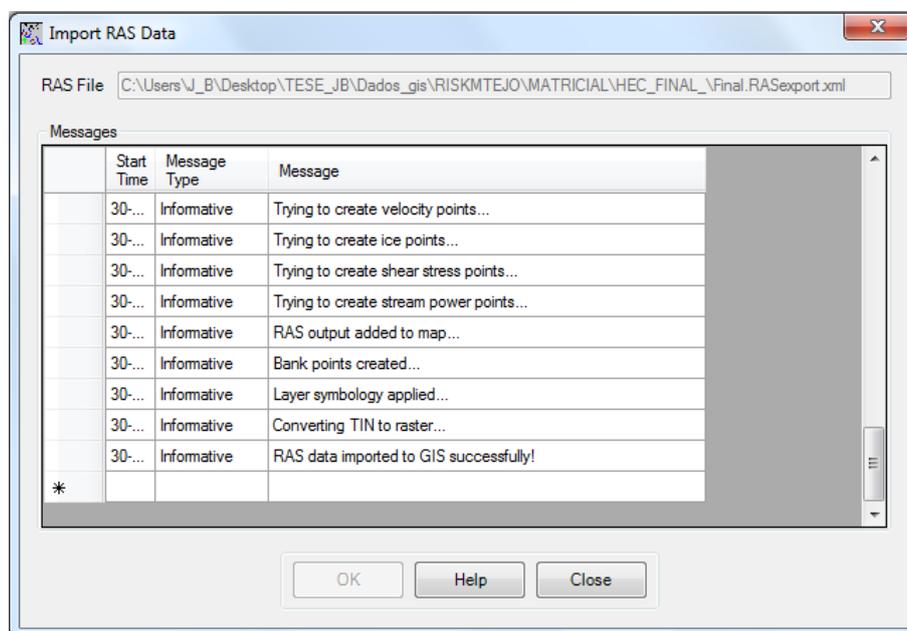


Figura 4.16. Painel *Import RAS data*: procedimento de importação e processamento dos dados.

Esta componente desenvolve uma sequência automatizada de processos, nomeadamente a transformação e validação de formatos, criação de base de dados (*Geodatabase*), criação das *feature classes* extensão, profundidade, velocidade e secções transversais 3D, importação dos dados de RAS para GIS, adição ao mapa de dados de saída RAS, conversão do MDE em RASTER e, finalmente, a verificação e validação dos processos. Após processamento de todos os dados necessários para o desenvolvimento da cartografia matricial de profundidade e velocidade, no submenu *Inundation Mapping*, procede-se à geração da superfície de água através do comando *Water Surface Generation*, obtendo-se como resultado final um modelo digital de superfície desenvolvido com base nas cotas de altura atingida pela água e um conjunto de dados vetoriais relativos à extensão e velocidades atingidas pela inundação, (Fig. 4.17).

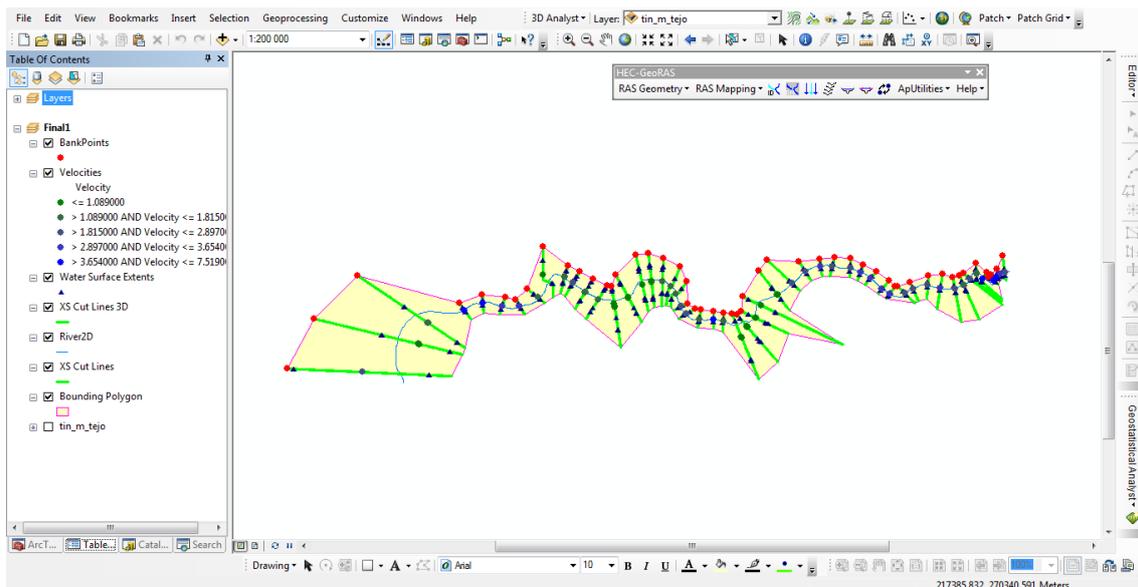


Figura 4.17. ArcGIS: dados vetoriais obtidos da simulação (extensão, velocidade, perfis, etc.).

Posteriormente, no mesmo submenu, no campo *Flood Plain Delineation Using Rasters*, procede-se finalmente à geração do raster referente à extensão e profundidade média atingida pela água, para o cenário previamente selecionado. Neste caso foram gerados, primeiro, os dados referentes à probabilidade de ocorrência de 1% e, posteriormente, à de 10% (Fig. 5.2).

Para finalizar processam-se os *rasters* referentes à velocidade média da água. Para tal, no submenu *Velocity Mapping*, procede-se, em separado, à simulação dos mapas de velocidade para a probabilidade de retorno de 1% e 10% respetivamente (Fig. 5.3).

Terminou-se assim o processo referente à simulação de inundações para os cenários de 1% e 10% de probabilidade de ocorrência no *software* HEC-RAS/HEC-GEORAS, ficando agora, os dados produzidos, aptos a serem processados em ArcGIS. A título de exemplo, nas figuras 5.2 e 5.3, são apresentados os dados da profundidade e velocidade, para a probabilidade de ocorrência de 1% e 10%, obtidos a partir do processo de simulação da inundação.

#### 4.3.4. Perigosidade

Obtidos os mapas referentes à profundidade e à velocidade, para os cenários de inundação referentes à probabilidade de ocorrência de 1% e 10%, no

HEC-RAS/HEC-GEORAS, procedeu-se à sua reclassificação de acordo com os valores estipulados na tabela 4.11.

Os mapas de profundidade e velocidade obtidos do HEC-RAS/HEC-GEORAS, vêm no formato *raster* e ainda que a sua visualização seja possível em ArcGis, é produzido um *bug* que não permite que esses dados sejam manipulados, não tendo, por isso, sido possível proceder à sua reclassificação imediata. Para contornar esse problema foi necessário proceder à sua exportação para formato *tiff* (*Tagged Image File Format*).

Em ambiente SIG, no *software* ArcGis, através das ferramentas *Reclassify* e *Raster calculator*, procedeu-se às (re)classificações e aos cálculos algébricos, entre matrizes.

Visto que os dados de entrada apenas apresentam a extensão da inundação e que a área de trabalho é o limite do Médio Tejo, será necessário alargar o mapa para esse limite. Para essa finalidade atribui-se o valor 0 aos pixels sem dados (*no data* = 0). No comando *environments*, na opção *processing extend*, seleciona-se a área sobre a qual se pretende efetuar a reclassificação, tendo-se selecionado, para esse efeito, uma área retangular maior que o limite recortado do Médio Tejo. Ainda no comando *environments*, na opção *raster analysis*, atribuiu-se a medida de pixel a utilizar e, mediante a seleção de um mapa *raster* desenvolvido para toda a área de estudo (e.g. densidade de edifícios/ha Médio Tejo), ordenou-se que essa área servisse para delimitar espacialmente, através de recorte (*mask*), o mapa reclassificado de saída.

Reclassificado e guardado o mapa da profundidade de inundação para o cenário de probabilidade de ocorrência de 1%, repetiu-se o procedimento para os mapas de velocidade, para o cenário de 1%, e profundidade e velocidade para o cenário de probabilidade de ocorrência de 10%.

De acordo com a metodologia de análise da perigosidade desenvolvida (Fig.4.10), a perigosidade resulta da adição dos mapas reclassificados da profundidade com a velocidade atingida pelas inundações previstas para os cenários de probabilidade de ocorrência de 1% e 10% (100 anos e 10 anos de período de retorno), pelo que o próximo passo diz respeito à soma dos mapas da perigosidade e velocidade, para dos diferentes cenários, e posteriores reclassificações de acordo com a tabela 4.11. Para o efeito recorreu-se à ferramenta *raster calculator*. O resultado da operação origina duas matrizes preliminares de perigosidade: uma referente ao cenário de 1% de probabilidade, com 10 classes, e outra referente ao cenário de 10% de probabilidade, com 9 classes. Após nova reclassificação (*reclassify*), de acordo com os valores

apresentados na tabela 4.11 (5 classes de perigosidade) obtém-se o mapa de perigosidade (Fig. 5.4), que será posteriormente operado com a suscetibilidade física, de modo a obter a perigosidade total (final).

#### **4.3.5. Suscetibilidade física**

A avaliação da suscetibilidade física da área em estudo representa um parâmetro importante na avaliação da perigosidade total que apresenta.

A suscetibilidade, como entendida neste trabalho, é composta pelos parâmetros físicos declive do terreno e permeabilidade das unidades litológicas que o compõem. Estes parâmetros são considerados importantes na análise da perigosidade total da inundação, tendo em consideração os seguintes aspetos:

- quanto menor o declive apresentado pelo terreno, (áreas aplanadas; inferior a 2,5%), maior será a probabilidade de o mesmo ser inundado, tendo em consideração a ausência de escorrência da água. À medida que o declive vai aumentando, entre 2,5% e 15%, a escorrência superficial vai aumentando, reduzindo, por isso, a capacidade de retenção de água nesse local. A partir dos 15% de declive, a capacidade de retenção de água, mesmo considerando a presença de vegetação e outras estruturas, é reduzida drasticamente, sendo por isso essas áreas menos propícias às inundações;
- relativamente à permeabilidade dos materiais litológicos estes também apresentam um papel relevante no processo de suscetibilidade à inundação. É sabido que diferentes tipos litológicos apresentam, conforme os materiais que os constituem, sua compacidade, grau de fracturação e granulometria dos seus constituintes, diferentes níveis de permeabilidade. Assim torna-se relevante a sua inserção na análise da perigosidade de inundação considerando que quanto mais impermeáveis forem os materiais geológicos de uma determinada área maior será a suscetibilidade de a mesma ser inundada.

A conjugação destes dois fatores, em certas condições, poderá favorecer, ou contrariar de forma bastante relevante, a probabilidade de inundação de determinada

área, onde, por exemplo, se conciliem declives suaves com litologias impermeáveis ou, pelo contrário, se conjugue um elevado declive com uma litologia altamente permeável.

O primeiro passo a seguir para a avaliação da suscetibilidade física foi a elaboração de uma carta de declives. Para essa finalidade utilizou-se a ferramenta *slope* da extensão *3D Analyst*, em ArcGis. O Mapa de declives é produzido de forma automatizada e é processado com base no MDE desenvolvido anteriormente. Considerando a vasta extensão da área de estudo e a quantidade de cartas matriciais representativas dos parâmetros em análise, optou-se por um pixel com dimensão 10 m x 10 m, de modo a garantir o seu processamento no equipamento disponível, assim como a manutenção da mesma resolução em todos os mapas para que se possa proceder às operações algébricas necessárias. Obtido o mapa de declives, procedeu-se à sua reclassificação com base nos intervalos de classes estipulados na tabela 4.11 (Fig. 5.5).

De seguida procedeu-se à criação do mapa de suscetibilidade à inundação com base na permeabilidade litológica, mediante conversão (*feature to raster*) do mapa inicial, com base nos valores do atributo permeabilidade, classificados de acordo com os valores respetivos apresentados na tabela 4.11 (Fig. 5.6).

De acordo com a metodologia proposta na figura 4.11, procedeu-se à adição algébrica dos mapas de suscetibilidade obtidos a partir dos mapas de declives e permeabilidade litológica, da qual resultou o mapa de suscetibilidade física à inundação apresentado na figura 5.7, classificado de acordo com os valores da tabela 4.11.

#### **4.3.6. Vulnerabilidade socioeconómica**

De acordo com a metodologia desenvolvida, na análise da vulnerabilidade socioeconómica são relacionados os seguintes parâmetros: na componente social utilizam-se os dados relativos à demografia (densidade de residentes/ha, por subsecção estatística) e *hot-spots* (polícia, bombeiros, câmaras municipais e refúgios sociais). Os *hot-spots* foram inventariados e vetorizados manualmente, tendo sido apenas utilizados os pontos críticos localizados dentro da área inundável de acordo com os cenários de inundação estudados.

Para a análise da componente económica foram relacionados os seguintes dados: densidade de edifícios/ha, por subsecção estatística, rodovias classificadas em

autoestradas, itinerários principais, estradas nacionais, estradas municipais e estradas secundárias, ferrovias (vetorizadas sobre fotografia aérea do servidor Bing Maps) classificadas em presentes e ausentes relativamente à área inundada, comércio e serviços, classificados em presentes e ausentes na área inundada, e a carta de ocupação do solo COS 2007, dividida nas classes urbana, agrícola, florestal e áreas alagadas e planos de água. Relembra-se que todos os dados e as respetivas fontes estão documentados nas tabelas 4.9 e 4.10.

Para a criação dos dados acima referidos, procedeu-se inicialmente à pesquisa bibliográfica e no servidor WebSig da Comunidade Intermunicipal do Médio Tejo (<http://sig.mediatejo.pt/>), seguida da sua inventariação/confirmação no terreno. Posteriormente, sobre as fotografias aéreas do servidor Bing Maps (Fig. 4.18), procedeu-se à respetiva localização e vectorização (linhas pontos e polígonos), complementada com a inserção dos atributos respetivos (nome e código).

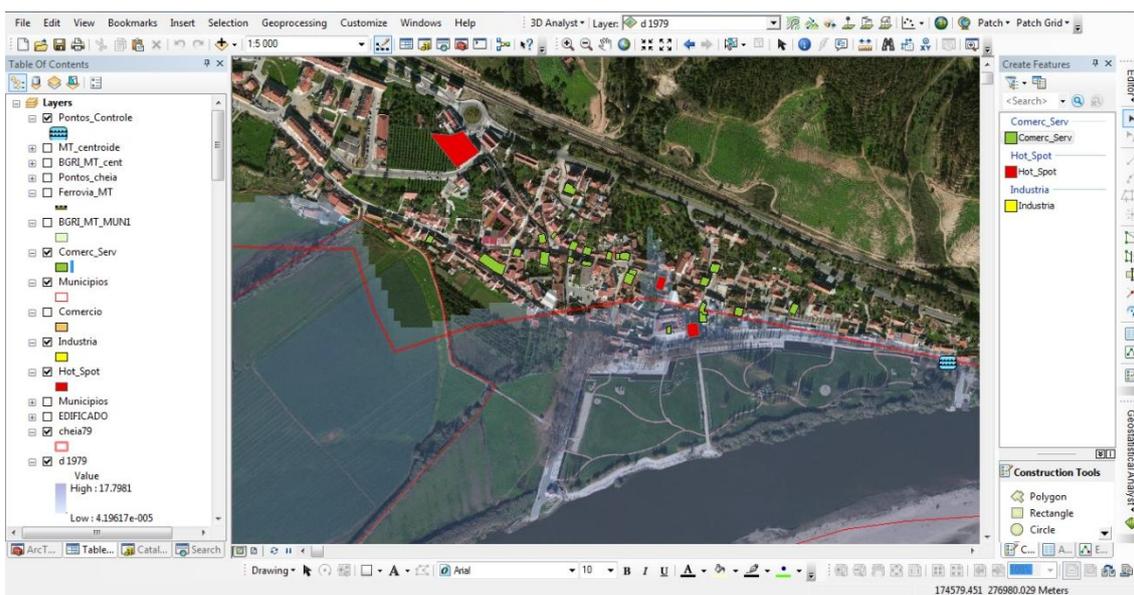


Figura 4.18. Vectorização de *hot-spots* (H\_S) e comércio/serviços (C\_S) na área de Vila Nova da Barquinha, sobre fotografia aérea do servidor Bing Maps, em ambiente ArcGis.

Quanto às densidades de residentes e de edifícios, foram calculados com base nos valores publicados pelo INE (<http://mapas.ine.pt>), aplicando a ferramenta *field calculator* (residentes por hectare e edifícios por hectare). Estes temas em modelo vetorial, foram posteriormente convertidos num modelo matricial, com pixel de 10 m x 10 m, a partir dos valores acima referidos, e reclassificados conforme os valores que constam na tabela 4.11.

Relativamente aos *hot-spots*, ferrovias e comércio e serviços, posteriormente à sua criação e validação também se converteram para o formato matricial, utilizando para o efeito uma classificação do tipo booleana (presentes ou ausentes da área inundável). Considerando a importância que estes representam na análise da vulnerabilidade, foi-lhes atribuído o código 5 (muito vulnerável) quando presentes e, o código 0 (sem vulnerabilidade) quando ausentes. Para que estes pudessem ser operados no modelo foi necessário convertê-los no formato *raster*, tendo-se utilizado para esse fim a ferramenta *polygon to raster*, através do método *maximum combined area*, que define a forma como serão atribuídos os valores contidos no campo código (listados na tabela 4.11) a cada célula da matriz. Este método procede a uma avaliação de todos os valores contidos dentro de cada célula, por forma a saber qual o valor que é mais representativo, para atribuir esse valor à célula. Foi ainda necessário, no comando *environments*, proceder, como anteriormente, à definição da área de cálculo *processing extent* e definir a área de corte (*mask*; Médio Tejo) e o tamanho de pixel em uso. A figura 4.19 apresenta, a título de exemplo, a matriz correspondente ao comércio/serviços na área de Vila Nova da Barquinha.

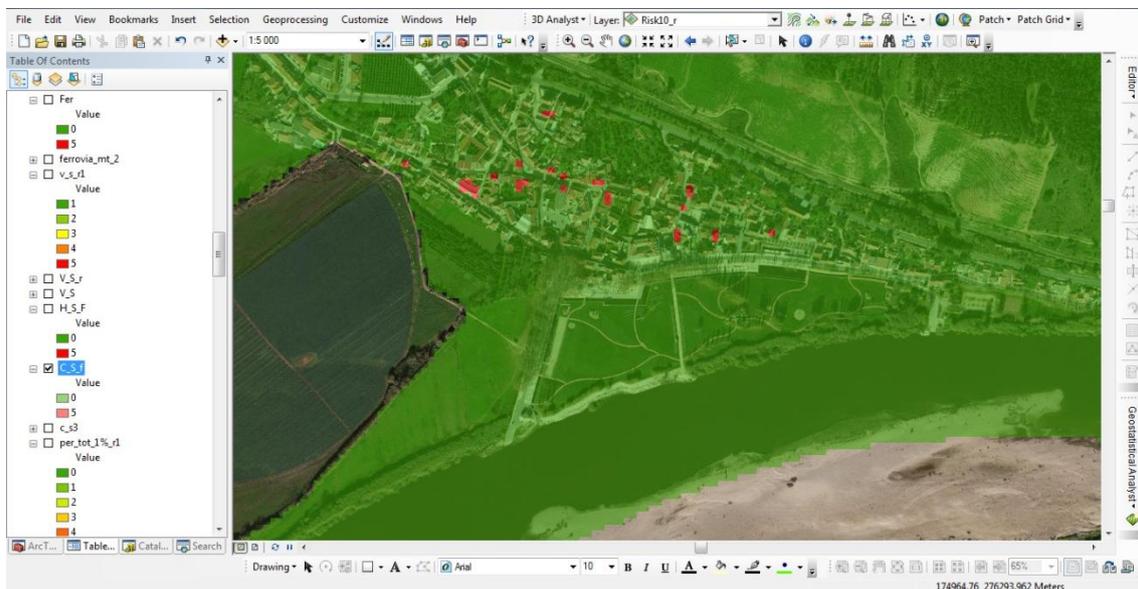


Figura 4.19. Matriz de comércio/serviços da área de Vila Nova da Barquinha.

Após a produção, validação, conversão para *raster* e classificação de todos os dados a inserir no cálculo da vulnerabilidade socioeconómica, de acordo com a metodologia adotada (Fig. 4.12), desenvolve-se um conjunto de cálculos e procedimentos de geração de dados intermédios que, pela sua quantidade, não poderão ser aqui todos apresentados. Contudo tentará proceder-se a uma descrição simplificada

dos processos desenvolvidos de forma a clarificar, tanto quanto possível, a sua resolução.

Com todos os dados matriciais (*raster*) classificados, segundo os valores estipulados na tabela 4.11, é possível proceder ao desenvolvimento metodológico da análise da vulnerabilidade socioeconómica.

Inicialmente as componentes social e económica são processadas separadamente. Para o cálculo da suscetibilidade social somam-se apenas os mapas classificados da densidade de residentes (D\_R) e *hot-spots* (H\_S), na ferramenta *raster calculator* ( $D_R + H_S = S_S$ ; Fig. 4.20), obtendo-se o resultado suscetibilidade social (S\_S), posteriormente reclassificado segundo as classes estipuladas na tabela 4.11.

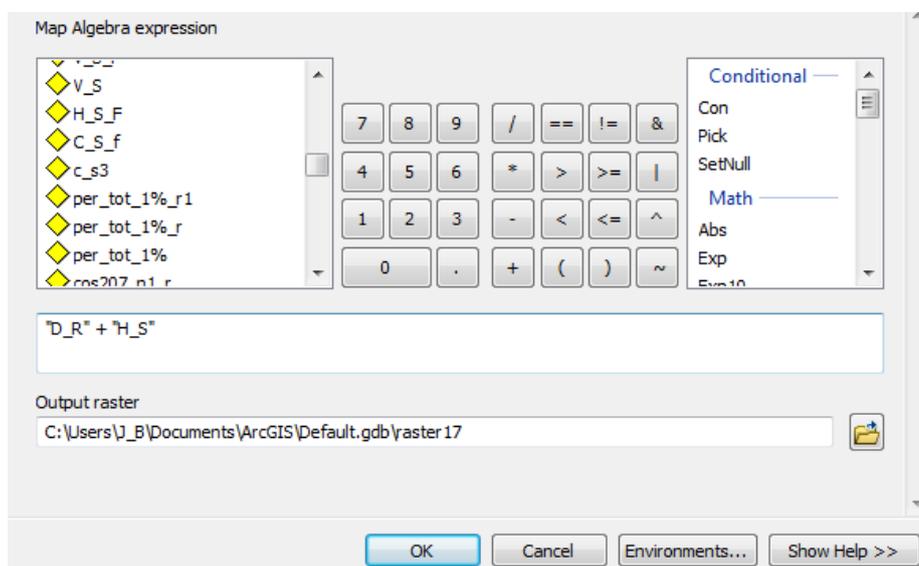


Figura 4.20. Cálculo da vulnerabilidade socioeconómica na ferramenta *raster calculator* (ArcGis).

No cálculo da suscetibilidade económica dão entrada os dados referentes à densidade de edifícios (D\_E), rodovias (ROD), ferrovias (FER), comércio/serviços (C\_S) e ocupação do solo (COS2007) (U\_S), que serão todos somados através da ferramenta *raster calculator* ( $D_E + ROD + FER + C_S + U_S = S_E$ ; Fig. 4.21). A suscetibilidade económica é posteriormente reclassificada segundo as classes estipuladas na tabela 4.11, mediante a utilização da ferramenta *reclassify*.

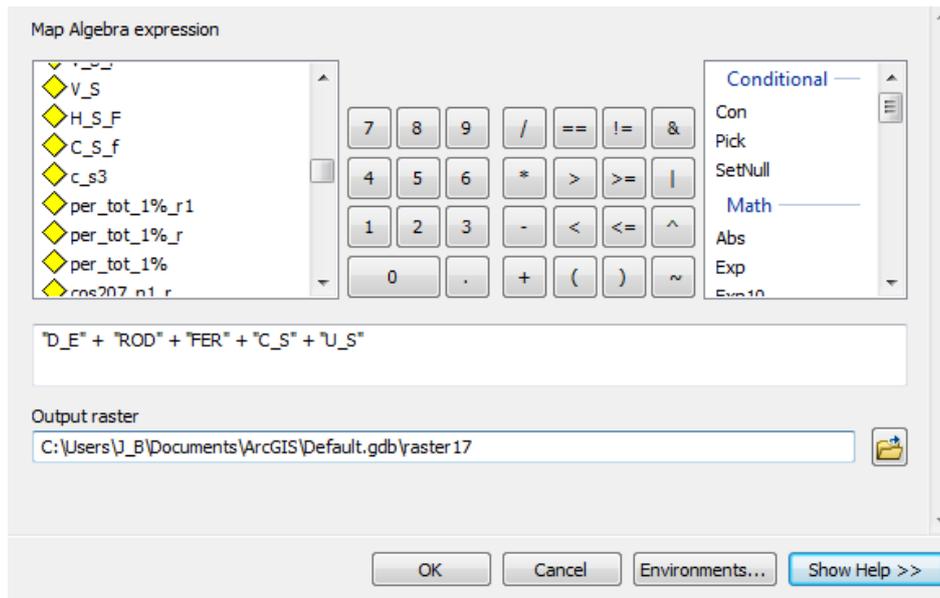
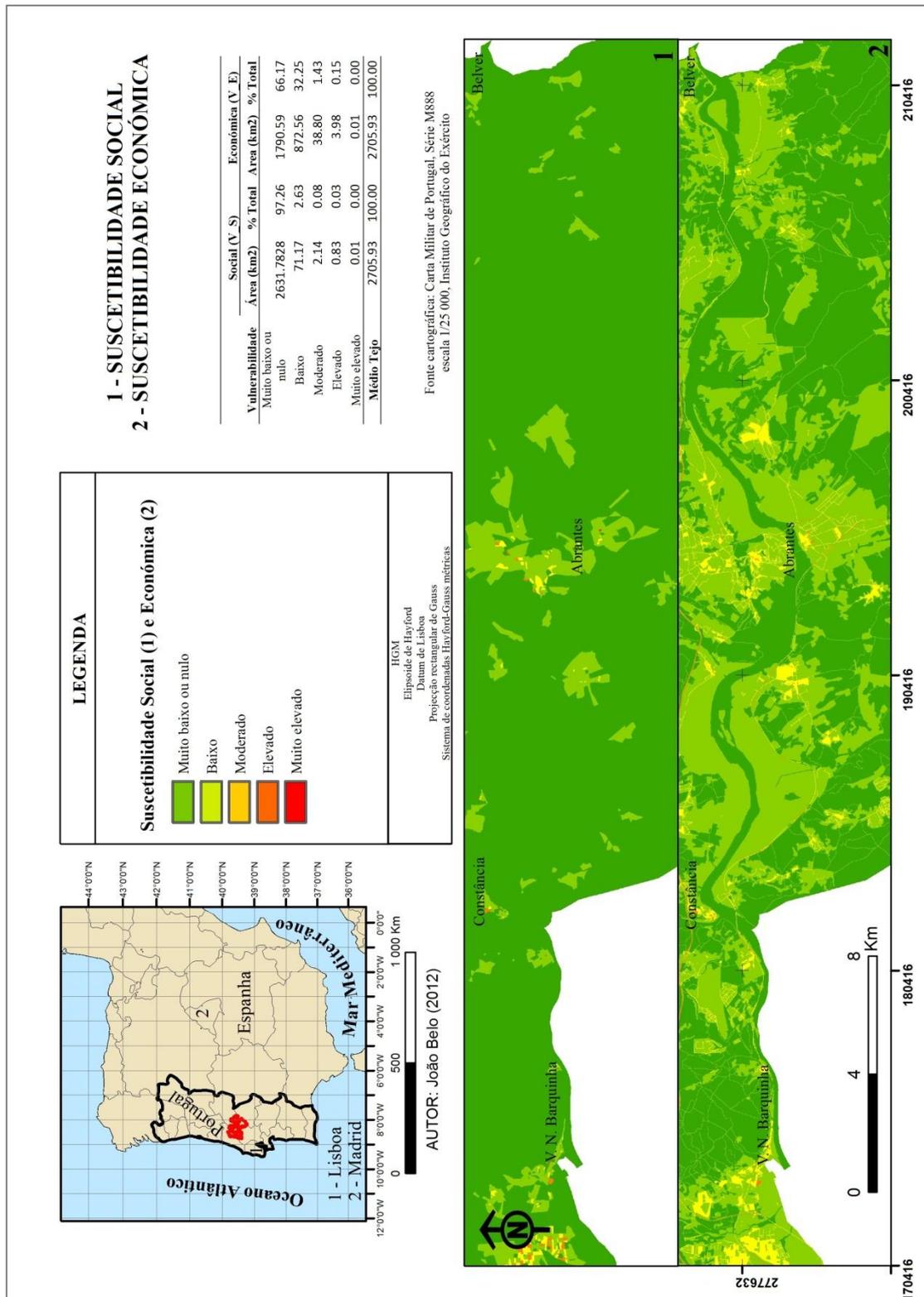


Figura 4.21. Cálculo da suscetibilidade económica na ferramenta *raster calculator* (ArcGis).

A figura 4.22 representa a suscetibilidade social (1) e económica (2) no Médio Tejo.



**AUTOR: João Belo (2012)**

Fonte cartográfica: Carta Militar de Portugal, Série M888  
escala 1/25 000, Instituto Geográfico do Exército

Figura 4.22. Mapas das suscetibilidades social (1) e económica (2) para a área em estudo.

Posteriormente, na ferramenta *raster calculator*, procede-se ao cálculo da vulnerabilidade socioeconómica mediante adição dos mapas reclassificados representativos da suscetibilidade social (S\_S) e suscetibilidade económica (S\_E) ( $S_S + S_E = V_{S_E}$ ). O resultado obtido também foi reclassificado segundo a tabela 4.11, obtendo-se assim o mapa referente à vulnerabilidade socioeconómica para os PR de 100 anos e 10 anos ( $V_{S_E}$ ).

#### **4.3.7. Risco de inundação**

Segundo a metodologia a desenvolver para análise do risco de inundação, anteriormente abordada, a fórmula do risco de inundação a utilizar é a seguinte:  $Risco = (P * S) * (V)$ . Neste contexto, depois de obtidos os dados necessários, o primeiro passo corresponde ao produto da perigosidade (P) pela suscetibilidade física (S), cujo resultado, depois de reclassificado, se designa perigosidade total (PT). Para este efeito recorreu-se, uma vez mais, às ferramentas *raster calculator* e *classify*. Na primeira procedeu-se separadamente à multiplicação da perigosidade, para o cenário de 1% de probabilidade, pela suscetibilidade física (PT1%) e perigosidade, para o cenário de 10% de probabilidade de ser igualado ou excedido, pela suscetibilidade física (PT10%). Depois de reclassificados, de acordo com a tabela 4.11, são posteriormente multiplicados pelo mapa  $V_{S_E}$ , para obtenção da suscetibilidade ao risco de inundação. Os mapas resultantes foram também classificados segundo os intervalos definidos na tabela 4.11.

## 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. Análise comparativa de diferentes resultados de delimitação de inundações

A figura 5.1 apresenta as várias delimitações de cheia em comparação com a simulação desenvolvida, sobre ortofoto acedido a partir do servidor Bing Maps Aereal.

Mediante a análise da mesma, observamos que nela constam cinco delimitações de inundação, distintas, desenvolvidas segundo diferentes metodologias, por diferentes entidades. Todas as delimitações de inundação existentes, exceto a representada a verde (PR 100 anos), foram desenvolvidas com base nos dados concretos da grande cheia de fevereiro de 1979. Todos estes dados foram obtidos do servidor SNIRH - Atlas da Água (<http://geo.snirh.pt/AtlasAgua/Default.aspx>), embora as fontes originais sejam da autoria de outras entidades, nomeadamente DRAOT, LNEC e INAG.

A simulação desenvolvida segundo a metodologia seguida neste trabalho, representada por um *raster* com uma escala de cores que varia do azul escuro (maior profundidade) ao azul claro (menor profundidade), corresponde a profundidades que variam entre 0 m e 17.7 m. Quanto à extensão apresentada, quando comparada com a delimitação, desenvolvida pelo LNEC e INAG mediante a aplicação de um modelo hidráulico simples (apresentada a vermelho), percebe-se que, no geral, são coincidentes. Contudo, mediante análise de maior pormenor, é possível identificar áreas onde os limites por vezes são divergentes. Na área de Rossio, assim como na área de Vila Nova da Barquinha, a simulação desenvolvida apresenta uma extensão ligeiramente superior à delimitada pelo LNEC. Comparando a simulação por nós desenvolvida com a área da superfície de inundação da cheia de 1979 (laranja), digitalizada a partir de fotografia 1/50 000 (LNEC), observa-se uma maior extensão desta última na área entre Belver e Abrantes. Em comparação com os dados de inundação da cheia de 1979 (amarelo) digitalizados a partir de cartografia 1/25 000 (DRAOT), percebe-se existir uma aproximação entre ambas as delimitações. Contudo, nomeadamente na área de Abrantes/Rossio, a simulação desenvolvida apresenta uma extensão inundável inferior à delimitação da DRAOT. Este facto permite-nos inferir que a simulação aqui desenvolvida, mesmo assumindo um erro relevante na área de Rossio, se encontra dentro dos valores obtidos noutros estudos.

Por fim, comparando os resultados deste estudo, obtidos com base nos valores de caudal máximo instantâneo das cheias de fevereiro de 1979, com a área de inundação

para uma cheia com PR 100 anos, ou máxima cheia conhecida (LNEC e INAG), reparamos que esta última apresenta uma extensão bastante superior na maioria do troço em análise, discrepância esta já esperada, uma vez que esta última foi obtida, muito provavelmente, para caudais superiores.

Como última análise observamos que, na generalidade, os nossos resultados se aproximam dos resultados obtidos nos diferentes trabalhos desenvolvidos pelas diferentes entidades já citadas. Este facto, de certa forma, contribui para a validação dos dados obtidos segundo a metodologia aplicada.

INUNDAÇÃO SIMULADA PARA O CENÁRIO DE CHEIA DE 1979  
 PARA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM DELIMITAÇÕES  
 DESENVOLVIDAS POR OUTRAS ENTIDADES

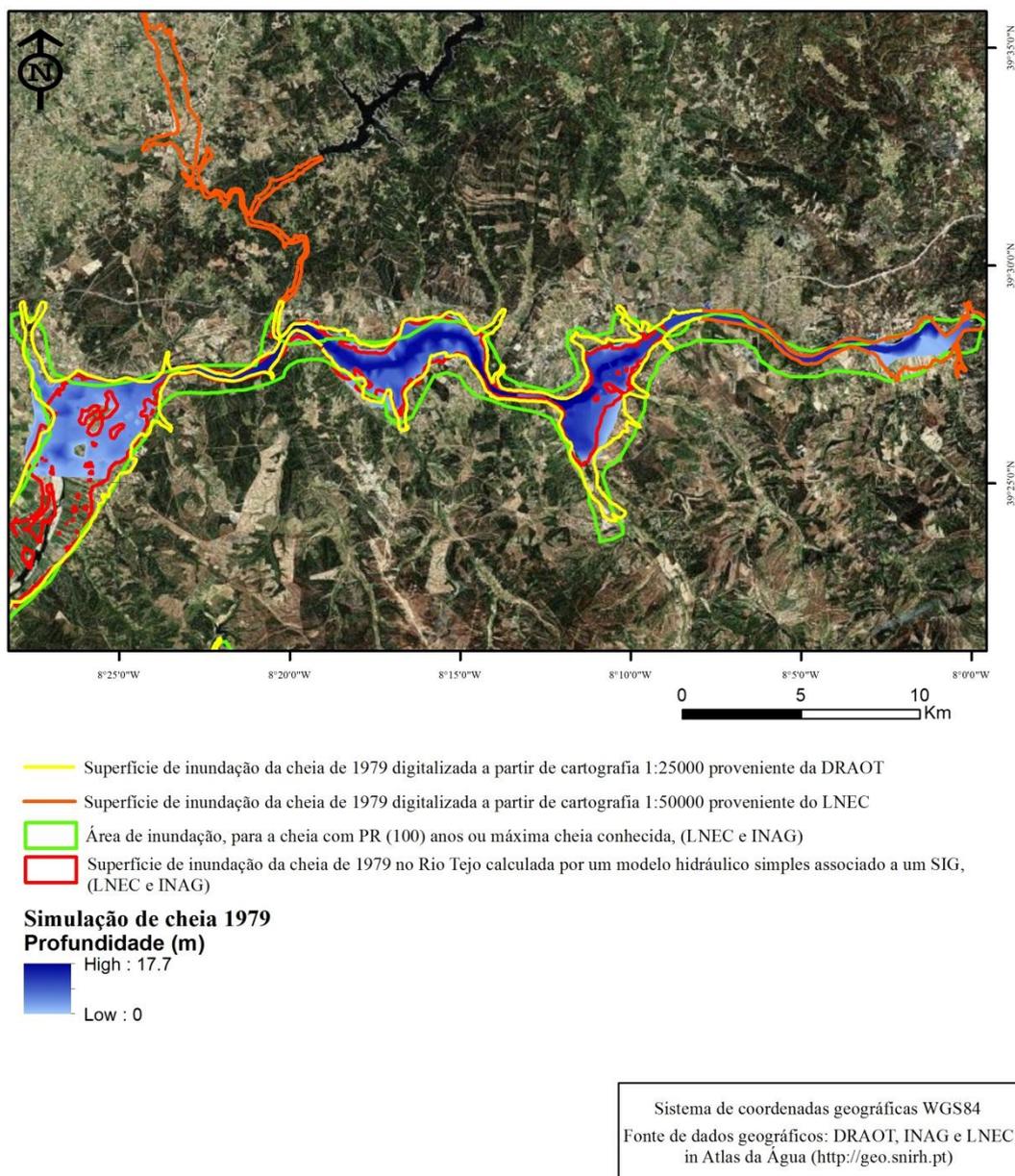


Figura 5.1. Delimitações das áreas inundáveis desenvolvidas por diferentes entidades, em comparação com os valores simulados, sobre ortofoto acedido a partir do servidor Bing Maps Aerial.

## **5.2. Profundidade e velocidade das inundações com probabilidades de ocorrência de 1% e 10%**

Os resultados obtidos do desenvolvimento da metodologia explicada no ponto 4.7.3 são os mapas de profundidade (Fig. 5.2) e velocidade (Fig. 5.3) da inundação para as probabilidades de ocorrência de 1% e 10%, obtidas segundo o método de Gumbel, abordado no ponto 4.7.2.

O mapa da profundidade da inundação, simulado para o cenário com 1% de probabilidade de ocorrência, apresentou valores que variam entre 0 m, nas áreas marginais da mancha de inundação e 20 m, nas áreas mais cavadas referentes ao centro do canal, correspondendo a área inundada a aproximadamente 46 km<sup>2</sup>. No cenário de inundação com probabilidade de ocorrência de 10%, obtiveram-se profundidades que variam entre 0 m e 16 m, correspondendo a área total inundada a aproximadamente 35 km<sup>2</sup>.

O mapa da velocidade da inundação, simulada para o cenário com 1% de probabilidade de ocorrência, apresentou valores que variam entre 0 m/s, nas bacias e áreas periféricas ao canal e 8 m/s nas áreas centrais e mais declivosas do canal. Para o cenário de 10% de probabilidade de ocorrência, as velocidades obtidas variam entre 0 m/s e 6,5 m/s.

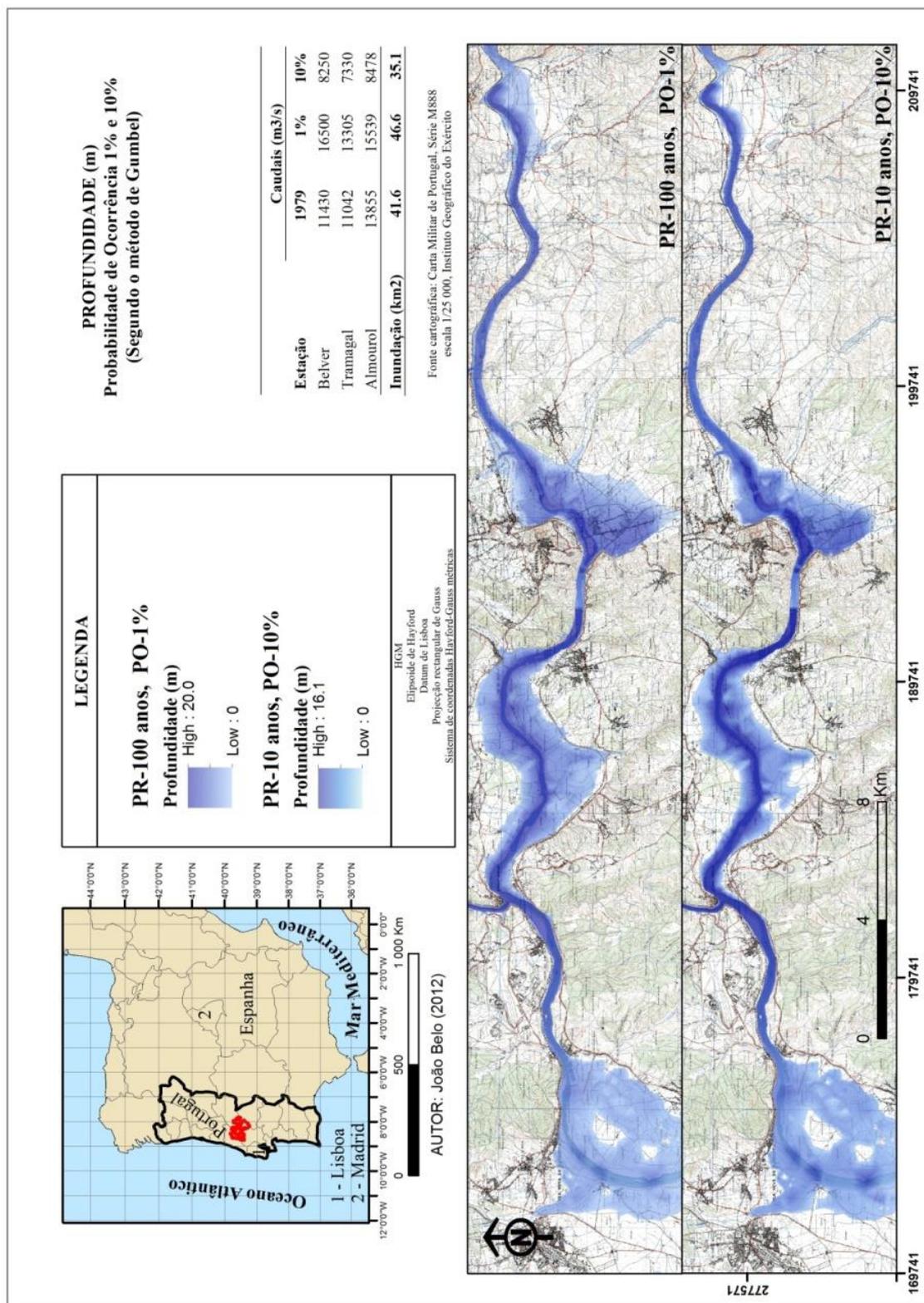


Figura 5.2. Profundidade da inundação para os cenários com 1% e 10% de probabilidade de ocorrência (segundo o método de Gumbel).

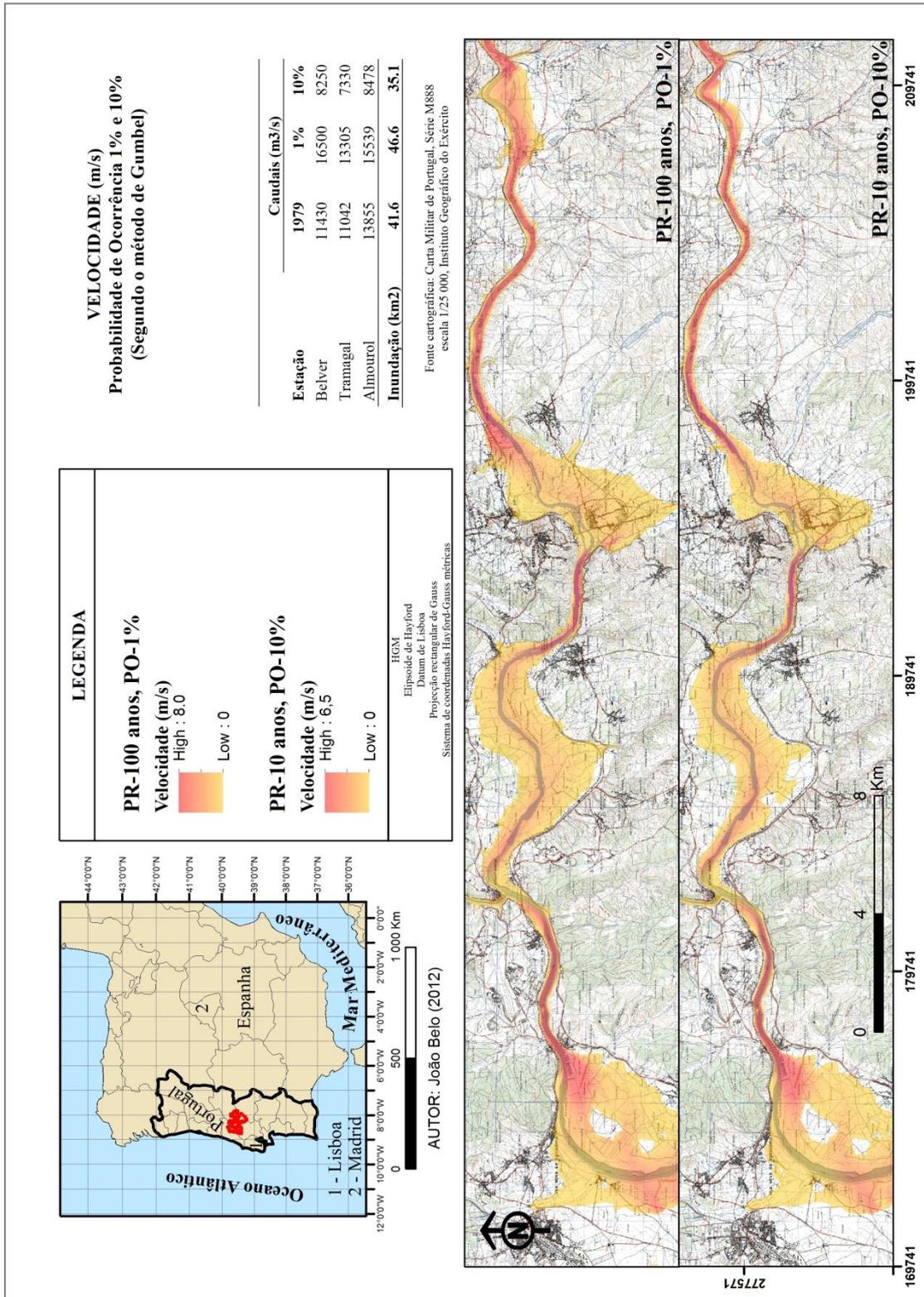


Figura 5.3. Mapa de velocidade da inundação para os cenários com probabilidade de ocorrência de 1% e 10% (segundo o método de Gumbel).

### 5.3. Perigosidade

A figura 5.4 representa o mapa de perigosidade para o cenários de probabilidade de ocorrência de 1% e 10%, de acordo com a metodologia exposta anteriormente.

Analisando os resultados obtidos, salta à vista a diferente extensão de inundação obtida pelos diferentes cenários e, ainda, de acordo com a classificação utilizada, as diferentes áreas obtidas para cada classe, nos diferentes cenários utilizados.

De acordo com os dados obtidos, e apresentados na tabela inserida na figura 5.4, é possível retirar desde logo algumas ilações quanto à extensão da inundação apresentada por cada classe de perigo, nos cenários com PR 100 anos e PR 10 anos:

- Para o cenário de perigosidade simulado para um PR de 100 anos, com 1% de probabilidade de ser igualado ou excedido, obteve-se uma extensão total de área inundada (com perigosidade) de aproximadamente 46,7 km<sup>2</sup>, correspondentes a apenas 1,72% do território do Médio Tejo. Considerando exclusivamente o total da área inundada (46,7 km<sup>2</sup>) obtém-se para a classe 1, de perigo muito baixo ou nulo, uma área de 1,26 km<sup>2</sup>, correspondente a 2,7% de toda a área inundada. Para a classe 2, com perigosidade baixa, obteve-se uma área de 5,03 km<sup>2</sup>, correspondente a 10,7% do total inundado. À classe 3, de perigo moderado, corresponde a maior área inundada, 34,4 km<sup>2</sup>, correspondente a 73,7%. Na classe 4, de perigosidade elevada, obteve-se uma área de 5,4 km<sup>2</sup>, correspondente a 11,65% do total inundado. À quinta e última classe, de perigosidade muito elevada, corresponde uma área pouco superior a 0,5 km<sup>2</sup>, representativo de apenas 1,16% da área inundada.
- Para o cenário de inundação correspondente ao PR de 10 anos, com 10% de probabilidade de ser excedido ou igualado, obteve-se uma extensão total de área inundada de aproximadamente 35,1 km<sup>2</sup> (100% da área inundada), correspondente a 1,3% da área total do Médio Tejo. Tomando exclusivamente esta área, para a classe 1, de menor perigo, obteve-se uma área inundada de 3,05 km<sup>2</sup> correspondente a 8,67% do total inundado. Para a classe 2, com perigosidade baixa, foi obtida uma área de 7,5 km<sup>2</sup>, correspondente a 21,3% do total inundado. Na classe 3, de perigo moderado, obteve-se uma área de 23,5 km<sup>2</sup>, correspondente a 66,8% do total inundado, sendo também para este cenário, a classe que

abrange uma maior área. À classe 4, com perigosidade elevada, corresponde uma área inundada de apenas 1,1 km<sup>2</sup>, correspondente a 3,1% do total inundado. A quinta e última classe, de perigosidade muito elevada, apresenta, para este cenário de inundação, uma extensão ínfima, correspondente a poucos metros quadrados, sendo por isso quase ausente.

Contudo será de lembrar que esta análise da perigosidade apenas tem em consideração os dados referentes à profundidade e velocidade atingidas nos cenários de inundação aplicados. A perigosidade total, que se calculará adiante, dirá respeito ao produto da perigosidade aqui encontrada pela suscetibilidade física, que se aborda de seguida.

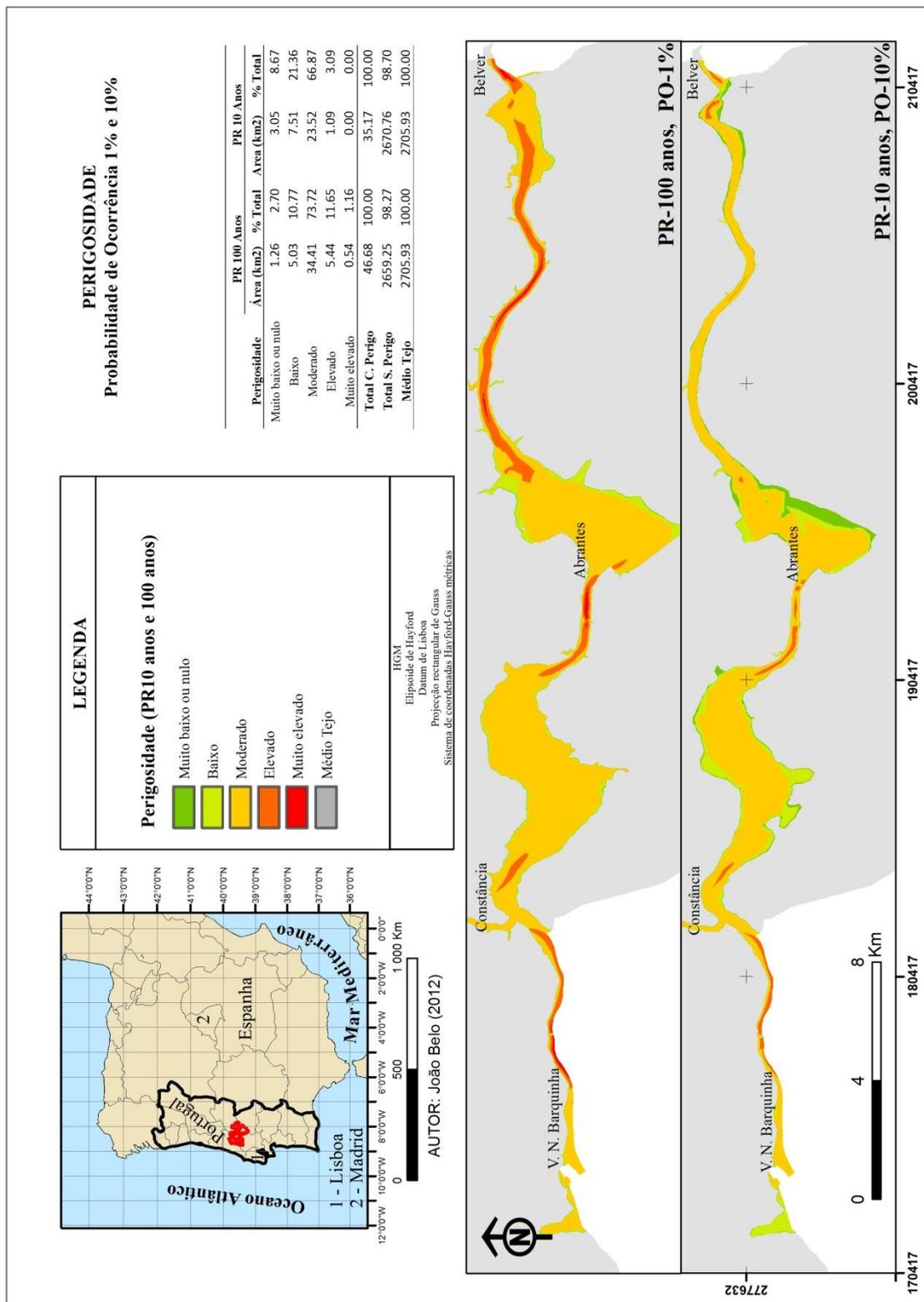


Figura 5.4- Mapa de perigosidade para os cenários de probabilidade de ocorrência de 1% e 10% (segundo o método de Gumbel).

#### 5.4. Suscetibilidade física

As figuras 5.5 e 5.6 mostram os mapas da suscetibilidade à inundação com base nos declives e permeabilidade das unidades litológicas, respetivamente, obtidas conforme a metodologia exposta no capítulo anterior.

Mediante uma breve análise do mapa da suscetibilidade   inundação com base nos declives (Fig. 5.5) pode depreender-se que as áreas envolventes ao troço de rio em estudo apresentam valores bastante elevados, correspondendo a áreas aplanadas (declive inferior a 2,5%) da bacia aluvial do Tejo. Parte dessas áreas corresponde ao leito maior do rio, o que reforça a probabilidade de virem a ficar inundadas em situação de cheia de magnitude variável.

Pode observar-se ainda que, de forma heterog nea e a distâncias variáveis do leito do rio, por vezes longas, mais especificamente na parte Sul dos concelhos de Constância e Abrantes, existe um retalho de áreas compreendidas por declives inferiores a 2,5% (suscetibilidade muito elevada). Contudo, na maioria dos casos, não existe uma ligação ao rio Tejo ou aos seus principais afluentes, pelo que, na realidade, essas áreas não serão inundáveis de acordo com os cenários de inundação utilizados neste trabalho.

Relativamente ao mapa de permeabilidade litológica (Fig. 5.6), uma breve análise sugere, desde logo, que as unidades litológicas menos permeáveis e mais suscetíveis   inundação se localizam no quadrante nordeste do Médio Tejo, correspondendo essencialmente a xistos e quartzitos. Pelo contrário, os quadrantes sudeste e sul são os que apresentam maior permeabilidade e menor suscetibilidade   inundação, correspondendo no geral a unidades litológicas como areias, arenitos, cascalheiras e aluviões.

As áreas próximas ao rio apresentam quase sempre classes menores (códigos 1 e 2) de suscetibilidade   inundação segundo a permeabilidade, exceto a margem direita do Tejo, a jusante de Belver, por alguns quil metros, a área a jusante de Abrantes e a área de confluência do Zêzere com o Tejo, estendendo-se esta um pouco para jusante, também na margem direita.

A figura 5.7 mostra o mapa de suscetibilidade física   inundação, resultante dos mapas de suscetibilidade representados nas figuras 5.5 e 5.6, conforme a metodologia apresentada no ponto 4.7.5 e na figura 4.11.

Através da sua análise constata-se que partes das áreas de maior suscetibilidade física   inundação coincidem com áreas de leito de cheia, sendo no entanto de destacar a

elevada suscetibilidade existente na margem direita do Tejo, entre Constância e Vila Nova da Barquinha.

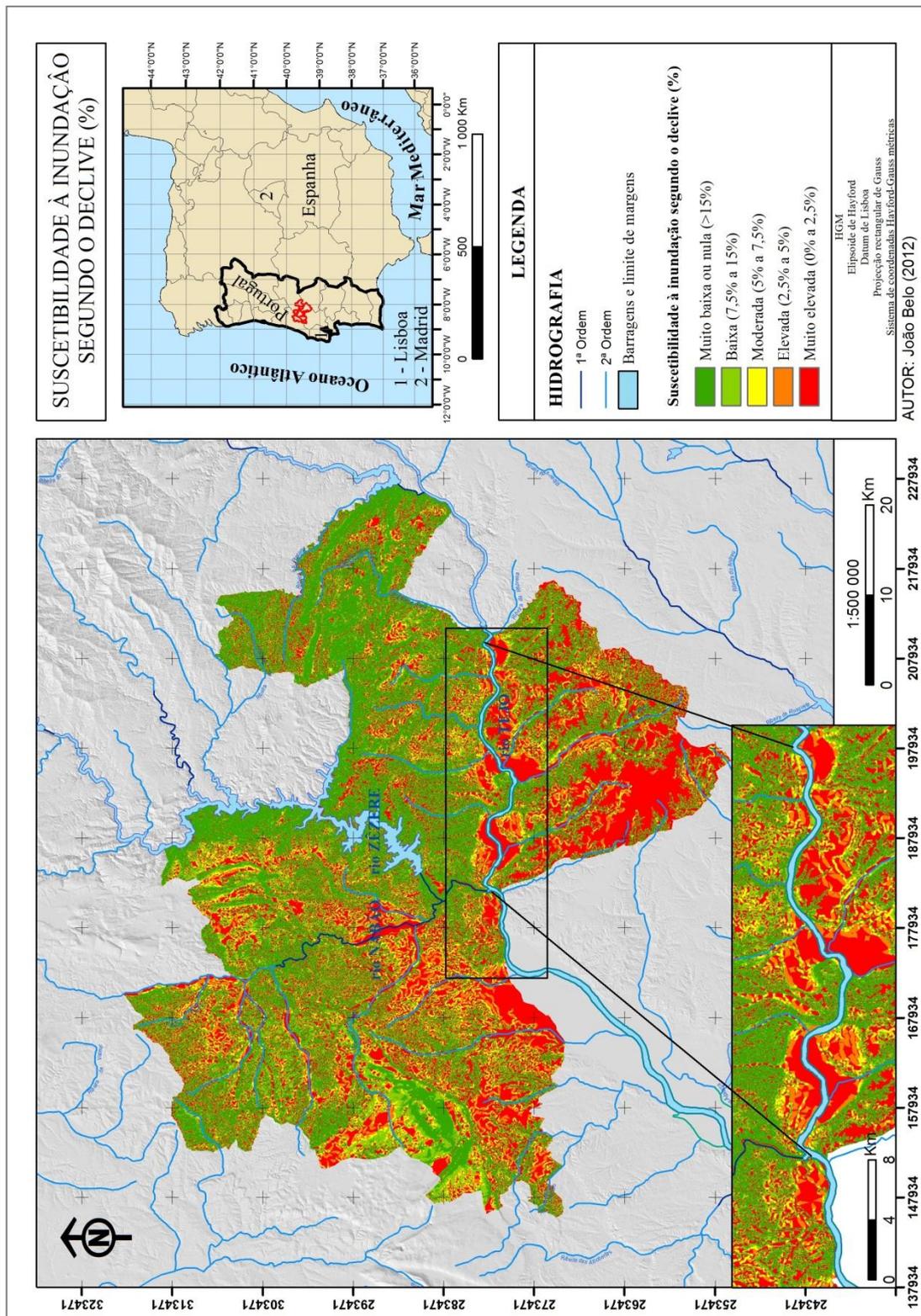


Figura 5.5. Suscetibilidade à inundação segundo o declive.

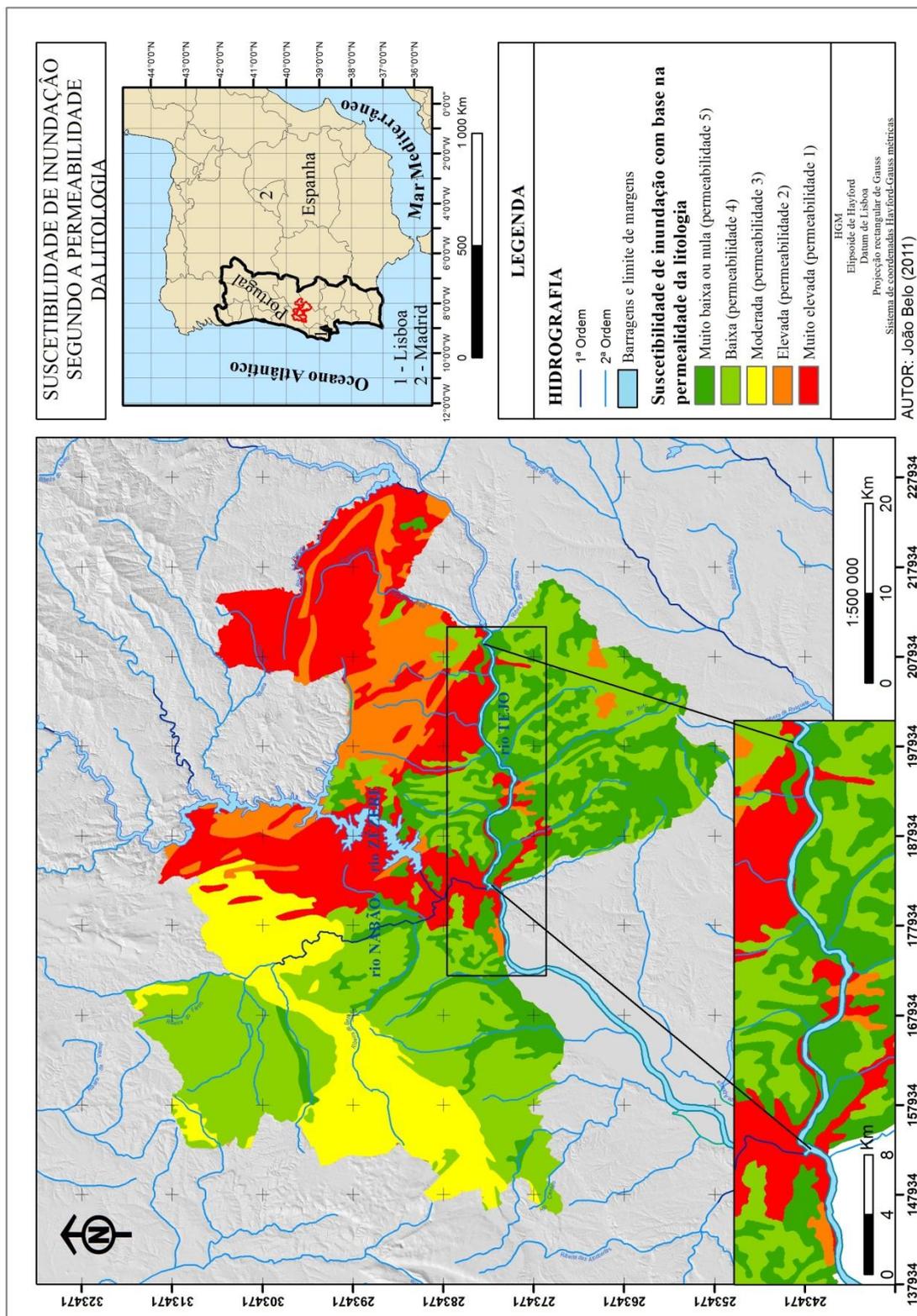


Figura 5.6. Mapa de suscetibilidade à inundação com base na permeabilidade das unidades litológicas.

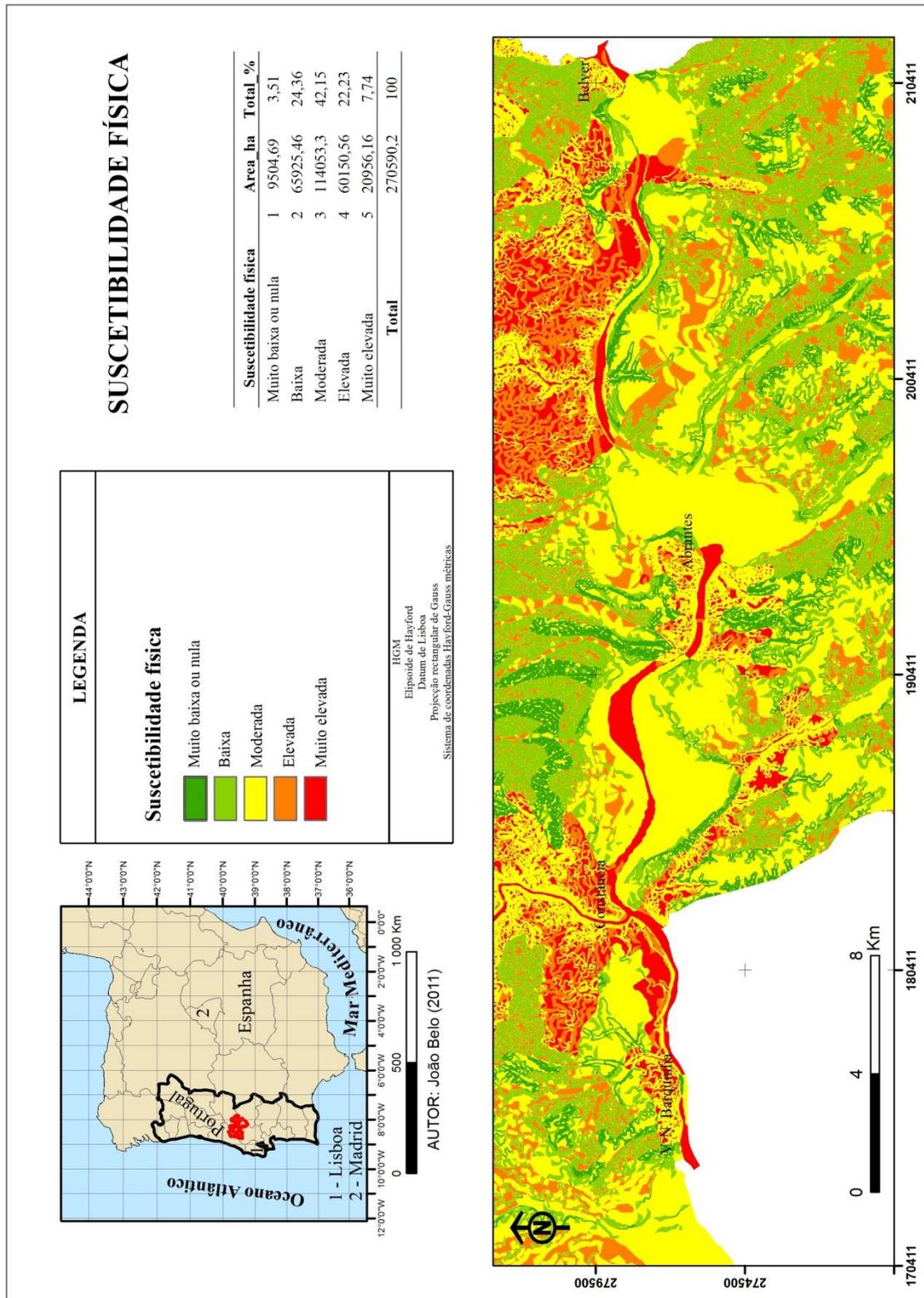


Figura 5.7. Mapa de suscetibilidade física à inundação.

## **5.5. Vulnerabilidade socioeconómica**

A análise da vulnerabilidade socioeconómica, abarca um conjunto mais complexo de dados que as análises anteriores (perigosidade e suscetibilidade física). Inicialmente admitiu-se que se conseguiria ter acesso a dados oficiais essenciais para o desenvolvimento da análise quantitativa social e económica da área de estudo, nomeadamente dados do edificado ao qual estivesse associada informação como a sua funcionalidade, a presença de residências, comércio, serviços e indústria, assim como o número de pessoas que lhe estariam afetados, e respetivos estados de conservação, entre outros. Procedeu-se a um pedido de cedência à Comunidade Intermunicipal do Médio Tejo, proprietária dos dados. No entanto, mesmo depois de vários contactos, esta entidade não os disponibilizou, apesar de os resultados a obter neste estudo poderem ser do interesse da comunidade que representa.

Perante este facto, que se tornou numa limitação para este estudo, não foi possível proceder à análise quantitativa da vulnerabilidade e risco que teriam sido antecipadamente ambicionadas (e.g. quantificação do número de pessoas, edifícios, comércio, serviços afetados e perdas socioeconómicas para os cenários simulados), tendo de se proceder à vectorização manual de um conjunto de dados mínimo, dentro dos dados disponíveis. A ausência de dados relativos ao valor económico dos vários bens: imóveis, infraestruturas, serviços, comércio, património cultural, entre outros, também não permitiu o adiantamento dos valores em perda, caso se venham a verificar inundações correspondentes aos cenários estudados.

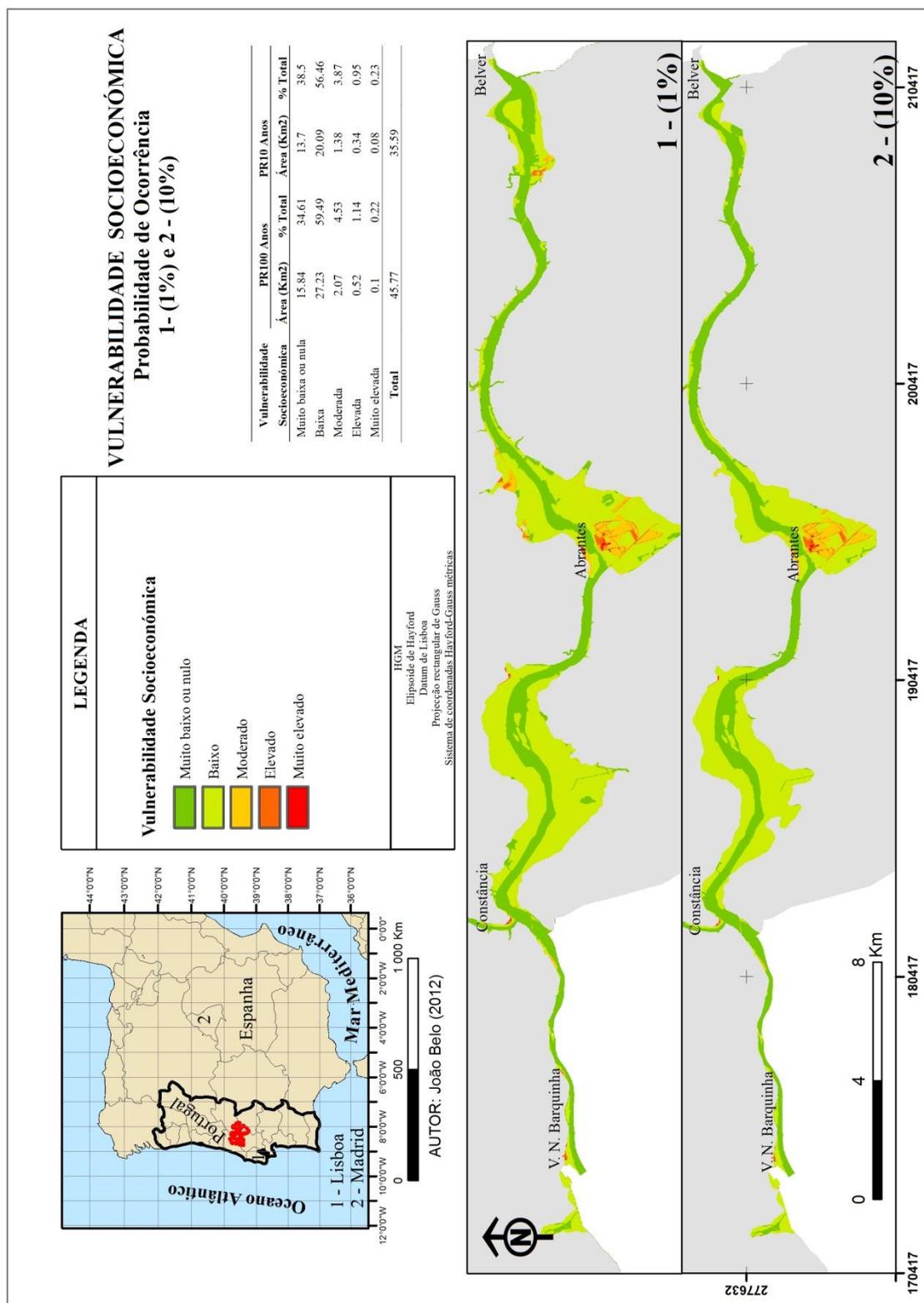


Figura 5.8. Mapa da vulnerabilidade socioeconómica com probabilidade de ocorrência de 1% e 10% (segundo o método de Gumbel).

A figura 5.8 apresenta os mapas da vulnerabilidade socioeconómica para os cenários com período de retorno de 100 e 10 anos, conforme a metodologia apresentada no ponto 4.7.6 e tabela 4.12, face às limitações acima descritas. A partir da análise desses mapas pode-se depreender que, como esperado, a maior vulnerabilidade se encontra preferencialmente localizada nos espaços urbanos, onde há maior concentração de pessoas, bens e infraestruturas simultaneamente coincidentes com áreas de maior perigosidade de inundação. No troço do rio em estudo, as áreas mais vulneráveis correspondem às localidades de Rossio, Constância, Vila Nova da Barquinha, Tancos e Alvega.

No extremo oeste do troço em estudo destaca-se a cidade de Entroncamento, com um nível de vulnerabilidade socioeconómica muito elevada (devido à elevada densidade urbana), embora esta não seja afetada nos cenários de inundação estudados.

A tabela apresentada na figura 5.8 (canto superior direito) contém a vulnerabilidade socioeconómica correspondente a cada classe de vulnerabilidade e a percentagem de ambas em relação ao total vulnerável, para os dois cenários estudados. Para o cenário menos provável, a classe 1 (muito baixa ou nula) corresponde a 34,6% do território (15,8 km<sup>2</sup>), a classe 2 (baixa) corresponde a 59,4% do território (27,2 km<sup>2</sup>), a classe 3 (moderada) corresponde a pouco mais de 4,5% do total vulnerável, embora com uma área aproximada de 2 km<sup>2</sup>, a classe 4 (elevada) corresponde a uma pequena percentagem (1,1%), representando uma área de cerca de 0,5 km<sup>2</sup> e, por último, a classe 5 (vulnerabilidade muito elevada) corresponde a 0,2% do território representado, com uma área de 0,1 km<sup>2</sup>. Para o cenário mais provável obtiveram-se dados de 38,5%, correspondentes a 13,7 km<sup>2</sup>, para a primeira classe, 56,4%, correspondentes a 20,0 km<sup>2</sup>, para a segunda classe, 3,8%, equivalentes a 1,3 km<sup>2</sup>, para a terceira classe, 0,9%, correspondente a 0,3 km<sup>2</sup>, para a quarta classe e, por último, 0,2%, correspondente a 0,08 km<sup>2</sup>, para a quinta classe.

Através de uma análise de pormenor, focalizada em alguns locais, foi possível validar os resultados obtidos no mapa por comparação com a realidade. Nesses termos, os resultados obtidos demonstram coerência quando comparados com a concentração de pessoas e bens nesse local.

## 5.6. Risco de inundação

Os mapas do risco de inundação da área em estudo para os cenários de 1% e 10% de probabilidade de ocorrência de serem igualados ou excedidos, obtidos conforme a metodologia exposta no capítulo anterior, encontram-se representados na figura 5.9. Analisando os resultados da suscetibilidade ao risco de inundação para os cenários estudados poderá inferir-se o seguinte (tabela publicada no canto superior direito da figura 5.9):

No cenário mais extremo, e menos provável, com um PR de 100 anos e 1% de probabilidade de ser igualada ou excedida, obteve-se uma área aproximada de 48,1 km<sup>2</sup> para a qual existe risco de inundação, correspondendo apenas a 1,7% do território total (Médio Tejo). Ainda para este cenário, a classe 1 (risco muito baixo ou nulo) apresenta uma extensão de 13,7 km<sup>2</sup> correspondente a 28,4% da área total com risco, a classe 2 (risco baixo) apresenta maior área, com 30,9 km<sup>2</sup> correspondente a 64,1% do total com risco, a classe 3 (risco moderado) apresenta uma área de 2,97 km<sup>2</sup> correspondente a 6,17% do total com risco, a classe 4 (risco elevado) apresenta uma área diminuta de 0,49 km<sup>2</sup> correspondentes a aproximadamente 1% do total com risco e, por último, a classe 5 (risco muito elevado) apresenta a mais pequena área, com apenas 0,08 km<sup>2</sup>, correspondentes a 0,17% do total com risco.

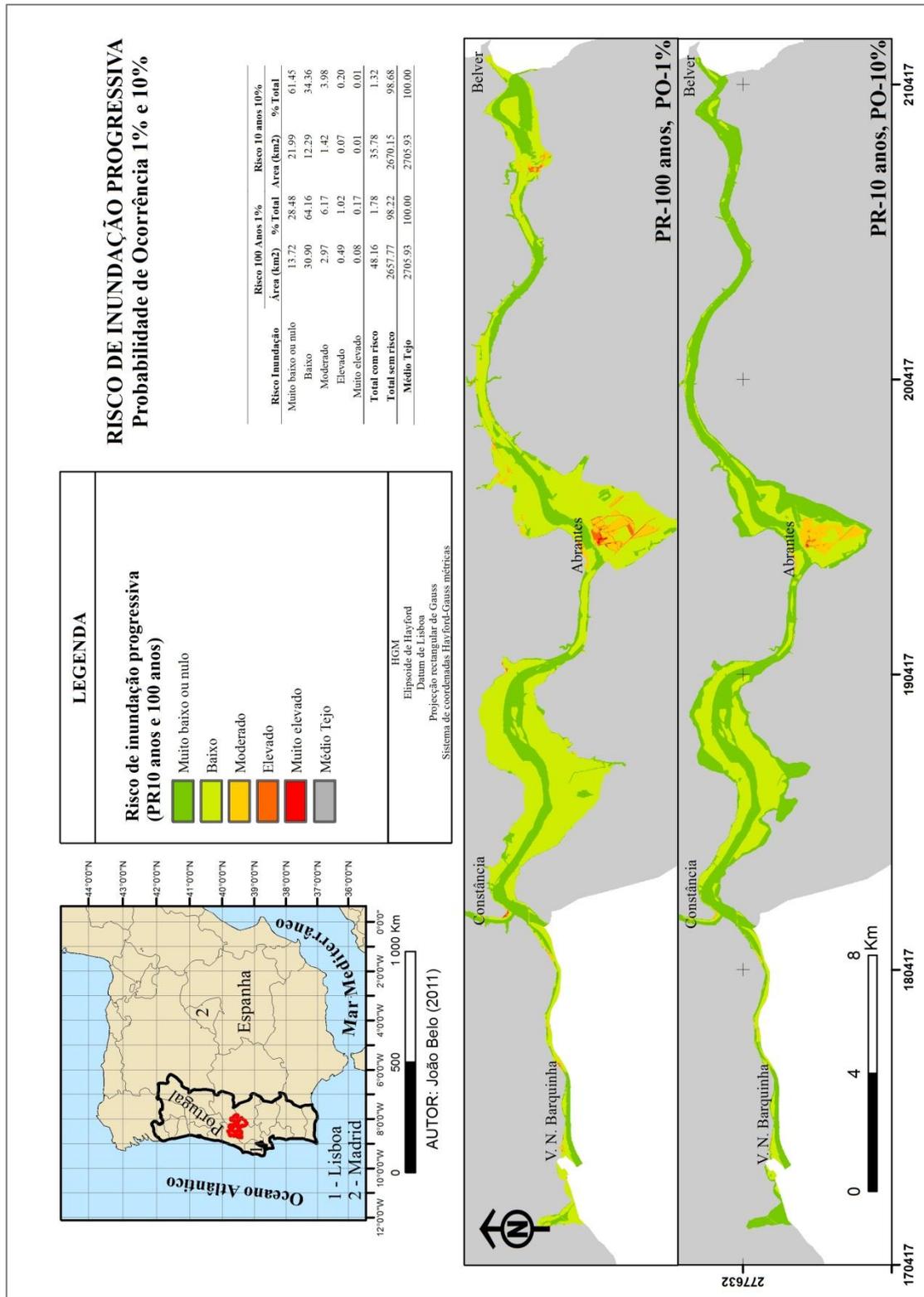


Figura 5.9. Mapa de suscetibilidade ao risco de inundação da área em estudo, para os cenários com probabilidade de ocorrência de 1% e 10% (segundo o método de Gumbel).

As áreas onde se manifestam as classes de risco mais elevado (4 e 5) dizem respeito a áreas urbanas, nomeadamente as de Vila Nova da Barquinha, Constância, Rossio, Tancos, Rio de Moinhos e Alvega. De entre elas a que apresenta maior extensão, classificada com risco elevado e muito elevado, é a localidade Rossio pela conjugação de elevado grau de perigo de inundação com elevado grau de vulnerabilidade socioeconómica à inundação.

Para o cenário mais cíclico e provável, com um PR de 10 anos e uma probabilidade de 10% de ser igualado ou excedido, obteve-se uma área com perigo de 35,7 km<sup>2</sup> correspondentes a 1,3% do Médio Tejo. Para a classe 1 (risco muito baixo ou nulo) obteve-se uma extensão de 21,9 km<sup>2</sup> correspondente a 61,4% do total da área com risco, a classe 2 (risco baixo) apresenta uma extensão de 12,3 km<sup>2</sup> correspondente a 34,3% do total em risco, a classe 3 (risco moderado) estende-se por uma área inferior, com 1,4 km<sup>2</sup> correspondentes a 3,9% do total com risco, a classe 4 (risco elevado) abrange uma área ainda mais restrita de 0,07 km<sup>2</sup> que corresponde a apenas 0,2% do total em risco e, por fim, a classe 5 (risco muito elevado) apresenta uma área de 0,01 km<sup>2</sup> correspondente a 0,01% do total com risco.

Para este cenário, menos extremo, o risco apresenta-se com menor expressão do que no cenário anterior. Contudo, a localidade Rossio continua a ser a mais preocupante, seguindo-se Constância e Vila Nova da Barquinha, estas com menor área e relevância.

No entanto, na área de Rossio, em ambos os cenários, deverá existir uma sobreavaliação do risco decorrente do erro obtido na simulação do mapa de profundidades, que não foi possível corrigir, conforme descrito na capítulo 4. Por outro lado, no global os dados obtidos apresentam-se coerentes, visto que as áreas onde a suscetibilidade ao risco de inundação é mais elevada, correspondem a áreas onde a perigosidade e a vulnerabilidade também são mais elevadas, coincidindo geralmente com áreas urbanas mais vulneráveis, o que prova a sua coerência.

## **5.7. Identificação de áreas com risco elevado e muito elevado**

As áreas para as quais se obteve risco relevante de inundação progressiva no Médio Tejo, para ambos os cenários estudados, coincidiram, de jusante para montante, com as povoações ribeirinhas de Vila Nova da Barquinha e Constância, na margem direita do Tejo, e Rossio e Alvega, na margem esquerda.

As localidades que apresentam maior área com risco de inundação elevado e muito elevado, são Rossio, Constância e Vila Nova da Barquinha, onde se manifestou uma diferença razoável, relativamente aos níveis de risco obtidos para os diferentes cenários estudados. Em termos de extensão da inundação, para as probabilidades de ocorrência de 10% e 1% também existem diferenças significativas, nomeadamente se analisado a grande escala, como se pode avaliar pelas figuras 5.10 e 5.11. A localidade Alvega, entre as quatro localidades acima referidas, e também Tancos, são as que apresentam menor área com elevados graus de risco de inundação mas, no caso particular de Alvega, a diferença de extensão da inundação obtida para os diferentes cenários estudados é mais relevante, só existindo risco para o cenário com menor probabilidade de ocorrência, o que se deverá às diferenças de caudal adotados para os diferentes cenários, na estação de Belver.

Os níveis de risco obtidos são aparentemente coerentes, visto coincidirem com áreas que apresentam mais população, bens económicos e sociais que, associados à severidade da inundação, promovem os níveis de risco obtidos. No entanto, as diferenças obtidas entre as diferentes extensões inundadas, de acordo com os diferentes cenários em determinados locais do troço em estudo, parecem muito próximas, baseando-se esta impressão apenas numa observação simples, não sustentada. Este aspeto não é possível verificar-se visto não existirem registos sistemáticos reais dos caudais que coincidam com os cenários estudados e que nos permitam verificar a sua veracidade.

## ÁREAS DO MÉDIO TEJO QUE APRESENTAM RISCO DE INUNDAÇÃO PROGRESSIVA ELEVADO CENÁRIO DE INUNDAÇÃO, PR 100 ANOS, 1% DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA

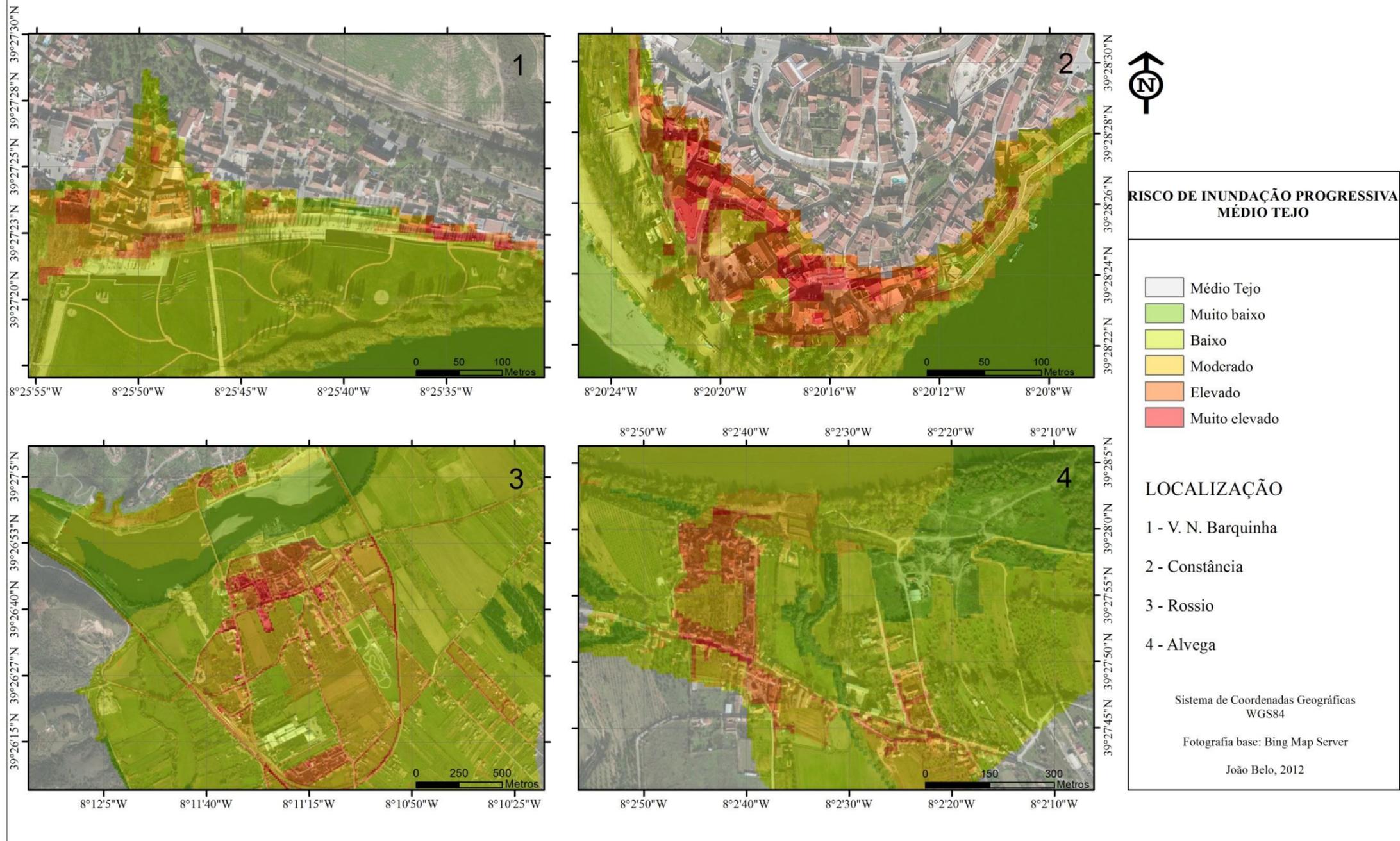


Figura 5.10. Áreas do Médio Tejo que apresentam suscetibilidade ao risco de inundação progressiva, para a probabilidade de ocorrência de 1% (segundo o método de Gumbel).

## ÁREAS DO MÉDIO TEJO QUE APRESENTAM RISCO DE INUNDAÇÃO PROGRESSIVA ELEVADO CENÁRIO DE INUNDAÇÃO, PR 10 ANOS, 10% DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA

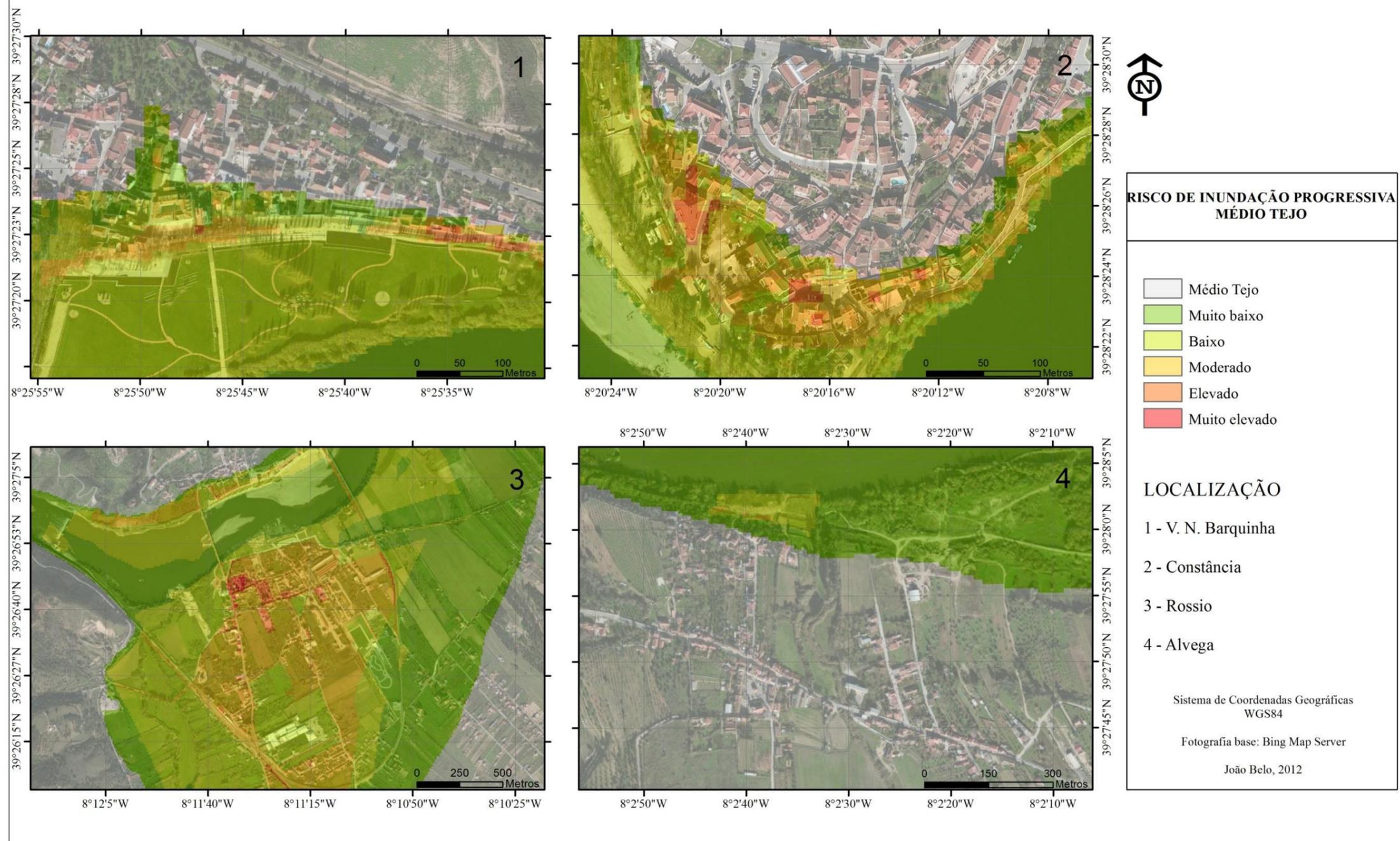


Figura 5.11. Áreas do Médio Tejo que apresentam suscetibilidade ao risco de inundação progressiva, com a probabilidade de ocorrência de 10% (segundo o método de Gumbel).

## 5.8. Sugestão de algumas medidas mitigadoras do risco

Apenas a título de exemplo, visto não ser este um objetivo fulcral deste trabalho, apresentam-se algumas medidas preventivas que podem ser interpretadas através da análise dos mapas de risco de inundação obtidos:

- Os mapas de risco de inundação deverão ser considerados uma medida chave para o ordenamento do território, por forma a conhecer as áreas que apresentam riscos consideráveis. Deverão estes ser integrados nos Planos Diretores Municipais (PDM), por forma a ser minimizado o risco socioeconómico desses espaços;
- Todas as áreas onde o nível de risco seja moderado ou superior deverão ser alvo de atenção das autoridades competentes por forma a tentar desenvolver um conjunto de medidas que possam prevenir/minimizar perdas socioeconómicas consideráveis em caso de inundação (e.g. construção de infraestruturas de retenção da água, instalação de bens e serviços a partir de determinada cota ou andar, divulgação de medidas reativas, deslocalização de bens e serviços, identificação de pontos de encontro e de acessos para fuga e remoção de bens e pessoas, entre outros);
- As áreas onde o risco é muito baixo e baixo, apenas devem ser reservadas para práticas onde apenas possa ocorrer perda económica pouco relevante, nomeadamente para uso agrícola e florestal;
- Com base nas áreas mais sensíveis apresentadas nos mapas devem ser desenvolvidos planos de gestão de pessoas, bens, rotas e mercadorias, essenciais em caso de crise, de forma a que quando esta possa ocorrer, seja possível minimizar os possíveis prejuízos causados;
- Depois de identificadas as áreas de maior sensibilidade no mapa, deverá ser feito um levantamento e validação de bens e pessoas no terreno, que pelas circunstâncias necessitem de um resgate antecipado, por forma a minimizar perdas económicas e sociais (e.g. museus, igrejas, população deficiente e com mobilidade reduzida, entre outros).



## 5.9 Análise das potencialidades e limitações dos SIG no estudo multifatorial do risco de inundação

No decorrer deste trabalho, cujo objetivo se concentrou na execução de uma metodologia SIG multifatorial para a obtenção do risco de inundação progressiva, praticamente todos os processos foram desenvolvidos e auxiliados por SIG. Quando analisada a utilidade prestada pelas ferramentas SIG no desenvolvimento do trabalho, torna-se perceptível que o conjunto de vantagens proporcionadas foram relevantes, sem as quais, não se poderia ter desenvolvido esta metodologia

As principais vantagens encontradas na utilização de SIG foram:

- A capacidade de armazenamento, e inter-relação entre os dados, em sistemas de bases de dados robustos, é elevada e metódica, permitindo posteriormente o desenvolvimento de um conjunto de inquirições e operações de análise;
- Capacidade para analisar áreas de grande dimensão, de forma rápida e precisa, contrariamente aos antigos métodos de trabalho manual;
- O modelo matricial que atualmente é incorporado em qualquer pacote de *software* SIG, apresenta um potencial para o desenvolvimento de cálculos mais ou menos complexos de matrizes, como o que aqui se desenvolve;
- Grande capacidade para o desenvolvimento de análises algébricas, relacionais e espaciais entre os diferentes dados;
- Alta capacidade para a elaboração de documentos espaciais, analíticos e para a sua representação sob a forma de mapas, gráficos e tabelas, como ferramentas de apoio à decisão;
- A capacidade de acrescentar novas ferramentas (mais especificamente ao ArcGis), de acordo com especificações e algoritmos pretendidos (ainda que não tenha aqui sido explorada), representa uma mais valia significava.

As principais limitações encontradas na utilização de SIG foram:

- O ArcGis é um *software* comercial, sendo a aquisição da sua licença dispendiosa. No entanto, atualmente existem vários pacotes SIG *freeware* que solucionam esse problema.

- Exigência de *hardware* potente, nomeadamente, com grande capacidade de processamento e de memória física e virtual.
- Exigência de conhecimentos técnicos específicos para a sua aplicação e, mais propriamente, para a interpretação e validação dos dados produzidos.
- Ocorrência esporádica de *bugs* de *hardware* ou *software*, provavelmente derivados do grande volume de informação tratada.

## 6. CONCLUSÕES

Através do desenvolvimento deste estudo foi possível retirar um conjunto de conclusões relativas à aplicação de SIG na análise do risco de inundação progressiva, à utilidade e potencialidade do *software* de modelação hidráulica HEC-RAS/GEO-RAS, à utilidade e fiabilidade da metodologia SIG desenvolvida e aos graus de risco obtidos.

Em baixo descrevem-se as principais conclusões obtidas:

- A inexistência de dados sistemáticos abrangentes, hidrológicos e cartográficos, não permitiram o empenho de uma metodologia mais complexa, limitando a obtenção de valores mais precisos, mesmo à reduzida escala de análise;
- A análise quantitativa do risco de inundação, que se pretendia desenvolver para o Médio Tejo, não foi possível, devido à indisponibilidade de alguns dados cartográficos imprescindíveis à análise, nomeadamente os dados do edificado e do valor económico dos mesmos.
- A aplicação de SIG demonstrou ser um instrumento extremamente útil, capaz e adequado para dar resposta ao estudo do risco de inundação e, certamente, a outros estudos de riscos naturais e antrópicos, assim como em variadíssimos temas, cujo objetivo comum seja a análise espacial conjunta de variados fatores intervenientes;
- O *software* ArcGis apresenta uma interface amigável e possui todas as ferramentas necessárias para o processamento da metodologia desenvolvida, apresentando, ainda, outras soluções e capacidades que não foram utilizadas neste estudo;
- A metodologia SIG aplicada é simples e demonstrou ser eficiente. Os resultados obtidos demonstraram-se satisfatórios, à escala de análise regional. Contudo, são grandemente influenciados pela precisão dos dados de entrada. Visto que a metodologia foi antecipadamente pensada para uma análise quantitativa do risco de inundação, é possível proceder à análise quantitativa do risco e dos danos potenciais causados mediante

ligeiras adaptações e através da inserção de dados mais pormenorizados e com informação dos valores económicos respetivos;

- O *software* de modelação hidrológica HEC-RAS/HEC-GEORAS demonstrou ser uma ferramenta capaz de solucionar problemas concretos, relativos à simulação de caudais de ponta de cheia, apresentando, ainda, um vasto conjunto de ferramentas e potencialidades que não foram aqui utilizadas. Todavia, trabalhar com este *software* exige uma preparação técnica considerável. A precisão dos resultados obtidos apresenta uma relação direta e muito estreita com a precisão dos dados de entrada no modelo e com a capacidade de calibração do modelo numérico, que exige conhecimento técnico e experiência;
- O resultado da simulação da extensão e profundidade para a cheia de 1979, depois da calibração, efetuada tendo em conta a reduzida precisão dos dados de entrada, nomeadamente do MDE, é satisfatório, tendo-se conseguido pequenos erros decimétricos em todas as estações, com exceção da de Rossio, onde o erro ascende quase aos quatro metros. Este erro não deverá ter origem no processo de simulação, embora não tenha sido possível verificar a sua origem e retificá-lo. Mesmo nas áreas onde o erro é mais reduzido, entre a cota de inundação e a área inundada existem sempre algumas discrepâncias que se deverão sobretudo à resolução do MDE, dependente da equidistância vertical de 10 m entre curvas de nível;
- As simulações desenvolvidas segundo os caudais estimados para os cenários com PR 100 anos e PR 10anos não se podem verificar visto que não existem dados sistemáticos que relatem uma cheia com os mesmos valores de caudal, e marcas que permitam a sua validação. Será ainda de relevar que as simulações podem apresentar erros, que sejam provocados pela utilização inadequada de uma calibração, feita para um determinado caudal, noutra caudal diferente;
- Os resultados obtidos para a perigosidade de inundação, vulnerabilidade socioeconómica e suscetibilidade ao risco de inundação, na generalidade, apresentam-se coerentes com os aspetos reconhecidos no terreno, o que demonstra a capacidade da metodologia utilizada. Ainda que não tenha

vido possível proceder à quantificação do risco, desenvolveu-se uma cartografia de risco qualitativa onde é claramente possível perceber quais as áreas onde o risco de inundação progressiva é mais ou menos elevado. Estas ferramentas (mapas de perigosidade, vulnerabilidade e risco) poderão ser utilizadas como mais uma ferramenta de apoio à gestão, prevenção e mitigação do risco de inundação da área em estudo.

## **7. PERSPETIVAS FUTURAS**

A falta de dados hidrológicos sistemáticos e cartográficos foi uma limitação relevante, inviabilizando, desde logo, o desenvolvimento de uma análise quantitativa do risco de inundação para a área em estudo, que era um dos principais objetivos.

Existem vários aspetos a melhorar na metodologia desenvolvida que não foram desenvolvidos por indisponibilidade de alguns dados e pelo tempo útil disponível. A metodologia SIG aplicada, pode vir a integrar, através de adaptação simples, outros dados que complementem a análise e permitam um resultado quantitativo do risco. A utilização de dados ao nível do edificado é imprescindível para a obtenção de resultados quantitativos fidedignos. O MDE utilizado, à escala de análise, revelou-se razoável. Contudo, mediante utilização de um modelo com precisão mais elevada, os resultados a obter seriam, sem dúvida, muito mais precisos e realistas. A utilização de intersecções, taludes, estruturas aéreas e de retenção, entre outras, na simulação HEC-RAS/HEC-GEORAS certamente que também contribuirá para o aumento da fidelidade dos resultados. Espera-se, mais tarde e noutras circunstâncias, poder dar continuidade a este estudo, através do refinamento da metodologia, com a utilização de mais dados e dados mais precisos, bem como proceder à sua aplicação a outras áreas de estudo.

## BIBLIOGRAFIA E WEBGRAFIA

- Ahmad, S., & Simonovic, S. (2011). A three-dimensional fuzzy methodology for flood risk analysis. *Journal Flood Risk Management*, 4, 53-74.
- Alkema, D. (2007). *Simulating floods, On the application of a 2D-hydraulic model for flood hazard and risk assessment*. Utrecht: University of Utrecht.
- ANPC. (2009). Guia para a caracterização de Risco no Âmbito da elaboração de Planos de Emergência de Proteção Civil. *Cadernos Técnicos PROCIV*, nº 9, 1-28.
- Aronoff, S. (1989). *Geographic Information Systems: A Management Perspective*. Ottawa: WLD Publications.
- Atlas do Ambiente. *Download* de mapas temáticos: (<http://sniamb.apambiente.pt>), consultado em setembro de 2011.
- Azevêdo, M., Nunes, E. & Ramos, C. (2004). Some morphological aspects and hydrological characterization of the Tagus floods in the Santarém region, Portugal. *Natural Hazards*, 31 (3), 587-601.
- Ballesteros, J., Bodoque, J., Diés-Herrero, A., Sanchez-Silva, M., & Stoffel, M. (2011). Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. *Journal of Hydrology*, 403, 103-115.
- Burrough, P. (1986). *Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment*, in "Monographs on Soil And Resources Survey", n. 12. Oxford: Clarendon Press.
- Carvalho, J. & Aranha, J. (2002). Criação e aplicação de um SIG para a Lezíria do Tejo: O caso das cheias do rio Tejo no Vale de Santarém. *ESIG, Encontro de Utilizadores e Informação Geográfica*. Lisboa: USIG.
- Chrisman, N. (1999). What does "GIS" Mean? *Transactions in GIS*, Vol.3, 175-186.
- Clarke, K. (1986). Advances in Geographic Information Systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 10, 175-184.
- CLC (1990). Cartografia Corine Land Cover para Portugal continental. Grupo de Detecção Remota, do Instituto Geográfico Português: (<http://www.igeo.pt>), consultado em janeiro de 2011.

- CLC (2000) Cartografia Corine Land Cover para Portugal continental. Grupo de Detecção Remota, do Instituto Geográfico Português: (<http://www.igeo.pt>), consultado em janeiro de 2011.
- CLC (2006) Cartografia Corine Land Cover para Portugal continental. Instituto Geográfico Português: (<http://www.igeo.pt>), consultado em janeiro de 2011.
- CMP. Carta Militar de Portugal, série M888, folhas números 286 a 288 298 a 302, 308 a 313, 318 a 323, 328 a 333, 341, 343, 344, 355 e 356. Instituto Geográfico do Exército.
- Cojean, R. & Gautier, P. (1984). Elaboration de cartes de sensibilité aux mouvements de terrain pour l'établissement de plans d'exposition aux risques. *BRGM, n°83* (pp. 153-181). Caen: Decazeville-Averyron, Actes du Colloque.
- COS (2007). Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal Continental para 2007. Instituto Geográfico Português: (<http://www.igeo.pt>), consultado em maio de 2012.
- Cowen, D. (1988). GIS versus CAD versus DBMS: What Are the Differences? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54*, 1551-1555.
- Craciunescu, V., Ghgorghe, G., Catana, S. & Alecu, C. (2005). Contribution of earth observation data to flood risk mapping. *International conference on innovation advances and implementation of flood forecasting technology*, (pp. 1-11). Tromso, Norway.
- Cunha, L. & Dimuccio, L. (2002). Consideração sobre riscos naturais num espaço de transição. Exercícios cartográficos numa área a sul de Coimbra. *Territorium, 9*, 2-22.
- Daveau, S. (1995). *Portugal Geográfico*. Lisboa: João Sá da Costa.
- Dias, J. (2006). Geologia Ambiental. Cheias em Portugal continental: ([http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA3\\_cheias/GA35\\_CheiasPortugal/GA35\\_cheiasPortugal.html](http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA3_cheias/GA35_CheiasPortugal/GA35_cheiasPortugal.html)), consultado em fevereiro de 2012.
- Eastman, J. (1997). *IDRISI for Windows, Version 2.0: Tutorial Exercises*. Worcester: Clark University, Graduate School of Geography.
- El-Baroudy, I. & Simonovic, S. (2004). Fuzzy criteria for the evaluation of water resource systems. *Water Resource 40*.
- Escourrou, G. (1986). Quelques réflexions sur les risques, Climat et risques naturels. *Colloque AFGP*.
- Faria, R. & Pedrosa, A. (2005). Aplicação SIG na Elaboração de Cartografia Temática de Base na Bacia Hidrográfica do Rio Uíma - Santa Maria da Feira. *Anais do XI*

- Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada - 4 a 9 de Setembro*. São Paulo, Brasil: Universidade de São Paulo.
- Faugère, L. (1990). “*La dimension des faits et la théorie du risque*”. *Le Risque et la Crise*. Malta: Fondation for International Studies.
- Faugères, L. (1991). La géo-cindynique, Géoscience du risque. *Bull. Assoc. Géographes Françaises*, 3, Paris, 529-542.
- Ghargozlou, A., H., N. & Seddighi, M. (2011). Spatial Analysis for Flood Control by Using Environmental Modeling. *Journal of Geographic Information System*, 3, 367-372.
- Gobierno de España, Ministerio de Agricultura Alimentación y Ambiente: Dados cartográficos da delimitação da bacia hidrográfica do Tejo: (<http://www.chtajo.es>), consultado em outubro de 2012.
- Gregory, I. & Ell, P. (2007). *Historical Gis - Technologies, Methodologies and Scholarship*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Gumbel, E. (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia: Columbia University Press.
- Gurer, I. & Ucar, I. (2010). The Importance of Flood Zoning Using GIS, A Case Study from Macka, Trabzon, Northeastern Turkey. *BALWOIS*, 25, 29 May 2010. Ohrid, Republic of Macedonia.
- Hunter, A., Bates, P., Horritt, S. & Wilson, M. (2007). Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review. *Geomorphology* 90, 208-225.
- INE (2011). *Censos 2011 – Resultados Provisórios*. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística, I.P.
- INE. Dados cartográficos dos resultados provisórios dos censos 2011: (<http://mapas.ine.pt>), consultado em maio de 2012.
- Julião, R., Nery, F., Ribeiro, J., Castelo Branco, M. & Zêzere, J. (2009). *Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica de base municipal*. Autoridade Nacional de Protecção Civil, Direcção Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano, Instituto Geográfico Português.
- Kellens, W., Deckers, P., Saleh, H. V., Maeyer, D., Allaert, G. & Sutter, R. (2008). A GIS tool for flood risk analysis in Flanders (Belgium). *Risk Analysis*, Vol 39.
- Loureiro, J. (2009a). *Referências históricas de medição das alturas hidrométricas e dos caudais nos cursos de água, 1ª ed, Tágides 03*. Lisboa: ARH do Tejo, I.P.
- Loureiro, J. (2009b). Rio Tejo, as grandes cheias 1800-2007. *Tágides 01*, 0-90.

- Macedo, M., Pereira, C., Pereira, E., Vinagre, H., Moreira, L., Gomes, S. & Santos, V. (2006). *Caracterização de Caudais, Rio Tejo*. Lisboa: Direcção de Serviços de Monitorização Ambiental, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento de Lisboa e Vale do Tejo, Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.
- Malczewski, J. (2006). Integrating multicriteria analysis and geographic information systems: the ordered weighted averaging systems: the ordered weighted averaging. *Int. J. Environmental Technology and Management, Vol. 6, Nos. 1/2, 7-19*.
- Matgen, P., Henry, J., Pappenberger, F., De Fraipont, P., Hoffmann, L. & Pfister, L. (2004). Uncertainty in calibrating flood propagation models with flood boundaries derived from synthetic aperture radar imagery. *Proceedings of the 20th Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, (pp. 325-358). Istanbul, Turkey.
- Matos, J. (2008). *Fundamentos de Informação Geográfica, 5ª ed.* Lisboa: LIDEL.
- Medeiros, C. (2005). Cheias e inundações do rio Tejo em Abrantes. *Territorium 12*, 55-77.
- Mendes, C. & Cirilo, J. (2001). *Geoprocessamento em Recursos Hídricos*. Porto Alegre: ABRH.
- Meyer, V. (2007). *GIS Based Multicriteria Analysis as Decision Support in Flood Risk Management*. FLOODsite Project Report.
- Miranda, J. & Baptista, A. (2006). *Manual de Riscos Naturais*. Lisboa: Instituto Dom Luiz.
- Pappenberger, F., Bevena, K., Horritt, M. & Blazkovic, S. (2005). Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of Hydrology*, 302, 46-69.
- Pedrosa, A. (2006). A integração da prevenção dos riscos no ordenamento territorial. *Colóquio sobre "Paisagem, Património e Riscos Naturais: perspectivas de planeamento comparado"* (pp. 1-14). Porto: CCDR NORTE.
- Pistrika, A. & Jonkman, S. (2010). Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after hurricane Katrina. *Nat Hazards*. Springer.
- Ponce, V. (1989). *Engineering Hydrology, Principles and Practices*. Prentice Hall.
- Ramos, C. & Reis, E. (2001). As cheias no sul de Portugal em diferentes tipos de bacias hidrográficas. *Finisterra XXXVI, 71*, 61-82.

- Ramos, C. & Zêzere, J. (2001). A cheia rápida de 25-26 de Novembro de 1967 na área de Odivelas-Loures. Relembrar 67 - o fenómeno que marcou Odivelas. *Município de Odivelas, GMPC*, 3.
- Ramos, C., Zêzere, J. & Reis, E. (2010). Avaliação da Susceptibilidade aos Perigos Naturais na região de Lisboa e Vale do Tejo. *Prospectiva e Planeamento, Vol. 17, Lisboa*, 57-73.
- Rebello, F. (1999). A teoria do risco vista numa perspectiva geográfica. *Cadernos de Geografia, 18, Coimbra*, 3-13.
- Rebello, F. (2003). *Riscos Naturais e Acção Antrópica, 2ª ed. revista e aumentada*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Rodrigues, A., Fialho, R., Robalo, G. & Pereira, M. (2010). Cheias no Tejo, Uma Evolução Histórica. *infotejo, 10, Dezembro, www.arhtejo.pt*, 02-03.
- Schumann, G., Hostache, R., Puech, C., Hoffmann, L., Matgen, P., Pappenberger, F. & Pfister, L. (2007). High-resolution 3D flood information from radar imagery for flood hazard management. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45*, 1715–1725.
- Serviços de Informação Geográfica do Médio Tejo (CIMT): Plataforma *online*: (<http://sig.mediatejo.pt>), consultado em janeiro de 2012.
- SNIRH. Consulta de dados hidrológicos: (<http://snirh.inag.pt>), consultado em outubro de 2011 e fevereiro de 2012.
- Sousa, M. (2010). *Comparação entre ferramentas de modelagem unidimensional e quasi-bidimensional, permanente e não permanente, em planeamento e projetos de engenharia hidráulica*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- Stahler, A. H. (2001). *Physical Geography: Science and Systems of the Human Environment, 2nd edition*. Inc, New York: John Wiley & Sons.
- UNDRO. (1979). Natural Disasters and Vulnerability Analysis, Report of Expert Group Meeting. *Office of the United Nations Disasters Relief Coordinator*. Geneva.
- USACE. (1993). *River Hydraulics: Engineer Manual*. Washington, Dc: Department of US Army Corps of Engineers.
- USACE. (1996). *Risk-based analysis for flood damage reduction studies. Technical report EM 1110-2-1969*. Washington, D.C.: US Army Corps of Engineers.
- USACE. (2010). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic References Manual V4.1*. Davis, C.A.: US Army Corps of Engineers - Hydraulic Engineering Center.

- USACE. *Download dos software HEC-RAS/HEC-GEORAS:* (<http://www.hec.usace.army.mil/>), consultado em outubro de 2011.
- Veyret, Y. & Pech, P. (1993). *L'homme et l'environnement*, PUF, coll.Paris: Premier Cycle.
- Vlab. *Online Calculations*. Calculo das probabilidades de ocorrência Gumbel: (<http://ponce.tv/onlinegumbel2.php>), consultado em dezembro de 2011.
- Westen, C. (2004). Geoinformation science and earth observation for municipal risk management: the SLARIM project: powerpoint. In: Proceeding of the 9th international seminar on GIS: emergency and disaster response with GIS, 8-9 September 2004, Seoul, / ed. by Kyu-Bang Lee. Korea. Korea Research Institute for Human Settlements. pp. 153-177.
- Yahya, B., Devi, N. & Umrikar, B. (2010). Flood Hazard Mapping by Integrated GIS SCS. *INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOMATICS AND GEOSCIENCES*, Volume 1, 3, 489-500.
- Zêzere, J., Peeira, A. & Morgado, P. (2005). Perigos naturais e tecnológicos no território de Portugal Continental. *X Colóquio Ibérico de Geografia "A Geografia Ibérica no contexto europeu"*, Livro de Resumos (pp. 217-218). Évora.
- Zêzere, J., Pereira, A. & Morgado, P. (2007). Perigos naturais em Portugal e ordenamento do território. E depois do PNOT? *Geophilia - O sentir e os sentidos da Geografia*, C.E.G., pp.529-542.
- Zêzere, J., Ramos, C., Reis, E., Garcia, R. & Oliveira, S. (2008). Plano Regional de Ordenamento do Território do Oeste e Vale do Tejo. Riscos e Proteção Civil. Diagnóstico Estratégico. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento de Lisboa e Vale do Tejo.
- Zêzere, J., Ramos, C., Reis, E. & Melo, R. (2009). Avaliação de perigos naturais, tecnológicos e ambientais no ordenamento do território da Área Metropolitana de Lisboa. *VII Congresso da Geografia Portuguesa. Trunfos de uma Geografia Activa*, (p. 74). Coimbra.

## **ANEXO 1**

Valores do coeficiente de rugosidade de Manning utilizados nas várias simulações (S1 a S6).

Simulação			S1			S2			S3		
	Estação	(n/K)	n 1	n 2	n 3	n 1	n 2	n 3	n1	n2	n3
<b>Belver</b>	50012.37	n	0.045	0.033	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
2	49686.25	n	0.045	0.033	0.045	0.045	0.001	0.045	0.045	0.001	0.045
3	49344.46	n	0.08	0.033	0.045	0.08	0.001	0.045	0.08	0.001	0.045
4	49056.16	n	0.08	0.033	0.045	0.08	0.001	0.045	0.08	0.001	0.045
5	48096.08	n	0.035	0.033	0.045	0.035	0.001	0.045	0.035	0.001	0.045
6	47464.09	n	0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
7	46779.84	n	0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
8	46190.85	n	0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
9	45603.73	n	0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
10	44659.25	n	0.06	0.033	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
11	43832.77	n	0.06	0.033	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
12	42832.6	n	0.06	0.033	0.045	0.06	0.001	0.045	0.06	0.001	0.045
13	42246.54	n	0.08	0.033	0.045	0.06	0.001	0.045	0.06	0.001	0.045
14	41135.46	n	0.08	0.033	0.045	0.06	0.001	0.045	0.06	0.001	0.045
15	40535.09	n	0.08	0.033	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
16	39545.17	n	0.08	0.033	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
17	38802.41	n	0.08	0.033	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
18	38088.07	n	0.08	0.033	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
19	36943.42	n	0.08	0.033	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
20	36190.65	n	0.08	0.033	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
21	35150.48	n	0.045	0.033	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
22	33998.91	n	0.045	0.033	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
23	32813.79	n	0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
24	31341.9	n	0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
25	30433.42	n	0.035	0.033	0.035	0.1	0.001	0.035	1	0.001	0.035
<b>Abrantes</b>	29558.69	n	0.016	0.033	0.016	0.1	0.001	0.016	1	0.001	0.016
27	29093.96	n	0.035	0.033	0.035	0.1	0.001	0.035	1	0.001	0.035
28	28180.29	n	0.045	0.033	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
29	27562.63	n	0.045	0.033	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
30	26641.52	n	0.045	0.033	0.045	0.045	0.001	0.045	0.045	0.033	0.045
<b>Tramagal</b>	25663.12	n	0.035	0.033	0.06	0.035	0.001	0.06	0.035	0.033	0.06
32	25082.83	n	0.035	0.033	0.06	0.035	0.001	0.06	0.035	0.033	0.06
33	24176.87	n	0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.033	0.035
34	23594.49	n	0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.033	0.035

(Continua na página seguinte)

(Continuação da Página anterior)

Simulação				S1			S2			S3		
	Estação	(n/K)		n 1	n 2	n 3	n 1	n 2	n 3	n1	n2	n3
35	22936.84	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.033	0.035
36	22228.88	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.033	0.035
37	21589.59	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.033	0.035
38	20188.36	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.033	0.035
39	19263.14	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.033	0.035
40	18296.83	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
41	17337.44	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
42	16367.46	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
43	15740.65	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
<b>Constância</b>	14412.15	n		0.035	0.033	0.016	0.035	0.001	0.016	0.035	0.001	0.016
45	13198.84	n		0.06	0.033	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
46	11827.81	n		0.06	0.033	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
47	10661.02	n		0.06	0.033	0.06	0.06	0.001	0.06	0.06	0.001	0.06
<b>Almourol</b>	9379.021	n		0.06	0.033	0.045	0.06	0.001	0.045	0.06	0.001	0.045
49	8061.777	n		0.016	0.033	0.016	0.016	0.001	0.016	0.016	0.001	0.016
50	4955.366	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.033	0.016
<b>Barquinha</b>	2972.587	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.033	0.016
52	617.4155	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.033	0.016

Simulação				S4			S5			S6		
	Estação	(n/K)		n1	n2	n3	n1	n2	n3	n1	n2	n3
<b>Belver</b>	50012.37	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
2	49686.25	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
3	49344.46	n		0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
4	49056.16	n		0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
5	48096.08	n		0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
6	47464.09	n		0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
7	46779.84	n		0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
8	46190.85	n		0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
9	45603.73	n		0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
10	44659.25	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
11	43832.77	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
12	42832.6	n		0.045	0.001	0.045	0.045	0.001	0.045	0.045	0.001	0.045

(Continua na página seguinte)

(Continuação da Página anterior)

Simulação				S4			S5			S6		
	Estação	(n/K)		n 1	n 2	n 3	n 1	n 2	n 3	n1	n2	n3
13	42246.54	n		0.045	0.001	0.045	0.045	0.001	0.045	0.045	0.001	0.045
14	41135.46	n		0.045	0.001	0.045	0.045	0.001	0.045	0.045	0.001	0.045
15	40535.09	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
16	39545.17	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
17	38802.41	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
18	38088.07	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
19	36943.42	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
20	36190.65	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
21	35150.48	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
22	33998.91	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
23	32813.79	n		0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
24	31341.9	n		0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
25	30433.42	n		2	0.001	0.035	2	0.001	0.035	2	0.001	0.035
<b>Abrantes</b>	29558.69	n		2	0.001	0.035	2	0.001	0.035	2	0.001	0.035
27	29093.96	n		2	0.001	0.035	2	0.001	0.035	2	0.001	0.035
28	28180.29	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
29	27562.63	n		0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035	0.045	0.001	0.035
30	26641.52	n		0.045	0.001	0.045	0.045	0.001	0.045	0.045	0.001	0.045
<b>Tramagal</b>	25663.12	n		0.035	0.045	0.06	0.035	0.045	0.06	0.035	0.045	0.06
32	25082.83	n		0.045	0.045	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
33	24176.87	n		0.045	0.045	0.045	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
34	23594.49	n		0.045	0.045	0.045	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
35	22936.84	n		0.045	0.045	0.045	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
36	22228.88	n		0.045	0.045	0.045	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
37	21589.59	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.033	0.035	0.035	0.033	0.035
38	20188.36	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.033	0.035	0.035	0.033	0.035
39	19263.14	n		0.035	0.033	0.035	0.035	0.033	0.035	0.035	0.033	0.035
40	18296.83	n		0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
41	17337.44	n		0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
42	16367.46	n		0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
43	15740.65	n		0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035	0.035	0.001	0.035
<b>Constância</b>	14412.15	n		0.035	0.001	0.016	0.035	0.001	0.016	0.035	0.001	0.016
45	13198.84	n		0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
46	11827.81	n		0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035	0.06	0.001	0.035
47	10661.02	n		0.06	0.001	0.06	0.06	0.001	0.06	0.06	0.001	0.035

(Continua na página seguinte)

(Continuação da página anterior)

Simulação			S4			S5			S6		
	Estação	(n/K)	n 1	n 2	n 3	n 1	n 2	n 3	n1	n2	n3
<b>Almourol</b>	9379.021	n	0.05	0.001	0.035	0.05	0.001	0.035	0.05	0.001	0.035
49	8061.777	n	0.016	0.001	0.016	0.016	0.001	0.016	0.016	0.001	0.016
50	4955.366	n	0.035	0.033	0.016	0.035	0.033	0.016	0.035	0.033	0.016
<b>Barquinha</b>	2972.587	n	0.035	0.033	0.016	0.05	0.033	0.016	0.05	0.033	0.016
52	617.4155	n	0.06	0.06	0.016	0.05	0.05	0.035	0.05	0.05	0.05

## **ANEXO 2**

Média e desvio padrão da variável de Gumbel em função do número de observações (Gumbel, 1958).

n	$\bar{y}_n$	$\sigma_n$	n	$\bar{y}_n$	$\sigma_n$	n	$\bar{y}_n$	$\sigma_n$
8	0,4843	0,9043	35	0,5403	1,1285	64	0,5533	1,1793
9	0,4902	0,9288	36	0,5410	1,1313	66	0,5538	1,1814
10	0,4952	0,9497	37	0,5418	1,1339	68	0,5543	1,1834
11	0,4996	0,9676	38	0,5424	1,1363	70	0,5548	1,1854
12	0,5035	0,9833	39	0,5430	1,1388	72	0,5552	1,1873
13	0,5070	0,9972	40	0,5436	1,1413	74	0,5557	1,1890
14	0,5100	1,0095	41	0,5442	1,1436	76	0,5561	1,1906
15	0,5128	1,0206	42	0,5448	1,1458	78	0,5565	1,1923
16	0,5157	1,0316	43	0,5453	1,1480	80	0,5569	1,1938
17	0,5181	1,0411	44	0,5458	1,1499	82	0,5572	1,1953
18	0,5202	1,0493	45	0,5463	1,1519	84	0,5576	1,1967
19	0,5220	1,0566	46	0,5468	1,1538	86	0,5580	1,1980
20	0,5236	1,0628	47	0,5473	1,1557	88	0,5583	1,1994
21	0,5252	1,0696	48	0,5477	1,1574	90	0,5586	1,2007
22	0,5268	1,0754	49	0,5481	1,1590	92	0,5589	1,2020
23	0,5283	1,0811	50	0,5485	1,1607	94	0,5592	1,2032
24	0,5296	1,0864	51	0,5489	1,1623	96	0,5595	1,2044
25	0,5309	1,0915	52	0,5493	1,1638	98	0,5598	1,2055
26	0,5320	1,0961	53	0,5497	1,1653	100	0,5600	1,2065
27	0,5332	1,1004	54	0,5501	1,1667	150	0,5646	1,2253
28	0,5343	1,1047	55	0,5504	1,1681	200	0,5672	1,2360
29	0,5353	1,1086	56	0,5508	1,1696	250	0,5688	1,2429
30	0,5362	1,1124	57	0,5511	1,1708	300	0,5699	1,2479
31	0,5371	1,1159	58	0,5515	1,1721	400	0,5714	1,2545
32	0,5380	1,1193	59	0,5518	1,1734	500	0,5724	1,2588
33	0,5388	1,1226	60	0,5521	1,1747	750	0,5738	1,2651
34	0,5396	1,1255	62	0,5527	1,1770	1000	0,5745	1,2685

