



**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

**Mestrado em Engenharia dos Recursos Hídricos**

**Dissertação**

**Comparação dos Modelos Hidráulicos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na  
Avaliação do Risco de Inundação num Troço do Rio Lis**

Olga Lopes Miranda

**Orientador:** Maria Madalena Vitório Moreira Vasconcelos

2011

**Mestrado em Engenharia dos Recursos Hídricos**

**Dissertação**

**Comparação dos Modelos Hidráulicos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na  
Avaliação do Risco de Inundação num Troço do Rio Lis**

Olga Lopes Miranda

**Orientador:** Maria Madalena Vitório Moreira Vasconcelos

---

*“A natureza tem para tudo o seu objectivo”*

Aristóteles

---

## **Comparação dos Modelos Hidráulicos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na Avaliação do Risco de Inundação num Troço do Rio Lis**

### **Resumo**

A avaliação do risco de inundação surge como medida de mitigação da vulnerabilidade da comunidade à ocorrência de eventos hidrológicos extremos. Os objectivos principais do presente estudo são a apresentação e âmbito de aplicação de seis modelos hidráulicos, disponíveis no mercado, e a comparação da aplicação dos modelos LISFLOOD-FP e HEC-RAS na avaliação do risco de inundação, num troço de 4 km do Rio Lis, entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca. Na aplicação ao troço do Rio Lis foi efectuada a caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica, com recurso aos sistemas de informação geográfica. No cálculo do caudal centenário aplicou-se o modelo hidrológico HEC-HMS. Após a preparação dos dados de entrada nos modelos escolhidos foram obtidas as zonas inundáveis para o troço em estudo e comparados os resultados. A avaliação do risco de inundação efectuada teve em atenção os termos do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro.

### **Palavras-chave:**

Avaliação do risco de inundação, delimitação de zonas inundáveis, HEC-HMS, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, modelação hidrológica, modelação hidráulica, sistemas de Informação geográfica.

---

## **Comparison of HEC-RAS and LISFLOOD-FP Hydraulic Models in the Assessment of Flood Risk in a Reach of the River Lis**

### **Abstract**

Flood risk assessment comes up as a mitigation measure of the community vulnerability to the occurrence of extreme hydrological events. The main aims of the current study are the presentation and scope of six hydraulic models available in the market and the comparison of application of the models LISFLOOD-FP and HEC-RAS in a 4 km reach of the River Lis, between bridge of Miguel and bridge of Bajanca. It was made a description of the physiographic features of the River Lis watershed with the support of geographic information systems. To estimate the discharge for a storm event of 100 years it was applied the model HEC-HMS. After preparing the input data of the two models the delineation of the study area was obtained and the results were compared. The flood risk assessment took into account the terms of Portuguese law.

### **Key words:**

Flood risk assessment, flood zone delineation, geographic information systems, HEC-HMS, HEC-RAS, Hydrologic modeling, hydraulic modeling, LISFLOOD-FP.

---

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer à Professora Maria Madalena Moreira Vasconcelos, orientadora do presente estudo, pela sua disponibilidade e paciência durante o tempo que decorreu este trabalho e ainda ao Engenheiro Paulo Fernandez pela ajuda, assim como, pelo fornecimento de dados de base, sem os quais, este estudo nunca poderia ter sido desenvolvido.

Gostaria de agradecer a todos aqueles que me acompanharam e me deram força para continuar e terminar este estudo.

---

# Índice

1. Introdução e objectivos.....	1
1.1 Justificação e enquadramento .....	1
1.2 Enquadramento legal .....	3
1.2.1 Directiva 2007/60/CE, de 23 de Outubro .....	3
1.2.2 Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro .....	5
1.3 Objectivos do trabalho .....	7
1.4 Estrutura do documento .....	8
2. Modelação hidrológica e hidráulica .....	10
2.1 Introdução .....	10
2.2 Modelos hidráulicos. Exemplos de aplicação. ....	15
2.2.1 Modelo FLO-2D .....	15
2.2.2 Modelo HEC-RAS .....	16
2.2.3 Modelo LISFLOOD-FP .....	18
2.2.4 Modelo TELEMAC-2D .....	20
2.2.5 Modelo TUFLOW .....	22
2.2.6 Modelo SOBEK .....	23
2.3 Apresentação dos modelos hidráulicos FLO-2D, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAC-2D, TUFLOW e SOBEK .....	24
2.3.1 Equações fundamentais do escoamento e leis de resistência .....	26
2.3.1.1 Equação da continuidade .....	26
2.3.1.2 Equação de equilíbrio dinâmico .....	27
2.3.1.3 Equação da energia .....	30
2.3.1.4 Leis de resistência .....	30
2.4 Características dos modelos FLO-2D, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAC-2D, TUFLOW e SOBEK .....	31
2.5. Dados de entrada .....	33
2.5.1 Modelo FLO-2D .....	33
2.5.2 Modelo HEC-RAS .....	34
2.5.3 Modelo LISFLOOD-FP .....	34
2.5.4 Modelo TELEMAC-2D .....	36
2.5.5 Modelo TUFLOW .....	37
2.5.6 Modelo SOBEK .....	38
2.6 Dados de Saída .....	38
2.6.1 Modelo FLO-2D .....	38
2.6.2 Modelo HEC-RAS .....	39

---

2.6.3 Modelo LISFLOOD-FP .....	39
2.6.4 Modelo TELEMAC-2D .....	40
2.6.5 Modelo TUFLOW .....	41
2.6.6 Modelo SOBEK .....	41
3. Caracterização da sub-bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca .....	43
3.1 Introdução .....	43
3.2 Elementos de suporte à caracterização fisiográfica .....	43
3.3 Metodologia aplicada .....	43
3.4 Enquadramento geográfico .....	44
3.5 Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca .....	46
3.5.1 Forma da bacia hidrográfica .....	46
3.5.2 Caracterização do relevo .....	46
3.5.3 Caracterização do solo .....	48
3.5.4 Ocupação do solo – <i>Corine Land Cover</i> .....	50
3.5.5 Número de escoamento (CN) .....	52
3.5.6 Rede hidrográfica .....	54
3.5.6.1 Ordem das linhas de água .....	54
3.5.6.2 Linha de água principal .....	54
3.5.6.3 Tempo de resposta da bacia ( $t_{lag}$ ) .....	55
3.5.6.4 Tempo de concentração ( $t_c$ ) .....	56
3.6 Registo de Cheias/ Inundações .....	56
4. Modelação hidrológica. Aplicação do modelo HEC-HMS .....	59
4.1 Metodologia aplicada ao caso de estudo .....	59
4.2 Determinação do caudal de ponta de cheia e hidrograma de cheia .....	60
5. Modelação hidráulica. Aplicação dos modelos LISFLOOD-FP e HEC-RAS ao caso de estudo. ....	62
5.1 Introdução .....	62
5.2 Modelo LISFLOOD-FP .....	63
5.2.1 Notas prévias sobre o modelo hidráulico LISFLOOD-FP .....	63
5.2.2 Hipóteses simplificativas e limitações do modelo LISFLOOD-FP .....	63
5.2.3 Requisitos do modelo hidráulico LISFLOOD-FP .....	64
5.2.4 Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP ao caso de estudo. Preparação dos dados de entrada .....	65

---



---

5.2.5 Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP ao caso de estudo. Resultados e discussão .....	70
5.3 Modelo HEC-RAS .....	75
5.3.1 Notas prévias sobre o modelo HEC-RAS, versão comercial do RIVERCAD-PRO ..	75
5.3.2 Hipóteses simplificativas e limitações do modelo hidráulico HEC-RAS.....	76
5.3.3 Requisitos do modelo hidráulico HEC-RAS.....	77
5.3.4 Aplicação do modelo hidráulico HEC-RAS ao caso de estudo. Preparação dos dados de entrada.....	78
5.3.5 Aplicação do modelo hidráulico HEC-RAS ao caso de estudo. Resultados e discussão .....	79
5.4 – Comparação dos resultados.....	82
6. Avaliação do risco de inundação .....	86
6.1 Introdução.....	86
6.2 Caracterização da ocupação da área inundada.....	87
6.3 Elementos de ocupação do solo susceptíveis à inundação de média probabilidade de ocorrência determinada através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP. ....	91
6.4 Elementos de ocupação do solo, susceptíveis à inundação de média probabilidade de ocorrência, determinada através do modelo hidráulico HEC-RAS.92	
6.5 Comparação dos resultados obtidos: LISFLOOD-FP e HEC-RAS .....	94
7. Conclusões, limitações e trabalhos futuros .....	95
7.1 Conclusões .....	95
7.2 Limitações do presente estudo.....	97
7.3 Trabalhos futuros.....	97
Bibliografia .....	i

Anexos

---

## Índice de Figuras

Figura 1 – Representações do escoamento em superfície livre. 1D (esquerda) e 2D (direita), fonte MHL, 2006.....	13
Figura 2 – Volume de controlo. ....	27
Figura 3 – Vista em planta, (esquerda), e perfil longitudinal, (direita), do volume de controlo. Desenho adaptado de MHL, 2006.....	29
Figura 4 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Lis.....	45
Figura 5 – Troço de 4 km do Rio Lis, entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca. Ortofotomapas, com sobreposição da linha de água e das margens.....	45
Figura 6 – Delimitação da bacia hidrográfica do Rio Lis e localização do troço de 4 km entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca. ....	46
Figura 7 – Carta hipsométrica da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.....	47
Figura 8 – Carta de declives da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.....	48
Figura 9 – Classificação dos solos de acordo com o grupo hidrológico para a bacia.. hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.....	49
Figura 10 – Ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.....	51
Figura 11 – Ordem das linhas de água da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca. ....	54
Figura 12 – Linhas de água da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.....	55
Figura 13 – Esquema do modelo da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção ..... da ponte da Bajanca. Desenho ilustrativo sem escala.....	59
Figura 14 – Hidrograma de Cheia obtido através do programa HEC-HMS, versão 3.4, para um período de retorno de 100 anos, aplicado à secção da ponte da Bajanca do Rio Lis.....	61
Figura 15 – Troço de 4 km do Rio Lis entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca. ..	62
Figura 16 – Representação esquemática do escoamento no leito maior do modelo LISFLOOD-FP. Desenho adaptado do Manual do Utilizador do modelo LISFLOOD-FP (Bates, 2007). ....	64
Figura 17 – Processos envolvidos na criação do MDT. Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP para o troço de 4 km do Rio Lis em estudo. ....	66
Figura 18 – Caracterização do canal – ficheiro: <i>lis.river</i> – Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP para o troço de 4 km do Rio Lis, entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca. ....	68
Figura 19 – Condições de fronteira – ficheiro: <i>lis.bci</i> – Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP para o troço de 4 km do Rio Lis, entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca.....	68

---

Figura 20 – Parâmetros do modelo – ficheiro: <i>lis.par</i> – Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP para o troço de 4 km do Rio Lis, entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca.....	69
Figura 21 – Ficheiro <i>res.profile</i> da aplicação do modelo LISFLOOD-FP ao troço de 4 km do Rio Lis entre a secção da ponte de Miguel e da ponte da Bajanca.....	73
Figura 22 – Perfil da superfície livre – ficheiro: <i>res.profile</i> – Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP para o troço de 4 km do Rio Lis, entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca. ....	73
Figura 23 – Delimitação da zona inundável obtida através da aplicação do modelo LISFLOOD-FP para o troço do Rio Lis em estudo.....	75
Figura 24 – Perfil da superfície livre. Aplicação do modelo hidráulico HEC-RAS para o troço de 4 km do Rio Lis entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca.....	81
Figura 25 – Delimitação da zona inundável obtida através da aplicação do modelo HEC-RAS para o troço de 4 km do Rio Lis em estudo.....	82
Figura 26 – Comparação das zonas inundáveis determinadas através dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e RIVERCAD-PRO. ....	83
Figura 27 – Levantamento de campo.....	88
Figura 28 – Ponte da Bajanca, jusante.....	89
Figura 29 – Ponte da Bajanca, montante.....	89
Figura 30 – Lar de idosos.....	89
Figura 31 – Estação de bombagem.....	89
Figura 32 – Estação de bombagem.....	89
Figura 33 – Telheiro.....	89
Figura 34 – Casas de habitação.....	89
Figura 35 – Campos agrícolas.....	89
Figura 36 – Ponte da Junceira, jusante.....	89
Figura 37 – Ponte da Junceira, montante.....	89
Figura 38 – Canal de rega.....	90
Figura 39 – Quinta.....	90
Figura 40 – Exploração Agrícola.....	90
Figura 41 – SimLis. ETAR.....	90
Figura 42 – Estufa.....	90
Figura 43 – Ruínas/ Vacaria.....	90
Figura 44 – Casas de habitação.....	90
Figura 45 – Vacaria.....	90
Figura 46 – Ponte de Miguel, jusante.....	90
Figura 47 – Ponte de Miguel, jusante.....	90

---

---

Figura 48 – Vista em planta da zona inundável obtida para a simulação efectuada através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP. Fotografia do <i>Google-Earth</i> . .....	92
Figura 49 – Vista em planta da zona inundável obtida para a simulação efectuada através do modelo hidráulico HEC-RAS. Fotografia do <i>Google-Earth</i> . .....	93
Figura A4.1 – Alturas de água simuladas através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: <i>res.0172.wd</i> ). .....	A IV.2
Figura A4.2 – Cotas de cheia simuladas através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: <i>res.mxe</i> ). .....	A IV.3
Figura A4.3 – Alturas máximas da superfície livre simuladas através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: <i>res.max</i> ). .....	A IV.3
Figura A4.4 – Tempo de inundação inicial para cada célula, ( <i>pixel</i> ), da malha <i>raster</i> , obtido durante simulação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: <i>res.inittm</i> ). .....	A IV.4
Figura A4.5 – Tempo de inundação total para cada célula, ( <i>pixel</i> ), da malha <i>raster</i> , obtido durante simulação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: <i>res.totaltm</i> ). .....	A IV.4

---

## Índice de Quadros

Quadro 1 – Entidade responsável e âmbito de aplicação dos modelos FLO-2D, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAC-2D, TUFLOW e SOBEK. ....	25
Quadro 2 – Características principais dos modelos hidráulicos FLO-2D, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAC-2D, TUFLOW e SOBEK. ....	32
Quadro 3 – Dados de entrada do modelo hidráulico FLO-2D. ....	33
Quadro 4 – Tipos de condições de fronteira do modelo hidráulico LISFLOOD-FP. ....	35
Quadro 5 – Tipo de relevo da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca (Costa, 2001). ....	48
Quadro 6 – Distribuição dos solos segundo o grupo hidrológico (classificação do SCS), para a bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca. ....	49
Quadro 7 – Percentagem de ocupação do solo segundo a carta <i>Corine Land Cover</i> para a bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca. ....	52
Quadro 8 – Números de escoamento da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca. ....	53
Quadro 9 – Resultados da aplicação do modelo HEC-HMS, versão 3.4, para a bacia hidrográfica do Rio Lis, na secção da ponte da Bajanca. ....	61
Quadro 10 – Dados de entrada do modelo LISFLOOD-FP. ....	65
Quadro 11 – Caracterização do canal. Modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: <i>lis.river</i> ). ....	67
Quadro 12 – Resultados obtidos através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: <i>lis.mass</i> ). ....	71
Quadro 13 – Cotas do leito, cotas da cheia centenária, alturas de água e cotas dos tabuleiros, nas secções de inserção das pontes de Miguel, da Junceira e da Bajanca. ....	74
Quadro 14 – Dados de entrada do modelo HEC-RAS, (versão comercial do RIVERCAD-PRO). ....	78
Quadro 15 – Dados de entrada introduzidos no modelo hidráulico HEC-RAS aplicados à zona de estudo. ....	79
Quadro 16 – Resultados da aplicação do modelo hidráulico HEC-RAS para o troço de 4 km do Rio Lis, entre a secção da ponte de Miguel e da ponte da Bajanca. ....	80

---

Quadro 17 – Cotas do leito, cotas da cheia centenária, alturas de água e cotas dos tabuleiros, nas secções de inserção das pontes de Miguel, da Junceira e da Bajanca. Aplicação do modelo hidráulico HEC-RAS. ....	80
Quadro 18 – Resultados obtidos através da aplicação dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS: Alturas de água obtidas para as secções das pontes de Miguel, Junceira e da Bajanca do troço do Rio Lis em estudo. ....	85
Quadro 19 – Elementos de ocupação do solo susceptíveis à inundação de média probabilidade de ocorrência determinada através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP. ....	91
Quadro 20 – Elementos da ocupa�o susceptíveis � inunda�o de média probabilidade de ocorrência determinada através do modelo hidráulico HEC-RAS....	93
Quadro 21 – Compara�o dos resultados obtidos através dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS na avalia�o do risco de inunda�o do troço de 4 km do Rio Lis em análise. ....	94
Quadro A1.1 – Números de escoamento CNII para diversas utiliza�es do solo segundo o SCS (Lencastre,2006).....	A I.2
Quadro A1.2 – Defini�o das condi�es de antecedentes de humidade (Matias, 2005). ....	A I.3
Quadro A1.3 – Classifica�o hidrológica dos solos segundo a classifica�o do SCS (Matias, 2005).....	A I.4
Quadro A2.1 – Parâmetros das curvas de IDF estabelecidas com base em precipita�es intensas registadas no posto udográfico de Coimbra (IG) – 12G/01..	A II.2
Quadro A3.1 – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning “n”. ....	A III.2

---

## Índice de Anexos

Anexo I – Número de Escoamento. ....	A I.1
Anexo II – Curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF). ....	A II.1
Anexo III – Valores do coeficiente de rugosidade de <i>Manning</i> , disponibilizados pelo software RIVERCAD-PRO. ....	A III.1
Anexo IV – Resultados do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, ficheiros no formato ascii. Visualização através do Flood View. ....	A IV.1

---

## Lista de Símbolos

$A$	Área total da bacia hidrográfica ( $m^2$ ) Área do escoamento ( $m^2$ ) Área molhada da secção transversal ( $m^2$ )
$a, b$	Parâmetros em função do período de retorno e da localização do posto hidrográfico
$B$	Largura de rasto da secção transversal (m)
$C$	Coefficiente de <i>Chézy</i> ( $m^{-1/2}$ )
$CN$	Número de escoamento
$D_m$	Declive médio da bacia hidrográfica (%)
$D_0$	Declive do perfil longitudinal do canal (m/m)
$Free$	Altura uniforme, simbologia utilizada pelo programa LISFLOOD-FP (m)
$g$	Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )
$h$	Altura do escoamento (m)
$i$	Intensidade de precipitação (mm/h)
$j$	Declive da linha de energia (m/m)
$K$	Coefficiente de rugosidade de <i>Manning-Strickler</i> ( $m^{1/3}/s$ )
$K_c$	Coefficiente de compacidade (-)
$K_f$	Factor de forma da bacia hidrográfica (-)
$L$	Perdas iniciais da chuvada (mm)
$l$	Comprimento da linha de água principal (m)
$n$	Coefficiente de atrito ou coefficiente de rugosidade de <i>Manning</i> ( $s/m^{1/3}$ )
$P$	Precipitação (mm)
$Q$	Caudal ( $m^3/s$ )



---

$Q_{Fix}$	Caudal constante, simbologia utilizada pelo programa LISFLOOD-FP (m <sup>3</sup> /s)
$q$	Caudal de percurso (m <sup>3</sup> /s/m)
$R_h$	Raio hidráulico (m)
$S$	Capacidade máxima de retenção da bacia hidrográfica (mm)
$t$	Tempo (s) Duração da precipitação (mm)
$t_c$	Tempo de concentração da bacia hidrográfica (h)
$t_{lag}$	Tempo de resposta da bacia hidrográfica (h)
$V$	Velocidade do escoamento (m/s)
$U$	Velocidade média do escoamento (m/s)
$W_f$	Coeficiente de atrito água-ar (-)
$z$	Cota de fundo do canal (m)
$\alpha$	Coeficiente de <i>Coriolis</i> (-)
$\beta$	Coeficiente de <i>Boussinesq</i> (-)
$\Delta H$	Perda de carga total (m)
$\Delta h$	Perda de carga localizada (m)
$\phi$	Capacidade de transporte (m <sup>3</sup> /s)

---

---

## 1. Introdução e objectivos

### 1.1 Justificação e enquadramento

Uma situação de cheia numa secção de uma linha de água, sob o ponto de vista hidrológico, acontece sempre que a precipitação dá origem à ocorrência de escoamento directo (Lencastre e Franco, 2006).

Existem inúmeros factores que provocam pressões nas linhas de água, como por exemplo, a alteração do uso do solo com consequências no escoamento superficial e transformações significativas do ciclo hidrológico da água. Um exemplo, com destaque para as situações hidrológicas extremas, é o caso de aumento de zonas urbanizadas que tem como consequência a redução da infiltração e incremento da velocidade de escoamento, agravando os caudais de ponta de cheia.

Desde 1998, a Europa sofreu mais de cem grandes eventos de inundação, destacando-se as ocorridas nas bacias do Danúbio e do Elba no Verão de 2002. As inundações subsequentes, em 2005 e 2007, vieram confirmar a crescente susceptibilidade da Europa ao fenómeno hidrológico extremo e reforçar a necessidade de serem tomadas medidas. Neste período, as inundações causaram mais de 700 mortos, deslocaram mais de meio milhão de pessoas e provocaram mais de 25 000 milhões de euros de prejuízos (Almeida, 2006).

Mais recentemente, os eventos de precipitação intensa que ocorreram a 20 de Fevereiro de 2010, na Madeira tiveram como consequência inundações na parte baixa da cidade do Funchal, provocando cerca de 600 desalojados, 250 feridos e 42 mortos (Pires *et al.*, 2010).

No presente estudo, importa considerar as situações hidrológicas extremas de uma linha de água associada à inundação dos terrenos marginais, assim como à ocupação pela água de zonas em que não está prevista, por incapacidade de drenagem da rede hidrográfica. Interessa, assim, aprofundar os conhecimentos relativos a estes eventos de modo a minimizar os seus riscos e impactos negativos do ponto de vista económico e social na comunidade. Neste contexto, a União Europeia criou legislação com objectivo de promover a avaliação e a implementação de meios para minimizar o impacto das

---

inundações como é o caso da Directiva 2007/60/CE, de 23 de Outubro, que surge como medida de redução do risco e consequências negativas das inundações.

Esta nova directiva constitui um complemento importante da legislação da União Europeia no domínio dos recursos hídricos. O objectivo da Directiva 2007/60/CE, de 23 de Outubro é o de estabelecer um quadro de avaliação e gestão de risco de inundação, a fim de reduzir as consequências desse fenómeno, que são prejudiciais para a saúde humana, para o ambiente, para o património e para as actividades económicas (Directiva 2007/60/CE, de 23 de Outubro).

As medidas contempladas na prevenção e gestão do risco de inundação têm em conta uma avaliação preliminar da inundação, a elaboração de cartas das zonas inundáveis e cartas de risco de inundações e, ainda, a elaboração dos planos de gestão dos riscos de inundação (Directiva 2007/60/CE, de 23 de Outubro).

Recentemente esta directiva foi transposta para a legislação nacional através do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro, o qual aprova o quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundações.

O risco de inundação, de acordo com a alínea d, do Artigo 2.º, do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro, é definido como a combinação da probabilidade de ocorrência de inundações, atendendo à intensidade de precipitação e consequências prejudiciais a vários níveis, nomeadamente para a saúde humana, economia e património cultural. A avaliação das consequências negativas deverá ser estimada através da identificação do número e tipo de actividades atingidas.

Considerando, por um lado, as inundações como fenómenos naturais e por outro, os inúmeros factores que contribuem para o aumento da sua probabilidade de ocorrência, como o crescimento das aglomerações humanas nas planícies aluviais, a redução da retenção natural da água devido à utilização do solo e as alterações climáticas (Directiva 2007/60/CE, de 23 de Outubro) sobrevém, assim, a necessidade de se terem disponíveis modelos hidrológicos e hidráulicos, calibrados e validados, capazes de

---

estudarem eventos históricos e futuros que permitam delimitar as zonas inundáveis.

No presente estudo, porém, os modelos em análise não foram calibrados. Essa tarefa poderia ter sido efectuada, através de fotografia aérea ou registos históricos em caso de inundaçã, comparando o hidrograma de cheia e os limites da inundaçã registados ou medidos no terreno com os resultados da modelaçã numérica para o evento de precipitaçã registado. No entanto, no âmbito deste trabalho não foi possível aceder a esta informaçã.

Neste contexto e, de modo a dar uma resposta às necessidades de gestão e planeamento dos recursos hídricos, em situaçã de eventos hidrológicos extremos, surge o tema deste trabalho.

## **1.2 Enquadramento legal**

Ao nível nacional, em termos legais, de acordo com o Decreto-Lei nº 468/71, de 5 de Novembro, alterado pelo Decreto-Lei nº 89/87, de 26 de Fevereiro, a identificaçã das áreas inundáveis é referida no âmbito da Reserva Ecológica Nacional, aludindo às zonas inundáveis como “os leitos dos cursos de água e zonas ameaçadas por cheias” e “áreas adjacentes”.

Por outro lado, o Decreto-Lei n.º 364/98, de 21 de Novembro, aquando da elaboraçã dos Planos Municipais de Ordenamento do Território, (PMOT), obriga a identificar as áreas inundáveis, o que significa que, em zonas urbanas, a definiçã das zonas inundáveis passou a ser uma condicionante da ocupaçã do território.

Mais recentemente com a entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro que transpõe a Directiva 2007/60/CE, de 23 de Outubro, será avaliado o risco de inundaçã de cada unidade de gestão hidrográfica e as respectivas medidas complementares para a sua atenuaçã.

### **1.2.1 Directiva 2007/60/CE, de 23 de Outubro**

As medidas de prevençã e de gestão dos riscos de inundaçã, especificadas pela presente directiva, contemplam a avaliaçã preliminar do risco de inundaçã, a elaboraçã de cartas das zonas inundáveis e cartas de risco de inundaçães e, ainda, a preparaçã dos planos de gestão dos riscos de inundaçã.

---

A avaliação preliminar dos riscos de inundações deverá estar concluída até 22 de Dezembro de 2011 e deve incluir: as cartas das regiões hidrográficas com os limites das bacias hidrográficas, sub-bacias, zonas costeiras, informação com os dados topográficos e a afectação do solo, assim como informação sobre as inundações sofridas no passado, a probabilidade de ocorrência de inundações e as suas consequências. Nesta fase os Estados-Membros da União Europeia devem classificar cada bacia hidrográfica ou parte do seu território como "zona de risco potencial significativo" ou como "zona sem risco potencial significativo". No caso de regiões hidrográficas transfronteiriças deve ser partilhada a informação pelos Estados-Membros envolvidos. A avaliação e a classificação devem ser disponibilizadas ao público e ser revista a cada seis anos (Directiva 2007/60/CE, de 23 de Outubro).

As cartas das zonas inundáveis e as cartas de risco de inundações deverão estar concluídas até 22 de Dezembro de 2013. Nestas cartas deve constar a demarcação e classificação das zonas segundo o nível de risco (alto, médio, baixo) com base nos diferentes cenários, nomeadamente fraca, média e elevada probabilidade de ocorrência de cheias. Devem ser considerados, ainda, os estragos previstos que possam causar à população local, aos bens e ao ambiente. Estes mapas devem também estar disponíveis ao público e têm de ser revistos de seis em seis anos (Directiva 2007/60/CE, de 23 de Outubro).

Os planos de gestão dos riscos de inundações para cada região hidrográfica devem ser concluídos e publicados até 22 de Dezembro de 2015, onde cada Estado-Membro deve elaborar e aplicar ao nível da demarcação hidrográfica, nomeadamente região, bacia, sub-bacia e zonas costeiras, um plano de gestão de riscos. No caso da zona considerada pertencer a vários países do espaço europeu, os Estados-Membros devem trabalhar em conjunto de forma a se conseguir um único plano de gestão. O resultado deste trabalho tem de estar disponível ao público e ainda ser revisto de seis em seis anos (Directiva 2007/60/CE, de 23 de Outubro).

Um dos objectivos destes planos é a inclusão de medidas de redução da probabilidade de ocorrência de inundações, assim como a diminuição das suas consequências.

---

As medidas referidas podem classificar-se em medidas de prevenção, medidas de protecção e medidas de preparação conforme o seu objectivo seja a gestão da água e do solo, a afectação do solo e a conservação da natureza. Podem ser definidas medidas no âmbito do desenvolvimento de sistemas de previsão e de alerta precoce, na promoção de práticas de utilização sustentável, na melhoria da retenção da água e na inundação controlada de determinadas zonas em caso de cheia (Directiva 2007/60/CE, de 23 de Outubro).

### **1.2.2 Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro**

O Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro constitui um instrumento que permite estabelecer prioridades e tomar decisões técnicas, financeiras e políticas no âmbito da gestão e risco de inundações, dando resposta às necessidades, ao nível local, regional e nacional. As medidas contempladas no presente Decreto-Lei devem ser conduzidas à escala das bacias hidrográficas e articuladas com os regimes legais em vigor.

Actualmente encontram-se em desenvolvimento os planos de bacias hidrográficas de 2ª geração nomeadamente para as regiões hidrográficas 6, (bacias do Sado e Mira) e 7, (bacia do Guadiana), que representam uma nova fase na gestão dos recursos hídricos, pois devem ter em conta os critérios e objectivos do presente Decreto-Lei aquando da avaliação do risco de cheia a elaborar no âmbito dos mesmos.

Os planos de gestão dos riscos de inundações (PGRI) devem beneficiar dos estudos e trabalhos existentes mas também fornecer informação adicional de forma a actualizar os instrumentos legais preexistentes (Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro).

O objectivo do referido Decreto-Lei é o de estabelecer um quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundações com o fim de reduzir as consequências negativas de tais fenómenos que são prejudiciais para a comunidade ao nível da saúde, o ambiente, o património cultural, infra-estruturas e as actividades económicas, transpondo assim a Directiva n.º 2007/60/CE, de 23 de Outubro, para a ordem jurídica nacional (Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro).

Entre muitos conceitos, o Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro define alguns pertinentes para o presente estudo, passando a citar:

---

“Inundações: a cobertura temporária por água de uma parcela do terreno fora do leito normal, resultante de cheias provocadas por fenómenos naturais como a precipitação, incremento do caudal dos rios, torrentes de montanha e linhas de água efémeros, correspondendo estas a cheias fluviais, ou de sobrelevação do nível das águas do mar nas zonas costeiras” (Alínea a, do número1, do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro);

“Leito normal: o terreno ocupado pelas águas com o caudal que resulta da média dos caudais máximos instantâneos anuais, sendo que no caso de águas sujeitas à influência das marés corresponde à zona atingida pela máxima preia-mar das águas vivas equinociais” (Alínea a, do número1, do Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro);

“Unidade de gestão: a região de influência da drenagem topográfica ou de exposição marítima que pela singularidade especial da sua vulnerabilidade justifique a sua autonomização para as etapas de avaliação de risco previstas no presente decreto-lei” (Alínea a, do número1, do Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro);

“Edifícios sensíveis: os hospitais, lares de idosos, creches, infantários, escolas, edifícios de armazenamento ou processamento de substâncias perigosas, infra-estruturas de gestão de efluentes e de armazenamento ou transformação de resíduos, e edifícios com importância na gestão de emergências, nomeadamente quartéis de bombeiros, instalações das forças de segurança e das forças armadas, da Cruz Vermelha, comando nacional e comandos distritais de operações de socorro e serviços municipais de protecção civil” (Alínea a, do número1, do Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro).

Os instrumentos de avaliação e gestão dos riscos de inundações expostos no Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro, o qual transpõe a Directiva n.º 2007/60/CE, de 23 de Outubro, deverão ser adoptados e faseados para que se cumpram as medidas preventivas, referidas no ponto 1.2.1, respectivamente:

- Avaliação preliminar dos riscos de inundações;
- Cartas de riscos de inundações;
- Planos de gestão dos riscos de inundações.

Com a entrada em vigor do presente Decreto-Lei são definidas as entidades competentes, assim como as suas funções, a saber: o Instituto da Água (INAG),

---

as Administrações das Regiões Hidrográficas (ARH), a Autoridade Nacional de Protecção Civil (ANPC) e o Instituto Geográfico Português (IGP). É criada a Comissão Nacional de Gestão dos Riscos de Inundação (CNGRI), que depende do membro do Governo responsável pelas áreas do ambiente e do ordenamento do território. Esta organização é composta por um membro de cada entidade competente e tem como principal objectivo apoiar cada membro, assim como a emissão de pareceres, dando apoio a zonas densamente povoadas (Artigo 4.º, do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro).

De acordo com o presente Decreto-Lei, no caso de inundação de elevada probabilidade de ocorrência e, em zonas densamente povoadas, as cartas de zonas inundáveis devem ser propostas pela CNGRI (Artigo 7.º, do Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro). E ainda, na situação de inundação de baixa probabilidade de ocorrência, as ARH, em conjunto com a CNGRI, podem elaborar as cartas de zonas inundáveis (Artigo 7.º, do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro).

Atendendo à necessidade de avaliar, mapear e, posteriormente, gerir os riscos das inundações, torna-se indispensável a utilização de ferramentas capazes e precisas, nomeadamente *softwares* que permitam a modelação hidrológica e hidráulica de bacias hidrográficas e que possibilitam a tomada de decisões ao nível do planeamento regional de forma mais real e viável. Assim, consideramos o tema deste trabalho bem articulado com a procura da União Europeia e com o enquadramento nacional, no que se refere às novas tecnologias, nomeadamente a modelação hidráulica no estudo das inundações.

### **1.3 Objectivos do trabalho**

O presente trabalho tem como objectivos:

- Apresentar as principais características e as aplicações de seis modelos hidráulicos na delimitação de zonas inundáveis, nomeadamente: FLO-2D, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAC-2D, TUFLOW e SOBEK;
- Aplicar os modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS, ao troço de 4 km do Rio Lis, entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca, para delimitação das zonas inundáveis e um período de retorno de 100 anos;



- 
- Comparar a delimitação das zonas inundáveis obtidas através dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS;
  - Avaliar o risco de inundação com base no Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro, para a zona em estudo.

A metodologia aplicada teve como ponto de partida a selecção dos modelos hidráulicos mais utilizados em países como Austrália, França, Países Baixos, Reino Unido e Estados Unidos da América e apresentar uma análise comparativa das características dos modelos hidráulicos seleccionados.

Depois, escolheram-se dois modelos hidráulicos distintos para aplicar ao caso de estudo. O modelo LISFLOOD-FP, especialmente desenvolvido para estudar o comportamento do escoamento em ambiente fluvial, modelo de base *raster*, que permite a simulação bidimensional do escoamento no leito maior e o modelo unidimensional HEC-RAS, que estuda o perfil da superfície livre, de secção em secção transversal, ao longo de um trecho de uma linha de água.

Com o objectivo de comparar os resultados das áreas inundadas obtidas através dos modelos HEC-RAS (disponível para utilização livre na internet) e LISFLOOD-FP (disponibilizado pelos autores para trabalho de investigação à Universidade de Évora na pessoa do aluno de doutoramento Eng. Paulo Fernandez) foram aplicados os dois modelos a um troço do Rio Lis. Foi efectuada a caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica e aplicado o modelo hidrológico HEC-HMS versão 3.4 (disponível na internet para utilização livre) para a determinação do hidrograma de cheia e respectivo caudal de ponta de cheia, para um período de retorno de 100 anos.

Relativamente à modelação hidráulica são apresentados os requisitos, os dados de entrada e os resultados da aplicação dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP.

Por último, é efectuada a avaliação do risco de inundação, para a zona em estudo.

#### **1.4 Estrutura do documento**

O documento está organizado em sete capítulos distintos.

---

O Capítulo 1 enquadra o tema principal e o seu enquadramento legal e justifica a sua necessidade. São, ainda, apresentados os objectivos do trabalho e a estrutura do documento.

No Capítulo 2 introduzem-se a modelação hidrológica e a modelação hidráulica. São apresentados exemplos de aplicação de seis modelos hidráulicos escolhidos no âmbito deste estudo. São apresentados os principais aspectos relativamente às equações, dados de entrada e dados de saída.

No capítulo 3 é apresentada a caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Rio Lis para o troço de 4 km entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca, considerado para o presente estudo.

No capítulo 4 é apresentado o estudo hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Lis, com base na aplicação do modelo hidrológico HEC-HMS versão 3.4.

No capítulo 5 são aplicados os modelos hidráulicos HEC-RAS e LISFLOOD-FP, ao troço de 4 km considerado.

No capítulo 6 é efectuada a avaliação do risco de inundação de acordo com o Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões do estudo desenvolvido para avaliar o risco de inundação no troço do Rio Lis entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca, assim como as limitações encontradas durante a realização do trabalho e, ainda, algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros.

---

## 2. Modelação hidrológica e hidráulica

### 2.1 Introdução

Um modelo nada mais é do que uma representação simplificada da realidade, com capacidade de funcionar com semelhanças a outros sistemas reais e que fornece previsões precisas sobre o comportamento e os acontecimentos dos sistemas semelhantes (Chanson, 2004).

Segundo Chanson os modelos frequentemente utilizados são de três tipos, nomeadamente: analíticos, numéricos e físicos.

Os modelos analíticos representam as soluções teóricas dos princípios fundamentais. Uma aplicação muito comum é o cálculo das características hidráulicas do escoamento variável em superfície livre (Chanson, 2004).

Os modelos físicos podem ser usados para validar os métodos numéricos. O modelo físico representa a realidade a uma escala diferente, sendo decisiva a representação apropriada das condições de fronteira, condições de montante e o campo do escoamento. Estes modelos são muito utilizados em projectos de optimização de estruturas de forma a assegurar a sua operatividade e segurança (Chanson, 2004).

Num modelo físico, as condições de escoamento devem ser semelhantes à do protótipo em termos geométricos, cinemáticos e dinâmicos (Chanson, 2004).

Os modelos numéricos são *softwares* que resolvem as equações básicas do escoamento do fluido, como por exemplo, a integração numérica do sistema de equações para o cálculo do perfil da superfície livre do escoamento gradualmente variado de um canal. A sua aplicação é restrita a situações simples de escoamento e condições de fronteira, onde as equações possam ser resolvidas numericamente (Chanson, 2004).

As aplicações práticas da hidráulica implicam modelos numéricos e resultados gráficos. Os métodos numéricos envolvem a resolução de vários tipos de problemas matemáticos, nomeadamente a solução de sistemas de equações diferenciais (Novak *et al.*, 2010).

Uma aproximação numérica pode envolver o uso de variadíssimas técnicas, desde a solução de sistemas de equações e a sua aproximação a dados discretos na sua forma analítica, a integração e determinação numérica de valores e vectores de matrizes e a solução de equações algébricas lineares

---

que surjam quando se utilizam métodos numéricos que resolvam as equações diferenciais (Novak *et al.*, 2010).

A aplicação de métodos numéricos de resolução de equações acontece e é uma necessidade para ajudar a resolução de equações diferenciais que dão origem a centenas de equações lineares que necessitam de ser resolvidas por iterações, os seus resultados são obtidos e representados com o suporte de um computador. Se assim não o fosse, este tipo de análise tornar-se-ia inviável, em termos de consumo de tempo (Novak *et al.*, 2010).

A modelação hidrológica possibilita a representação dos processos físicos envolvidos no balanço hidrológico à escala da bacia hidrográfica, permitindo simular a transformação da precipitação em escoamento com destaque, neste trabalho, para os eventos de precipitação de curta duração e elevada intensidade na bacia hidrográfica. O hidrograma de cheia, consequência de um evento extremo de precipitação, pode ser condição de fronteira na aplicação de modelo hidráulico que permita a simulação do comportamento hidráulico da linha de água. A modelação numérica do conjunto de processos envolvidos numa bacia hidrográfica consiste no uso de *software* que resolva o sistema de equações que representam todos os fenómenos físicos envolvidos, de forma a avaliar os efeitos de tal evento (MHL, 2006). No entanto, a aplicação de um *software* a um caso específico implica a criação de um modelo através da calibração e validação do mesmo com base em valores observados e registados na área em estudo. Assim, a monitorização dos parâmetros meteorológicos, hidrológicos e hidráulicos é uma etapa essencial da modelação.

Na maioria dos casos, os modelos hidrológicos e hidráulicos são utilizados para ajudar a tomada de decisão e, em grande parte, os modelos de hoje utilizam métodos numéricos de resolução de equações diferenciais. O sucesso da aplicação de um determinado modelo relaciona-se com as capacidades do próprio modelo, com o conhecimento de todos os processos físicos envolvidos e ainda com a habilidade do utilizador do mesmo (Tickle *et al.*, 1996).

Um modelo simples ou complexo é uma forma abstracta de representação da realidade, até certo ponto, envolve hipóteses, limitações, concepção e incertezas (Tickle *et al.*, 1996).

---

A modelação hidrológica representa os efeitos da precipitação na bacia hidrográfica, transformando as séries de precipitação em séries de escoamento, através de processos físicos complexos tais como: evapotranspiração, interceptação, infiltração, escoamento superficial e subterrâneo da água, pelo que se torna difícil prever, para uma determinada precipitação, o caudal e escoamento resultantes (MHL, 2006).

Os modelos hidrológicos classificam-se em conceptuais, quando representam a relação entre a precipitação e escoamento com base na relação causa-efeito entre as variáveis de entrada e as variáveis de saída e classificam-se como fisicamente baseados quando representam os processos físicos envolvidos (MHL, 2006).

A concepção do modelo hidrológico fisicamente baseado envolve a formulação matemática da representação de todos os processos físicos (MHL, 2006).

Os modelos hidráulicos estudam a dinâmica dos escoamentos em canais naturais, artificiais e margens de forma a estimar as alturas e as velocidades da água em cada secção do escoamento e em cada instante de cálculo. Aplicam os resultados dos modelos hidrológicos como dados de entrada e são utilizados para delimitar as zonas inundáveis (MHL, 2006).

Os modelos hidráulicos podem ser classificados em categorias, de acordo com as suas capacidades de modelação: unidimensional (1D), quasi-bidimensional (quasi-2D), bidimensional (2D) e tridimensional (3D) (MHL, 2006).

Os modelos hidráulicos unidimensionais utilizam as secções transversais para descreverem a geometria do canal e ainda as linhas de corrente, as quais interceptam as secções transversais perpendicularmente. O campo de velocidades é unidimensional, ou seja os vectores velocidade das partículas, em cada posição da secção transversal são paralelos entre si. Esta é uma hipótese simplificada, pois a velocidade das partículas apresenta componentes nas direcções perpendiculares à direcção longitudinal do leito da linha de água (MHL, 2006).

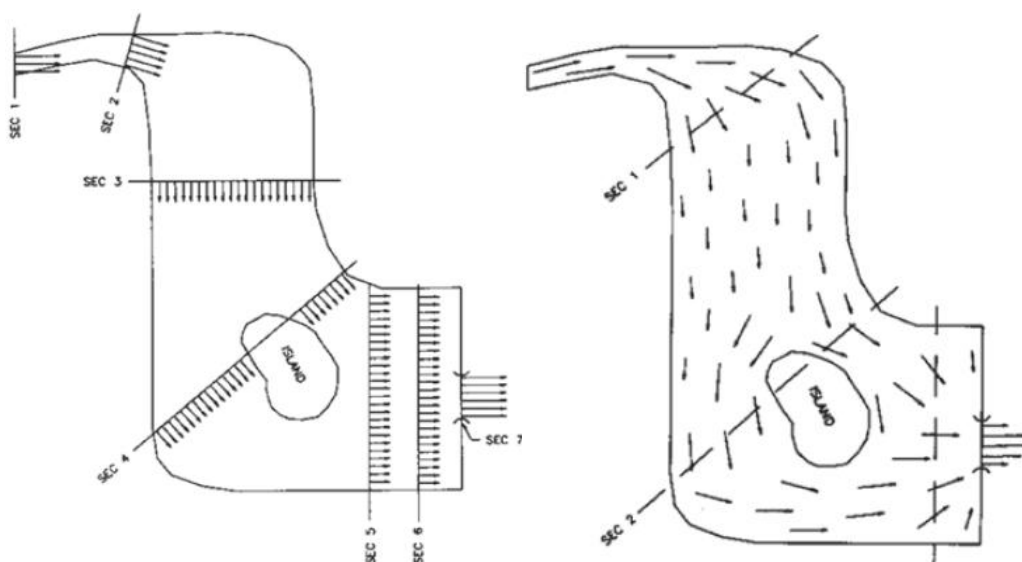
Em alguns casos, pode ser necessária uma análise mais detalhada do escoamento ao longo da linha de água, nomeadamente no caso em que existe inundação dos terrenos laterais ou zonas de confluências de dois cursos

---

de água principais. Nestes casos pode ser descrito o comportamento do escoamento através da divisão da secção transversal em secções transversais parciais estudadas com base num modelo 1D. Este método designa-se por modelação quasi-2D. Tanto na modelação 1D como na modelação quasi-2D é necessário o conhecimento *a priori* do perfil longitudinal do leito do rio e de secções transversais representativas do canal (MHL, 2006).

A aplicação de modelos 1D não é apropriada quando a secção transversal ao longo do leito do rio apresenta variações e irregularidades acentuadas. São exemplos disso, o caso de estuários ou linhas de água com secções compostas e leitos maiores de grandes dimensões, onde a aplicação de um modelo 2D é mais adequada para a representação do comportamento do escoamento, Figura 1 (MHL, 2006).

Os modelos 3D correspondem a uma modelação em que o campo de velocidades apresenta componentes na direcção ao longo do perfil longitudinal do leito do rio e segundo as duas direcções perpendiculares do plano da secção transversal da linha de água. Estes modelos não são, normalmente, usados na modelação de inundações por exigirem um esforço computacional muito elevado (MHL, 2006).



**Figura 1 – Representações do escoamento em superfície livre. 1D (esquerda) e 2D (direita), fonte MHL, 2006.**

Devido à complexidade que envolve o desenvolvimento de um modelo quando aplicado na previsão de um sistema, é inevitável suspeitar de algumas

---

surpresas que possam surgir. O primeiro objectivo na avaliação de um sistema é explorar o seu comportamento e as suas capacidades computacionais perante a variedade de condições definidas através dos seus dados de entrada (Tickle *et al.*, 1996).

A avaliação do desenvolvimento do modelo pode ser efectuada através de dados medidos no terreno e dados experimentais, dados sintéticos e analíticos (Tickle *et al.*, 1996).

A comparação dos resultados da avaliação do modelo com os dados medidos, em particular os dados de campo para a avaliação do modelo é mais intuitiva. Contudo esta aproximação apresenta uma desvantagem. A avaliação do modelo não pode ser efectuada para diferentes situações, devido a restrições impostas pelas condições físicas dos dados de base. Geralmente não é prático adquirir grandes quantidades de dados de campo e experimentais para todas as condições hidrológicas e hidráulicas, devido ao tempo consumido, à mão-de-obra, e às variáveis físicas envolvidas. A segunda grande preocupação em relação aos dados medidos, especialmente os dados de campo é a calibração do modelo com os coeficientes empíricos. A calibração muitas vezes introduz subjectividade ao utilizador de um modelo e, ainda, a habilidade do utilizador de compreender o comportamento do modelo pode ditar o sucesso ou não da calibração e da aplicação do mesmo (Tickle *et al.*, 1996).

No subcapítulo 2.2, atendendo ao âmbito do presente estudo ser a avaliação do risco de inundação com destaque para a delimitação das zonas inundáveis, são apresentados seis exemplos de aplicação prática de modelos hidráulicos comercializados e de utilização livre, alguns com componentes unidimensionais, outros são modelos unidimensionais acoplados a um modelo bidimensional, outros são de base *raster*, entre outras características. No subcapítulo 2.3 são introduzidos os seis modelos e é apresentado o sistema de equações que representam o escoamento. No subcapítulo 2.4 são apresentadas as principais características de cada programa. No capítulo 2.5 são identificados os dados de entrada necessários para cada um dos modelos e, por último, no subcapítulo 2.6 são apresentados o tipo de resultados de cada *software*.

---

## **2.2 Modelos hidráulicos. Exemplos de aplicação.**

Atendendo aos objectivos do presente trabalho, neste capítulo são apresentadas algumas das aplicações dos modelos hidráulicos FLO-2D, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAC-2D, TUFLOW e SOBEK.

### **2.2.1 Modelo FLO-2D**

O FLO-2D foi desenvolvido para o sistema hidrográfico do *Green River*, para um troço de 663 km, que se inicia na barragem de *Flaming Gorge* até à confluência com o Rio Colorado (FLO, 1998).

Os objectivos deste projecto foram, em primeiro lugar, desenvolver uma ferramenta de modelação capaz de estimar o hidrograma de cheia em qualquer secção a jusante da barragem de *Flaming Gorge* do *Green River* e, em segundo, delimitar as zonas inundáveis (FLO, 1998).

O modelo foi calibrado para 100 dias durante a época das monções do ano 1996 com base no coeficiente de rugosidade de *Manning-Strickler* e nos coeficientes que caracterizam a capacidade de infiltração.

O modelo FLO-2D permitiu avaliar as consequências da precipitação nos caudais ao longo do troço em análise e, ainda, os efeitos das ocorrências, caudais e duração das descargas da barragem de *Flaming Gorge* (FLO, 1998).

Neste estudo foi seleccionada uma malha de células regulares com 2000 elementos e com dimensão, dependente do declive da superfície do solo, que variava entre os 6 m e 12 m. Após a definição da malha, foi criada uma base de dados com as características mais representativas da geometria do canal, a caracterização das secções transversais, o comprimento e os coeficientes de rugosidade do mesmo (FLO, 1998).

Os dados de controlo incluíram informação sobre o intervalo de cálculo e as condições de fronteira.

Para a caracterização da infiltração foram introduzidos os dados da condutividade hidráulica, do potencial matricial e de porosidade do solo (FLO, 1998).

Neste estudo alguns dos pressupostos e limitações encontradas, aquando da aplicação do modelo FLO-2D, dizem respeito à selecção da resolução da



---

malha onde cada célula é representada pela altitude e pelo coeficiente de rugosidade do leito. Foram desprezadas pequenas variações na topografia, revestimento e cobertura do solo em cada célula da malha *raster*. O transporte de sedimentos não foi estudado por se ter considerado um leito fixo, embora o modelo apresente a capacidade de modelar um leito móvel. A evaporação não foi incluída no modelo FLO-2D, contudo o volume das perdas devido à evaporação e infiltração do canal poderá ser determinado por meio de uma calibração mais apropriada dos parâmetros da infiltração (FLO, 1998).

### **2.2.2 Modelo HEC-RAS**

Destaca-se a aplicação do modelo HEC-RAS num estudo em que foram analisadas as zonas inundáveis de um troço da rede hidrográfica do Rio *South Nation*, situado a Este de *Ottawa*, no Ontário. Os dados cartografados foram integrados no modelo HEC-RAS recorrendo à ajuda dos sistemas de informação geográfica (SIG).

Um dos objectivos deste trabalho foi apoiar a autoridade competente de *South Nation*, na delimitação de zonas inundáveis. Interessava simplificar e automatizar o processo de mapeamento das zonas inundáveis, para uma rede hidrográfica, com base no modelo HEC-2 (Yang *et al.*, 2005).

O modelo HEC-2 foi o primeiro programa capaz de desenhar o perfil da superfície livre da água, para várias secções transversais, de uma forma automática. Posteriormente, os *United States of Corps of Engineers* lançaram uma versão mais actualizada do modelo, designada por HEC-RAS (Yang *et al.*, 2005).

O HEC-RAS foi desenvolvido para estudar o escoamento 1D, permanente e variável, no cálculo do perfil da superfície livre em canais naturais e artificiais.

A primeira fase deste trabalho consistiu na importação dos dados já existentes do modelo HEC-2 para o modelo HEC-RAS. Os dados utilizados continham a informação das alturas de água, os caudais, os coeficientes de rugosidade, a geometria das secções transversais e os comprimentos de cada troço do canal. Após a transferência da informação de um modelo para o outro, foi possível realizar a análise hidráulica (Yang *et al.*, 2005).

---

Neste estudo foram introduzidas novas tecnologias que permitiram visualizar os mapas das zonas inundáveis em 2D (representação da extensão da inundação) e em 3D (representação das alturas de água da inundação) para cada período de retorno calculado (Yang *et al.*, 2005).

O passo final do estudo foi determinar as zonas inundáveis para seis períodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos), com representação 3D, através da sobreposição do modelo integrado do terreno com a Rede Triangular Irregular, *Triangulated Irregular Network (TIN)*, a qual representa a superfície da água através da aplicação de um SIG.

A visualização 3D da região inundável é o resultado da sobreposição de um TIN que caracteriza a superfície de água, com um outro TIN que caracteriza o terreno (Yang *et al.*, 2005). Foram aplicadas três extensões do ARCGIS que permitiram realizar esta abordagem, nomeadamente: HEC-GEORAS, SPATIAL ANALYST e 3D-ANALYST. A extensão 3D-ANALYST permite a representação tridimensional da área de inundação. A extensão SPATIAL ANALYST permite a criação e disposição dos dados *raster*, sendo necessária para a modelação do terreno. A extensão HECGEORAS permite a criação dos ficheiros que contêm informação com a geometria do canal, respectivamente: o perfil longitudinal da linha de água principal, as linhas de escoamento, as margens e as secções transversais.

O modelo digital do terreno (MDT) permitiu ao modelo HEC-RAS calcular o perfil da superfície livre da água e possibilitando a representação e a visualização topográfica das zonas inundáveis em 3D.

O MDT utilizado foi preparado com dois TINs. Um TIN com os dados do HEC-RAS representativos da geometria do leito do canal e outro com a representação das margens. O TIN resultante permitiu, assim, a visualização 3D do terreno e das zonas inundáveis.

Os dados resultantes do HEC-RAS correspondentes a diferentes períodos de retorno foram transferidos para o domínio dos SIG através de um conjunto de *Scripts Avenue*. Tanto a geometria do leito como as alturas de água foram associadas a cada secção transversal, no domínio dos SIG, usando o talvegue como ligação entre os resultados do HEC-RAS e o TIN.

---

Foi assim possível cumprir com um dos objectivos, sendo agilizado o processo de análise entre um determinado evento extremo de precipitação e as suas consequências, numa determinada bacia hidrográfica.

O estudo demonstrou a existência de uma relação directa entre a resolução da malha *raster* e os resultados obtidos para o traçado das zonas inundáveis.

Foi ainda possível verificar que:

- As diferenças encontradas nos valores da elevação entre MDT e as secções transversais do HEC-RAS podem condicionar os resultados obtidos;
- A resolução do modelo da bacia hidrográfica depende tanto dos dados de campo (geometria do canal), como da resolução do MDT (Yang *et al.*, 2005).

### **2.2.3 Modelo LISFLOOD-FP**

O modelo LISFLOOD-FP tem sido aplicado em bacias hidrográficas onde ocorrem inundações, nomeadamente a bacia hidrográfica do Rio Meuse, partilhada por França, Bélgica, Países Baixos, e a bacia hidrográfica do Rio Oder, partilhada pela República Checa, Polónia e Alemanha (Bates *et al.*, 2000).

O objectivo deste estudo foi desenvolver e avaliar a extensão das áreas inundáveis. A validação do modelo foi efectuada com base em imagens satélite (*Synthetic Aperture Radar*) e fotografia aérea, representativas da extensão da zona de inundação (Bates *et al.*, 2000).

A componente principal do modelo LISFLOOD-FP é o MDT, de resolução e precisão suficientemente capazes de descreverem o canal natural (localização, inclinação do perfil longitudinal do leito e coeficiente de rugosidade) como um elemento topográfico da zona de inundação (Bates *et al.*, 2000).

O modelo foi aplicado a um troço de 35 km do Rio Meuse, entre as estações hidrométricas situadas em *Borgharen*, nos Países Baixos e em *Maaseik*, na Bélgica, para as quais existiam registos horários (Bates *et al.*, 2000).

Uma nota importante neste estudo é o facto de se ter adoptado, para o coeficiente de rugosidade, valores apresentados na literatura, como: Chow, Acrement e Schneider (Bates *et al.*, 2000).

---

Foi preparado um MDT para a área de estudo. Este modelo foi convertido para o formato *raster*, através de um *software* SIG, o ARC/INFO. Foram ainda criados mapas com a rede de drenagem e foram efectuados levantamentos topográficos de forma a caracterizar-se a geometria das secções transversais do canal.

Foram efectuadas duas análises; uma em regime de escoamento permanente e a outra com base na simulação dinâmica, o que permitiu a modelação da propagação da onda de cheia.

Como condição de fronteira foi adoptado um valor de 1 m de altura de água, dentro do canal principal, o que estava coerente com os registos do caudal na estação hidrométrica em *Borgharen*.

De forma a ser possível a obtenção de um valor das alturas de água e das velocidades, dentro do canal, antes das simulações dinâmicas e próximas do verificado na realidade, foi dado um valor constante para o caudal, durante um período de 8h, antes da obtenção do hidrograma de cheia do evento real. Esse intervalo de tempo foi escolhido de acordo com o observado entre as duas estações hidrométricas em *Borgharen* e em *Maaseik*, ou seja, o tempo de transporte da onda.

As simulações foram realizadas, até se conseguir que as alturas de água previstas pelo modelo estabilizassem num valor constante.

Posteriormente foram consideradas as variações do caudal e modelada a propagação da onda de cheia.

As simulações foram validadas através das fotografias aéreas e imagens SAR, no caso das simulações em regime permanente e, no caso da simulação dinâmica, foram validadas de acordo com os registos das alturas de água nas estações hidrométricas em *Borgharen* e em *Maaseik*.

O desempenho do modelo foi avaliado através da comparação das áreas inundadas obtidos através da simulação hidráulica com as áreas inundadas obtidas através de fotografias aéreas e das imagens SAR. Tendo-se verificado uma aproximação entre os resultados do modelo e o episódio de precipitação extrema registado.

---

Ao contrário de muitos outros modelos hidráulicos, este foi especialmente desenvolvido para prever áreas inundáveis, tendo sido ainda preparado para trabalhar com dados topográficos de alta resolução, de que é exemplo os dados LIDAR (Bates *et al.*, 2000).

#### **2.2.4 Modelo TELEMAC-2D**

O modelo TELEMAC-2D foi aplicado no estudo hidráulico relativo aos impactos da construção da auto-estrada A89, que liga *Bordéus* a *Clermont-Ferrand*, em França. Este projecto atravessa a confluência dos rios *Dordogne* e *Isle*, os quais sofrem inundações regulares devido à contribuição dos afluentes à área de drenagem e, ainda, ao efeito das marés (Sauvaget *et al.*, 2000).

Os objectivos do projecto foram minimizar o impacto hidráulico das inundações e reduzir o custo da construção da auto-estrada.

A metodologia usada dividiu-se em 3 etapas distintas:

- 1- Optimização das estruturas hidráulicas;
- 2- Descrição detalhada dos impactos da construção da auto-estrada no sistema hidráulico;
- 3- Preparação de informação para o público local.

A optimização das estruturas hidráulicas da auto-estrada foi realizada com base num estudo preliminar que englobou o número, a localização e a dimensão das passagens hidráulicas sob a auto-estrada (Sauvaget *et al.*, 2000).

A descrição detalhada dos impactos hidráulicos da auto-estrada foi estudada para vários eventos hidrológicos, atendendo aos seguintes aspectos (Sauvaget *et al.*, 2000):

- variação do caudal escoado;
- variação do nível da água;
- duração da inundação (tempo em que o terreno esteve inundado);
- distribuição espacial da variação da velocidade;

O estudo hidráulico foi feito com o apoio simultâneo de dois modelos. Um modelo matemático bidimensional que foi preparado para simular os regimes

---

de escoamento da área de estudo e um modelo de representação física que fez a simulação dos regimes de escoamentos permanentes do Rio *Dordogne* e um troço a jusante do Rio *Isle*. O modelo matemático bidimensional foi construído com base no modelo TELEMAC-2D, o qual serviu de base para este estudo. O modelo de representação física foi construído, com base em observações de campo, para o estudo hidráulico da auto-estrada A89. A elevação da superfície da água foi medida em trinta e cinco pontos ao longo da área de estudo. O campo da velocidade foi obtido através da trajectória videográfica e ainda, através da medição de diferentes pontos da zona de estudo.

Os dois modelos foram utilizados em conjunto, de forma a se poder calibrar e comparar os resultados entre ambos. No caso do Rio *Dordogne*, qualquer discrepância que se obtivesse entre o modelo matemático e o modelo de escala física, o modelo físico seria sempre a referência, ou seja, para o qual o modelo matemático seria ajustado. No caso do Rio *Isle*, o dimensionamento das passagens hidráulicas (PH) foi realizado apenas com base no modelo matemático.

O TELEMAC-2D tem sido muito usado no estudo de propagação de ondas de cheia devido à rotura de barragens (Sauvaget *et al.*, 2000).

O TELEMAC-2D apresenta um conjunto de módulos de fácil utilização que permite a computação da malha projectada e a preparação das condições de fronteira.

Este estudo demonstrou que a modelação numérica bidimensional das inundações provou ser eficiente na optimização de um estudo sobre o impacto hidráulico. Através da modelação 2D consegue-se o conhecimento detalhado do escoamento, em particular, no leito maior o qual não é possível com a modelação 1D. De facto, o modelo bidimensional assenta em muito mais coeficientes empíricos do que o modelo 1D para uma mesma área, como por exemplo, a modelação da zona de transição entre a linha de água principal e as margens (Sauvaget *et al.*, 2000).

---

### 2.2.5 Modelo TUFLOW

No âmbito da revisão do manual de gestão de zonas inundáveis em *North South Wales* (NSW) ficou estabelecida uma nova abordagem na gestão de cheias urbanas na Austrália.

Esta nova abordagem teve como objectivo a delimitação de áreas inundáveis para a cheia máxima provável, designada por *Probable Maximum Flood* (PMF) para um determinado período de retorno. Tal medida impôs um grande desafio na determinação da probabilidade máxima de ocorrência de uma inundação, para um determinado período de retorno, em áreas urbanas e, em particular, em zonas com sistemas de colectores de águas pluviais.

Ao mesmo tempo, o aumento da recolha de dados tipo *Aerial Laser Scanning* (ALS) na zona de estudo, possibilitou um levantamento detalhado, capaz de apoiar a modelação 2D do terreno, assim como o mapeamento das zonas inundáveis (Philips *et al.*, 2005)

Neste estudo a modelação 2D foi usada para estudar a interacção entre o sistema de colectores de águas pluviais e o escoamento à superfície (Philips *et al.*, 2005)

O *software* utilizado permitiu o estudo da interacção entre a precipitação e o transporte nos colectores, possibilitando ao modelo analisar o que se lista (Philips *et al.*, 2005):

- Sistemas hidrográficos urbanos e leitos maiores em 2D e /ou os sistemas hidrográficos urbanos e áreas inundáveis, usando a combinação entre elementos 1D (leito menor) e 2D (leito maior);
- Sistemas de drenagem urbana através da combinação do sistema de colectores de águas pluviais (1D) e do escoamento à superfície (2D).

O estudo concluiu que, no caso de inundações urbanas e, atendendo aos progressos tecnológicos, nomeadamente o uso de dados topográficos resultantes da tecnologia *Airbone Laser Scanner* (ALS) para cartografar as bacias hidrográficas urbanas, se verificou uma maior escolha por parte dos utilizadores de modelos 2D (Philips *et al.*, 2005).

---

O modelo TUFLOW oferece novas possibilidades de investigação sobre os sistemas de drenagem de águas pluviais, escoamento superficial e áreas inundáveis.

### **2.2.6 Modelo SOBEK**

Durante as últimas décadas o Bangladesh sofreu um elevado número de inundações. A ocorrência de tais fenómenos fez aumentar o interesse pela modelação hidráulica no estudo de controlo de cheias, assim como o desenvolvimento de sistemas de previsão e de alerta de inundações (UNESCO, 2000).

O modelo SOBEK foi aplicado à bacia hidrográfica do Rio *Manu-Dhalai*, na região nordeste do Bangladesh, que se estende até ao distrito de *Moulvibazar*. Uma das características principais desta região é a ocorrência de inundações repentinas, várias vezes ao longo do ano. Durante as pré-moções (Abril a Maio) e durante as monções (Junho a Setembro), este fenómeno é devido à intensidade de precipitação e à taxa de infiltração; durante as pós-moções (Outubro a Novembro) e ainda durante a estação seca (Dezembro a Março) o mesmo fenómeno é afectado pelo défice de humidade relativa do solo. Como consequência, as zonas de vale ficam inundadas, causando perdas de vidas humanas, destruindo infra-estruturas e áreas cultivadas (UNESCO, 2000).

A zona estudada é composta pelos rios *Manu* e *Dhalai*, onde ocorrem as inundações repentinas. As inundações do leito provocam estragos nas culturas do arroz, atrasos na drenagem e a plantação tardia das culturas entre Novembro e Abril (UNESCO, 2000).

Os objectivos deste estudo foram:

- desenvolver um modelo uni-dimensional (1D)
- avaliar o comportamento do modelo 1D
- desenvolver um modelo acoplado 1D e 2D
- analisar a sensibilidade do modelo acoplado: coeficiente de rugosidade e tamanho da célula da malha *raster* do modelo 2D.

Para uma boa representação da propagação da onda de cheia, na bacia de *Manu-Dhalai*, o modelo acoplado uni e bidimensional (1D/2D), isto é, 2D na



---

superfície da bacia hidrográfica e 1D na rede hidrográfica, permitiu a análise de vários comportamentos do mesmo, tornando-o mais próximo da realidade física da inundação.

O estudo verificou que quanto mais detalhada for a representação das zonas inundáveis, melhor será a sua representação da realidade, quando comparado com o modelo 1D. Em particular, o modelo SOBEK permite obter melhores resultados no cálculo do caudal em rios com grandes leitos (UNESCO, 2000).

Os efeitos da resistência do escoamento por parte da vegetação foram representados numa malha 2D. Com este estudo foi possível comprovar que uma boa representação do leito de cheia, na forma de malha bidimensional aumentava o grau de precisão do modelo acoplado 1D/2D (UNESCO, 2000).

O estudo conclui que o modelo de escoamento 1D/2D desenvolvido apresenta as seguintes vantagens sobre o modelo 1D (UNESCO, 2000):

- pode ser aplicado a canais com secções transversais de geometria complexa, com leitos maiores e cobertos por vegetação;
- os coeficientes de rugosidade podem ser considerados em diferentes partes do leito maior, tendo por base o padrão da vegetação e a resistência ao escoamento.

### **2.3 Apresentação dos modelos hidráulicos FLO-2D, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAC-2D, TUFLOW e SOBEK**

Neste subcapítulo são identificadas as entidades que desenvolveram os modelos analisados no ponto anterior e são apresentadas as equações fundamentais do escoamento e as suas simplificações.

Os modelos hidráulicos em estudo são: FLO-2D, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAC-2D, TUFLOW e SOBEK.

No Quadro 1 são apresentadas as entidades responsáveis pelo desenvolvimento dos *softwares* e as suas aplicações práticas mais comuns.

**Quadro 1 – Entidade responsável e âmbito de aplicação dos modelos FLO-2D, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAC-2D, TUFLOW e SOBEK.**

<b>Modelo</b>	<b>Quem desenvolveu e onde encontrar informação</b>	<b>Aplicação do modelo</b>
FLO-2D	FLO-2D Software, Inc. <a href="http://www.flo-2d.com">www.flo-2d.com</a>	Mapas das zonas de Risco de Inundação. Inclui estudos sobre: o escoamento de lamas, atenuação da onda de cheia, inundações em zonas urbanas e costeiras, transporte de sedimentos, escoamento de sólidos e rotura de barragens.
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center, Institute for Water Resources U. S. Army Corps of Engineers ( Mr. Gary W. Brunner) <a href="http://www.wsi.nrcs.usda.gov">www.wsi.nrcs.usda.gov</a>	Mapeamento e delimitação das zonas inundáveis associadas a diferentes períodos de retorno.
LISFLOOD-FP	Universidade de Bristol, School of Geographical Sciences (Professor Paul Bates, Tim Fewtrell, Mark Trigg e Jeff Neal) <a href="http://source.ggy.bris.ac.uk/wiki/lisflood">http://source.ggy.bris.ac.uk/wiki/lisflood</a>	Mapeamento e delimitação de zonas inundáveis associadas a diferentes períodos de retorno, em zonas fluviais e costeiras. O modelo foi desenvolvido para tirar o máximo partido dos recentes desenvolvimentos da detecção remota aplicada à topografia, como sendo a altimetria a Laser ou a interferometria de Radars de Abertura Sintética.
TELEMAC-2D	Laboratoire d'Hydraulique de EDF-DER (Chatou, Paris) <a href="http://www.telemacsystem.com">www.telemacsystem.com</a>	Ambiente marítimo: Dimensionamento de estruturas portuárias, estudo dos efeitos de construções submersíveis, trabalhos de dragagem. Ambiente fluvial: Estudo dos impactos de vários tipos de construções: pontes, rotura de barragens, estudo de zonas inundáveis.
TUFLOW	WBM Pty,Ltd e Universidade de Queensland, Australia <a href="http://www.tuflow.com">www.tuflow.com</a>	Delimitação de zonas inundáveis em zonas urbanas, estuarinas e costeiras. Mapeamento das zonas com risco de inundação. Inundações em zonas urbanas; Análise hidráulica em zonas estuarinas e costeiras; Inundações provocadas por ondas costeiras.

---

**Quadro 1 (cont.) – Entidade responsável e âmbito de aplicação dos modelos FLO-2D, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAR-2D, TUFLOW e SOBEK.**

<b>Modelo</b>	<b>Quem desenvolveu e onde encontrar informação</b>	<b>Aplicação do modelo</b>
SOBEK	Universidade de Delft, Países Baixos. <a href="http://delftsoftware.wldelft.nl">http://delftsoftware.wldelft.nl</a>	Planeamento e gestão dos recursos hídricos. Previsão de inundação e mapeamento das zonas inundáveis. Optimização dos sistemas de drenagem urbana. Controlo de sistemas de rega. Dimensionamentos dos sistemas de drenagem de águas residuais urbanas. Controlo do nível das águas subterrâneas.

### **2.3.1 Equações fundamentais do escoamento e leis de resistência**

Os modelos hidráulicos têm por base as equações fundamentais do escoamento e as propriedades físicas do fluido. A compreensão das equações fundamentais do escoamento e as suas simplificações são importantes para distinguir os modelos, sendo uma base essencial, aquando da sua escolha.

As equações fundamentais do escoamento de um fluido incluem:

- o princípio da conservação da massa – equação da continuidade;
- a equação de equilíbrio dinâmico ou de quantidade de movimento;
- o princípio da conservação de energia;
- a lei de resistência.

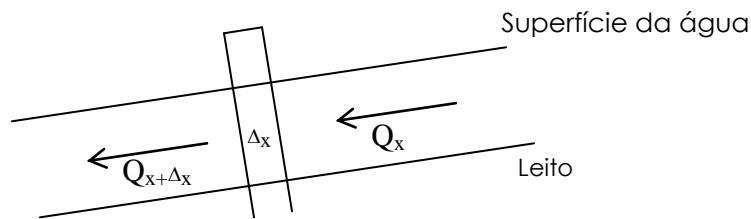
As propriedades físicas da água incluem a massa volúmica e a viscosidade.

#### **2.3.1.1 Equação da continuidade**

A equação da Continuidade expressa o princípio da conservação da massa e permite identificar a variação da velocidade ao longo do escoamento, de uma secção transversal para outra situada numa diferente localização, no caso de o escoamento ser unidimensional.

O princípio da conservação da massa, aplicado a um volume de controlo elementar, delimitado pelo canal natural e por duas secções transversais do escoamento, permite escrever, Figura 2:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$



**Figura 2 – Volume de controlo.**

Onde:

A – Área do escoamento (m<sup>2</sup>);

t – Tempo (s);

Q – Caudal (m<sup>3</sup>/s);

q – Caudal de percurso (m<sup>3</sup>/s/m);

x – Direcção do perfil longitudinal do canal (m).

### 2.3.1.2 Equação de equilíbrio dinâmico

A equação do equilíbrio dinâmico ou da quantidade de movimento na sua forma conservativa e escoamento unidimensional:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \beta \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial h}{\partial x} - D_0 + j + \Delta h \right) - \beta q v_x + W_f B = 0 \quad (2)$$

Onde;

x – Direcção do perfil longitudinal do canal (m);

t – Tempo (s);

V – Velocidade do escoamento (m/s);

Q – Caudal (m<sup>3</sup>/s);

A – Área do escoamento (m<sup>2</sup>);

h – Altura de água na secção transversal (m);

D<sub>0</sub> – Declive do perfil longitudinal do canal (m/m);

j – Declive da linha de energia (m/m);

Δh – Perda de carga localizada (m);

B – Largura de rasto do canal (m);

q – Caudal de percurso unitário (m<sup>3</sup>/s/m);

g – Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

W<sub>f</sub> – Coeficiente de atrito água-ar;

---

$\beta$  – Coeficiente de Boussinesq (1.01 para canais prismáticos e 1.22 para canais naturais com margens de inundação), (Chow, 1959).

Admitindo que o caudal de percurso entra no canal numa direcção perpendicular à direcção do escoamento:

$$V_x=0$$

Desprezando o efeito do vento:

$$W_f=0$$

Dividindo por A, obtém-se:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial(Q)}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(D_0 - j) = 0 \quad (3)$$

Os termos da equação 3 apresentam os seguintes significados:

$\frac{1}{A} \frac{\partial(Q)}{\partial t}$  - a aceleração local descreve a variação da quantidade de movimento devida à variação da velocidade em relação ao tempo;

$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right)$  - a aceleração convectiva descreve a variação da quantidade de movimento devido a uma mudança de velocidade do escoamento ao longo do canal;

$g \frac{\partial h}{\partial x}$  - diferença das resultantes das pressões hidrostáticas actuantes na fronteira do volume de controlo, a qual é proporcional à variação da profundidade do escoamento ao longo do canal;

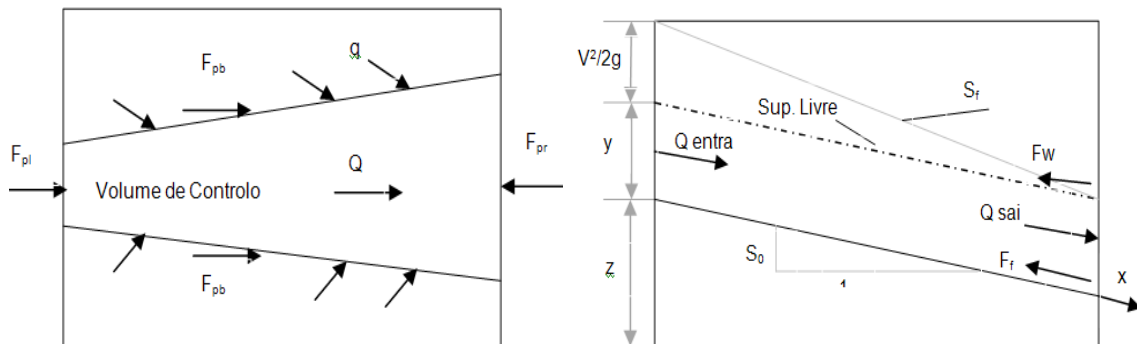
$g \cdot D_0$  - trabalho realizado pelas forças da gravidade por unidade de massa do fluido e por unidade de comprimento;

$g \cdot j$  - trabalho realizado pelas forças resistentes por unidade de massa do fluido e por unidade de comprimento.

A equação de equilíbrio dinâmico foi deduzida por Saint Venant a partir da 2ª Lei de Newton, onde as forças consideradas no volume de controlo são as que se listam, Figura 3:

- $F_g$  - força da gravidade;
- $F_f$  - força de atrito;
- $F_e$  - força de contração ou expansão causada por variações bruscas da geometria do canal;
- $F_w$  - força do vento na superfície do fluido;
- $F_p$  - força de pressão.

As equações de *Saint-Venant* são duas equações diferenciais às derivadas parciais, uma é a equação da continuidade (1) e a outra é a equação do equilíbrio dinâmico (4.)



**Figura 3 – Vista em planta, (esquerda), e perfil longitudinal, (direita), do volume de controle. Desenho adaptado de MHL, 2006.**

Casos particulares da equação de equilíbrio dinâmico:

### Onda Dinâmica

Desprezando os efeitos do vento, não existindo caudal de percurso, teremos a aproximação de onda Dinâmica:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial t} + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) - g(D_0 - j) = 0 \quad (4)$$

### Onda Difusa

Para escoamentos permanentes, os dois primeiros termos anulam e os dois últimos termos representam a equação de equilíbrio dinâmico com a aproximação de onda Difusa:

---


$$g\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right) - g(D_0 - j) = 0 \quad (5)$$

### Onda Cinemática

E finalmente, desprezando a variação da altura de água ao longo do canal, consideramos apenas o último termo da equação e obtemos a aproximação da onda Cinemática:

$$g(D_0 - j) = 0 \quad (6)$$

#### 2.3.1.3 Equação da energia

A aplicação do princípio da conservação de energia representa-se pela equação de Bernoulli que permite determinar o perfil da superfície livre da água entre duas secções transversais:

$$h_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} = h_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} + \Delta H \quad (7)$$

Onde:

$h_i$  – altura da água na secção transversal (m);

$z_i$  – Cota do fundo do canal da secção (m);

$\alpha_i$  – Coeficiente de Coriolis;

$\Delta H$  – Perda de carga total entre a secção 1 e 2 (m);

$U_i$  – Velocidade média na secção (m/s);

$i$  – secções 1 e 2.

#### 2.3.1.4 Leis de resistência

Quando um líquido em movimento é a água, assume-se que o escoamento é unicamente turbulento, e aplicam-se as leis empíricas, como a de Chézy ou a de Gauckler-Manning (Quintela, 1998).

A capacidade de transporte calculada através da equação de Chézy:

$$Q = CA\sqrt{R_h}j \quad (8)$$

$$CA\sqrt{R_h} = \frac{Q}{\sqrt{j}} \quad (9)$$

e

$$CA\sqrt{R_h} = \Phi \quad (10)$$

---

A capacidade de transporte calculada pela equação de Gauckler-Manning:

$$Q = KAR_h^{2/3} j^{1/2} \quad (11)$$

$$KAR_h^{2/3} = \frac{Q}{\sqrt{j}} \quad (12)$$

e

$$KAR_h^{2/3} = \Phi \quad (13)$$

Onde:

$\Phi$  – Capacidade de transporte numa secção do escoamento ( $m^3/s$ );

C – Coeficiente de rugosidade de Chézy;

K – Coeficiente de rugosidade de Manning- Strickler ( $m^{1/3} s^{-1}$ );

A – Área molhada da secção transversal de escoamento ( $m^2$ );

$R_h$  – Raio hidráulico da secção transversal de escoamento (m);

j – Declive da linha de energia entre duas secções (m/m);

Q – Caudal na secção ( $m^3/s$ ).

#### **2.4 Características dos modelos FLO-2D, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAC-2D, TUFLOW e SOBEK**

De forma a realizar uma análise comparativa das características dos modelos hidráulicos, preparou-se o Quadro 2, que sintetiza os aspectos mais relevantes de cada modelo, designadamente: as equações básicas do escoamento na forma em que são aplicadas, o regime de escoamento, o método numérico de resolução das equações, o passo de cálculo, as estruturas hidráulicas representadas e a resolução do modelo.



**Quadro 2 – Características principais dos modelos hidráulicos FLO-2D, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAC-2D, TUFLOW e SOBEK.**

Características	Modelos					
	FLO-2D	HEC-RAS	LISFLOOD-FP	TELEMAC-2D	TUFLOW	SOBEK
<b>Equações</b>	Aproximação da onda dinâmica	Aproximação da onda cinemática e difusa*	Aproximação da onda cinemática e difusa	Aproximação da onda difusa e dinâmica	Aproximação da onda dinâmica	Aproximação da onda difusa** e dinâmica
<b>Regime de Escoamento</b>	Permanente Variável	Permanente Variável	Permanente Variável	Permanente Variável	Permanente Variável	Permanente Variável
<b>Método numérico de resolução de equações</b>	Diferenças finitas	Diferenças finitas	Diferenças finitas	Elementos finitos	Diferenças finitas	Diferenças finitas
<b>Passo de cálculo</b>	Entre 0.1 s e 30 s.	1 h se o regime for variável.	Desde 10 s até um dia.	Valor predefinido de 0.03 s. (O programa corre com qualquer outro valor acima deste).	60 s a 120 s. (Para um comprimento mínimo do canal principal de 500 metros).	Definido pelo utilizador. No caso de acontecer algum tipo de instabilidade, o próprio programa escolhe o intervalo de tempo que melhor se ajusta.
<b>Estruturas hidráulicas admitidas</b>	Passagens hidráulicas, barragens, pontes, diques, valetas.	Pontes, passagens hidráulicas, galerias, comportas, orifícios, barragens e diques.	Pontes, passagens hidráulicas, descarregadores.	Descarregadores, diques, condutas, pontes, estruturas de protecção contra as ondas.	Pontes, descarregadores, condutas, passagens hidráulicas, comportas, galerias.	Pontes, passagens hidráulicas, bombas, descarregadores, comportas, orifícios.
<b>Resolução</b>	150 m (caso geral). No caso de um troço de 24 km, a unidade é 15 m.	30 m (caso típico).	Alta resolução 1 a 2 m – zonas urbanas. O modelo pode ser aplicado para resoluções mais grosseiras.	Alta resolução (25 m) e baixa resolução (700 m)	Alta resolução 1 a 2 m – zonas urbanas. O modelo pode ser aplicado para resoluções mais grosseiras.	1 a 50 m (valores típicos).

Notas do Quadro 2: \*O modelo HEC-RAS permite a simulação da onda difusa quando o utilizador selecciona a opção de simulação de regime misto de escoamento, (designação do próprio programa), sendo possível limitar os termos da equação do momento relativos à inércia;

\*\* Na equação do momento, o termo  $\frac{\partial U}{\partial t}$  pode ser eliminado, permitindo a simulação da onda de difusão.

---

## 2.5. Dados de entrada

Nos capítulos 2.5 e 2.6 são apresentados os dados de entrada e de saída de cada um dos modelos referidos anteriormente. O modo de apresentação adoptado diz respeito apenas ao funcionamento e à estrutura de cada modelo escolhido, o que faz com que os elementos dos modelos não estejam pela mesma ordem e forma de apresentação.

### 2.5.1 Modelo FLO-2D

Os dados de entrada do modelo hidráulico FLO-2D são introduzidos no programa através de seis tipos de ficheiros, designadamente: FPLAIN.DAT, CADPTS.DAT, CONT.DAT, TOLER.DAT, INFLOW.DAT e OUTFLOW.DAT (BRIEN, 2007):

- Os ficheiros FPLAIN.DAT e CADPTS.DAT compreendem os dados topográficos e os dados da malha *raster*;
- Os ficheiros CONT.DAT e TOLER.DAT contêm os dados de controlo e de estabilização numérica;
- O ficheiro INFLOW.DAT é composto pelo hidrograma de cheia;
- O ficheiro OUTFLOW.DAT contém o caudal resultante e de controlo;

No Quadro 3 é apresentada a descrição da informação de cada ficheiro de entrada do modelo FLO-2D.

**Quadro 3 – Dados de entrada do modelo hidráulico FLO-2D.**

Ficheiros	Descrição
<b>CONT.DAT</b> (Dados do controlo do sistema)	- Tempo de simulação e sistema de unidades; - Ficheiros com as cópias de segurança; - Características do canal, precipitação, infiltração, evapotranspiração; - Estruturas hidráulicas; - Zonas inundáveis e bacia de retenção de sedimentos.
<b>TOLER.DAT (dados do controlo do sistema)</b>	- Critérios de estabilidade.
<b>FPLAIN.DAT</b> (Elementos da inundação)	- Elementos da malha e coeficiente de rugosidade de <i>Manning</i> ; - Cotas topográficas das células da malha <i>raster</i> .
<b>CADPTS.DAT</b> (Elementos da inundação)	- Não necessita de edição, embora seja necessário para correr o programa.
<b>OUTFLOW.DAT</b> (Caudal de saída)	- Caudal de saída e curva de vazão; - Hidrograma de cheia para cada elemento da malha <i>raster</i> .
<b>INFLOW.DAT</b> (Caudal de entrada)	- Hidrograma de cheia e intervalo de tempo; - Tempo, caudal e concentração de sedimentos e altura da água.

---

### **2.5.2 Modelo HEC-RAS**

O modelo HEC-RAS permite a determinação do perfil da superfície livre do escoamento em qualquer área de estudo, em escoamento permanente, no caso de ser fornecido o caudal de cheia e em escoamento variável, no caso de ser processado o hidrograma de cheia (Brunner, 2008).

Os dados necessários para o cálculo do perfil da superfície livre da água no HEC-RAS estão divididos em dados geométricos, dados de escoamento permanente e dados de escoamento variável (Brunner, 2008).

#### Dados Geométricos

Os dados geométricos são: o levantamento topográfico das secções transversais; o comprimento das linhas de água; os coeficientes de perda de carga (distribuída e localizada) e os dados das secções de junção entre linhas de água. São também considerados dados geométricos, as estruturas hidráulicas, nomeadamente: pontes, barragens e diques (Brunner, 2008).

#### Dados de Escoamento Permanente

As informações necessárias à determinação do perfil da superfície livre da água num escoamento permanente são: a altura uniforme, a altura crítica, as condições de fronteira (a curva de vazão e a altura da veia líquida) e o caudal de ponta de cheia (Brunner, 2008).

#### Dados de Escoamento Variável

Os requisitos para determinar o perfil da superfície livre da água num escoamento variável são: as condições de fronteira (internas e externas) e as condições iniciais (Brunner, 2008).

As condições de fronteira podem ser de vários tipos, nomeadamente: o hidrograma unitário, a curva de vazão, a altura uniforme, o hidrograma alternado e o hidrograma unitário alternado (Brunner, 2008).

### **2.5.3 Modelo LISFLOOD-FP**

Os dados de entrada do modelo LISFLOOD-FP são introduzidos no modelo através de onze tipos de ficheiros. Respectivamente (Bates *et al.*, 2007):

---

- **Parâmetros do modelo (.par)**

Este ficheiro contém a informação necessária para o programa correr e inclui os parâmetros de controlo.

- **Informação do canal (.river)**

Este ficheiro dá informação ao modelo sobre a localização do canal ao longo do troço. Os canais são caracterizados como um vector e o modelo interpola esse vector numa malha *raster* especificada pelo utilizador. Cada canal é caracterizado em termos da sua largura, coeficiente de rugosidade de *Manning* e as cotas topográficas do leito.

- **Condições de fronteira (.bci)**

Este ficheiro especifica as condições de fronteira que não são associadas ao canal, Quadro 4.

**Quadro 4 – Tipos de condições de fronteira do modelo hidráulico LISFLOOD-FP.**

Condição de Fronteira	Descrição	Valor fornecido no ficheiro tipo ".bci "
<b>CLOSED</b>	Caudal nulo (Opção pré definida)	-
<b>FREE</b>	Regime de escoamento uniforme	-
<b>HFIX</b>	Valor conhecido para a altura de água	Altura de água em metros
<b>HVAR</b>	Variação do perfil da superfície livre ao longo do tempo	Identificação da condição de fronteira, por exemplo, jusante
<b>QFIX</b>	Caudal constante	-
<b>QVAR</b>	Caudal variável	-

- **Variação das condições de fronteira (.bdy)**

Este ficheiro é utilizado para especificar a variação das condições de fronteira ao longo do tempo.

- **Coeficiente de Rugosidade (.n.ascii)**

Este ficheiro pode ser usado pelo utilizador para especificar o coeficiente de rugosidade de *Manning*, ao longo da zona de inundação, através da introdução do valor, em cada célula da malha *raster*.

- **Modelo digital do terreno (.dem.ascii)**

Este ficheiro tem o modelo digital do terreno.

---

- **Especificações do descarregador (.weir)**

É aplicada a equação de vazão do descarregador.

- **Passagens múltiplas do satélite (.opts)**

Este ficheiro especifica o tempo, em segundos, das várias passagens de um satélite, durante uma simulação.

- **Dados da altura de água (.stage)**

Este ficheiro é usado para especificar os pontos das coordenadas x e y, das séries de tempo das alturas de água.

- **Dados da evaporação (.evap)**

Este ficheiro é usado para especificar a taxa de evaporação ao longo do tempo. Este termo é aplicado em todas as células da malha do modelo, de forma a se obter uma perda uniforme de evaporação ao longo de todo o domínio modelado.

#### **2.5.4 Modelo TELEMAC-2D**

Durante a simulação, o programa utiliza vários tipos de dados de entrada. Alguns são obrigatórios, outros são opcionais. Apenas falaremos dos primeiros.

Tipos de dados de entrada, ficheiros obrigatórios, (EDF-DRD, 2002):

- **Ficheiro com a geometria do canal**

Este ficheiro contém toda a informação da malha *raster* do modelo, por exemplo, a topografia do leito.

- **Ficheiro com os dados de controlo do modelo**

É um ficheiro criado por um editor de texto. Representa o painel de controlo da computação. Contém um número de palavras-chave ao qual estão associados valores. O programa lê este ficheiro no início da computação.

- **Ficheiro com as condições de fronteira**

As condições de fronteira são definidas através dos seguintes dados: a altura de água e as componentes da velocidade (módulo, direcção e sentido).

---

- **Definição do coeficiente de rugosidade**

Existem várias opções para a caracterização da rugosidade do canal: rugosidade nula, lei de Haaland, lei de Chézy, lei de Strickler, lei de Manning e lei de Nikuradse.

É necessário especificar o valor da rugosidade correspondente à lei escolhida que melhor caracteriza o canal em análise.

### **2.5.5 Modelo TUFLOW**

Os dados de entrada do modelo TUFLOW dizem respeito à geometria do canal, às condições de fronteira e rugosidade do leito.

#### Geometria do canal

O domínio bidimensional necessita de um ou mais modelos digitais do terreno com resolução suficiente para descrever o escoamento (BMT WBN, 2008).

O domínio unidimensional necessita apenas da definição do percurso do escoamento entre as secções transversais (BMT WBN, 2008).

#### Condições de Fronteira

As condições de fronteira necessárias para a definição do modelo incluem as alturas de água e o caudal, dependendo sempre do tipo de análise tida em consideração e dos dados disponíveis (BMT WBN, 2008).

A forma como as condições de fronteira podem ser especificadas inclui (BMT WBN, 2008):

- O hidograma
- A variação da altura de água provocada pelas marés
- A curva de vazão
- A variação da velocidade com o tempo

#### Coeficiente de rugosidade do leito

São usados os valores do coeficiente de rugosidade de *Manning* ou o coeficiente de *Chézy*. No domínio unidimensional, a resistência do leito pode ser especificada através do tipo de cobertura do solo, podendo variar entre secções transversais (BMT WBN, 2008).

---

No domínio bidimensional, o valor pode ser aplicado à cobertura do solo ou o próprio utilizador atribui valores que variam ao longo da malha *raster*. Também é possível fazer variar o valor do coeficiente de rugosidade de *Manning* na vertical e na mesma secção transversal (BMT WBN, 2008).

### **2.5.6 Modelo SOBEK**

Os dados de entrada do modelo SOBEK dizem respeito à geometria do canal, às condições de fronteira e rugosidade do leito.

#### Geometria do canal

O domínio bidimensional do modelo requer um modelo digital do terreno que defina as cotas topográficas em todas as células da malha *raster*. A partir do MDT, a resolução pode ser especificada, por exemplo, o tamanho da célula. No domínio unidimensional o modelo apenas requer secções transversais ao longo do canal (MHL, 2006).

#### Condições de fronteira

De um modo geral as condições de fronteira que podem ser aplicadas no modelo incluem (MHL, 2006):

- Alturas de água.
- Caudal
- Curva de vazão

#### Coeficiente de rugosidade do leito

A rugosidade do leito pode ser caracterizada através de diferentes tipos de leis de resistência, nomeadamente: *Colebrook-White*, *Manning*, *Nikuradse*, *Strickler*, *Bos-Bijkerk* e *Chézy*. Os coeficientes aplicados podem ser constantes e/ou variáveis no espaço (MHL, 2006).

## **2.6 Dados de Saída**

### **2.6.1 Modelo FLO-2D**

Os resultados hidráulicos são apresentados nos ficheiros com os dados de saída. Os dados de saída são as alturas de água, o caudal e a concentração de sedimentos (O'Brien, 2007).

---

### 2.6.2 Modelo HEC-RAS

O programa cria tabelas com os seguintes dados em cada secção: o caudal, a área molhada, o perímetro molhado, a capacidade de transporte, a altura uniforme, a altura crítica, a altura da superfície livre, a altura da linha de energia, a velocidade média, a velocidade crítica, a velocidade total, a cota máxima do canal, o declive do canal, a cota mínima do canal, o coeficiente de Coriolis, o número de Froude e a tensão tangencial (Brunner, 2008).

### 2.6.3 Modelo LISFLOOD-FP

Durante a simulação, o modelo produz uma série de ficheiros com os resultados. Os resultados são produzidos para diferentes intervalos de tempo, de acordo com as especificações dos ficheiros de entrada que contêm os parâmetros do modelo.

Os ficheiros de resultados são (Bates *et al.*, 2007):

- **Ficheiro do balanço de massa (.mass)**

Este ficheiro indica o intervalo de tempo simulado, a área inundada, o volume de água, o caudal à saída da secção, as alturas de água e as perdas acumuladas por infiltração.

Nota: O nome deste ficheiro é dado pelo programa e indica o método de cálculo utilizado pelo mesmo, não sendo considerado, como um dado de saída, a lei de conservação da massa.

- **Ficheiro das alturas de água no momento de passagem do satélite (.op)**

Este ficheiro indica as alturas de água para as diferentes passagens do satélite desde o início da simulação.

- **Perfil da superfície livre da água (.profile)**

Este ficheiro dá o perfil da superfície da água.

A informação contida neste ficheiro inclui: a distância ao longo do talvegue do canal desde montante, a cota topográfica do leito e a altura de água.

- **Período de simulação**

Este parâmetro fixa o período de simulação, de acordo com as indicações do utilizador.



---

- **Altura de água, cotas da superfície livre e caudal (.wd e .elev)**

Estes ficheiros consistem numa malha com os valores do caudal, as alturas de água e os valores da cota topográfica da superfície. São ficheiros do formato *ascii*.

- **Máxima cota topográfica da superfície livre e máxima altura de água (.mex e .max)**

Estes ficheiros consistem numa malha em formato *raster* do tipo *ascii* onde apresentam a cota topográfica máxima da superfície de água estimada pelo modelo e a altura de água máxima, para cada *célula da malha raster*, ao longo da simulação.

- **Instante do início da inundação, instante da altura máxima de água e o tempo total de inundação (.totaltm)**

Estes ficheiros consistem numa malha em formato *raster* do tipo *ascii* com informação sobre o início da inundação, o instante da altura de água máxima e o tempo total de inundação em cada *célula da malha raster*.

- **Valores do caudal (.Qx e .Qy)**

Estes ficheiros de formato *raster* do tipo *ascii* têm informação sobre os valores do caudal nas direcções cartesianas *x* e *y*.

- **Intervalo de tempo adaptativo e valores limites do caudal**

Este ficheiro de formato *raster* do tipo *ascii* apresenta valores com o intervalo de tempo óptimo da modelação, assim como os valores limites do caudal nas direcções cartesianas *x* e *y*.

#### **2.6.4 Modelo TELEMAC-2D**

Os resultados do programa TELEMAC-2D são gerados através de um ficheiro constituído por determinadas palavras-chave (EDF DRD, 2002).

Durante a computação, o ficheiro com os resultados armazena a informação sobre a geometria do canal e o nome das variáveis modeladas. E ainda informação sobre cada intervalo de tempo e os valores das diferentes variáveis processadas ao longo da malha *raster*. O seu conteúdo depende dos valores obtidos para as *palavras-chave* abaixo referidas (EDF DRD, 2002):

---

- **O número de intervalos de tempo**

Este parâmetro é usado para determinar qual a informação que deve ser armazenada para representação.

- **Variáveis dos dados de saída**

Este parâmetro é utilizado para especificar as variáveis armazenadas pelo *software* no ficheiro com os resultados da simulação. Cada variável é identificada por um símbolo de acordo com o Manual de Referência do modelo.

Os dados de saída são as alturas de água, o caudal, o instante em que a inundação ocorreu e a área inundada.

- **Condições iniciais da modelação**

Apresentação das condições iniciais.

### **2.6.5 Modelo TUFLOW**

O programa cria mapas no formato *raster*, com os seguintes dados de saída (BMT WBN, 2008):

- Alturas de água;
- Velocidade (módulo direcção e sentido);
- Caudal unitário;
- Carga;
- Número de *Froude*;
- Coeficiente de rugosidade de *Manning*, coeficiente de viscosidade de *Eddy*.

Os mapas com os resultados uni e bidimensionais podem ser visualizados em conjunto.

### **2.6.6 Modelo SOBEK**

Os dados de saída são gerados em formato binário e em formato *ascii*.

Os resultados da modelação bidimensional são os seguintes (MHL, 2006):

- A cota topográfica máxima da água;
- A altura máxima de água;
- A velocidade máxima da água.

---

Os resultados para a modelação unidimensional, dizem respeito a:

- As cotas topográficas da água;
- As alturas de água;
- A velocidade máxima da água;
- O caudal de ponta;
- O nível máximo de água a montante e a jusante das estruturas modeladas.

---

### **3. Caracterização da sub-bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca**

#### **3.1 Introdução**

O presente capítulo tem como objectivo a caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca. Nos subcapítulos que se seguem são apresentados; o suporte de informação utilizado, a metodologia utilizada, o enquadramento geográfico da área de estudo, as características fisiográficas da área de estudo e os registos de cheias/ inundações.

#### **3.2 Elementos de suporte à caracterização fisiográfica**

Para estudar a bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca foram utilizadas as cartas militares de Portugal Série M888, folhas: 260, 261, 272, 273, 274, 284, 285, 286, 296, 297, 298, 307, 308, 309 e 318 dos Serviços Cartográficos do Exército à escala 1/25 000, a carta *Corine Land Cover* n.º 31, de 2006, disponibilizada pelo Instituto Geográfico Português à escala 1/100 000, a Carta dos Solos de Portugal classificados pelas suas características hidrológicas à escala 1/3 000 000 e a altimetria à escala 1/25 000. Foi, ainda, consultado o plano de bacia hidrográfica do Rio Lis.

#### **3.3 Metodologia aplicada**

A caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica (BH) do Rio Lis para a secção de referência na ponte da Bajanca (secção a jusante do troço em estudo) foi efectuada com o apoio dos sistemas de informação geográfica (SIG), nomeadamente o *software* ARCGIS 9.3.1.

Para estudar as características fisiográficas da referida BH, foi necessário associar algumas extensões disponíveis para este *software*:

- 3D ANALYST,
- SPATIAL ANALYST,
- HEC-GEOHMS.

O tratamento da informação foi realizado segundo a metodologia que se inúmera:

---

#### **a. Criação do modelo digital do terreno (MDT)**

Através da extensão 3D ANALYST e com base na altimétrica à escala 1/25 000 foi gerado o MDT e o mesmo foi convertido para o formato *raster*.

#### **b. Criação da rede hidrográfica**

Após a obtenção do MDT, e com a extensão HEC-GEOHMS devidamente instalada e activada, realizaram-se vários processos, de forma a se poder gerar as cartas que caracterizam a rede hidrográfica, nomeadamente: a direcção de escoamento, a acumulação de escoamento, a definição da rede e a segmentação da rede hidrográfica.

#### **c. Delimitação da BH na secção da ponte da Bajanca do Rio Lis**

Após concluir a etapa anterior, através da extensão HEC-GEOHMS é escolhida uma secção de referência na rede hidrográfica (neste caso a secção relativa à ponte da Bajanca) e o programa gera automaticamente a BH pretendida. Após a delimitação, foi efectuado um ajustamento manual dos limites da bacia, de acordo com a cartografia à escala 1/25 000.

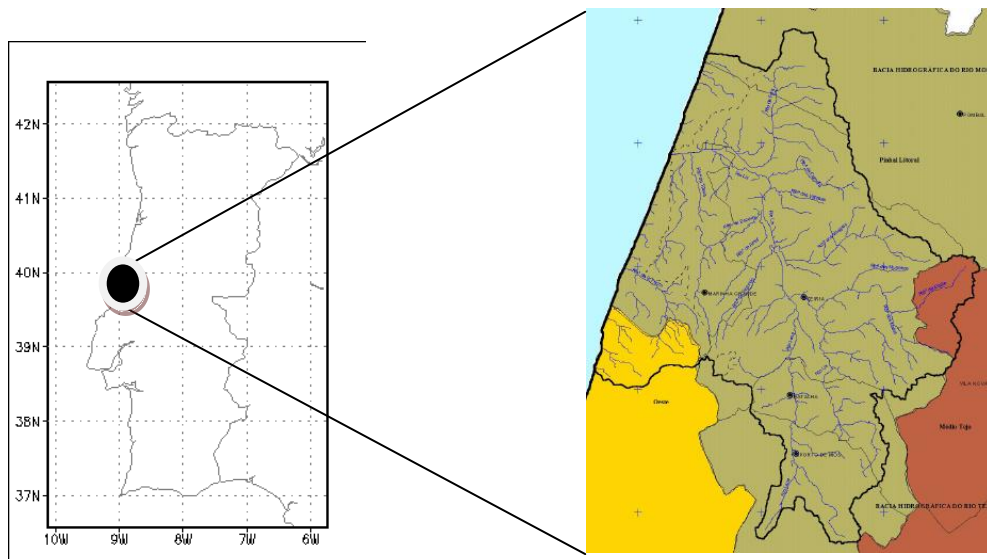
#### **d. Criação de cartas temáticas**

Por último foram criadas as seguintes cartas temáticas

- de declives,
- de solos, classificados pelas suas características hidrológicas,
- de usos de solos (*Corine Land Cover*).

### **3.4 Enquadramento geográfico**

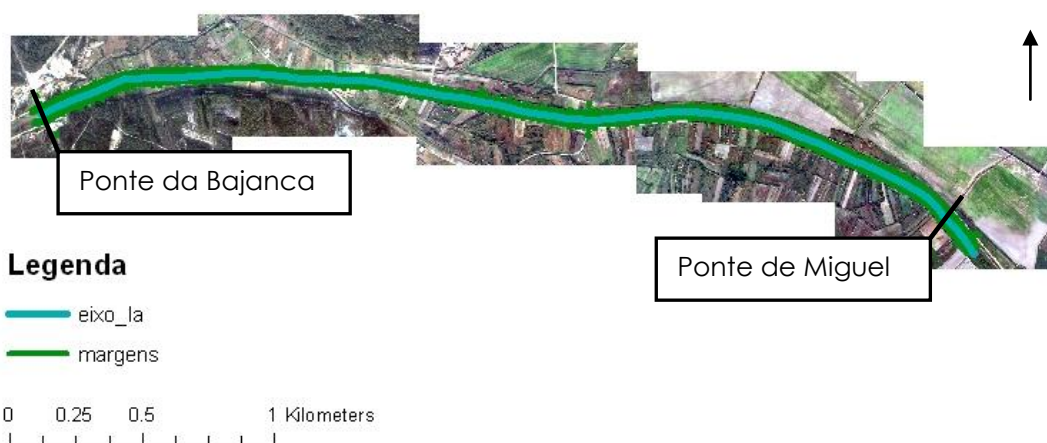
A bacia hidrográfica do Rio Lis tem orientação Norte-Sul, localiza-se entre 39°31'N e 39°58'N de Latitude e 8°36'W e 8°58'W de Longitude, abrange uma área aproximada de 945 km<sup>2</sup>, é limitada a Norte pela bacia hidrográfica do Rio Mondego, a Leste pela bacia hidrográfica do Rio Tejo e a Sul pela bacia do Rio Alcoa, Figura 4. Os principais afluentes do Rio Lis são o Rio Lena, o Rio Fora, o rio Alcaide e as ribeiras dos Milagres, da Caranguejeira e da Carreira.



**Bacia do Rio Lis segundo o Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Lis (INAG).**

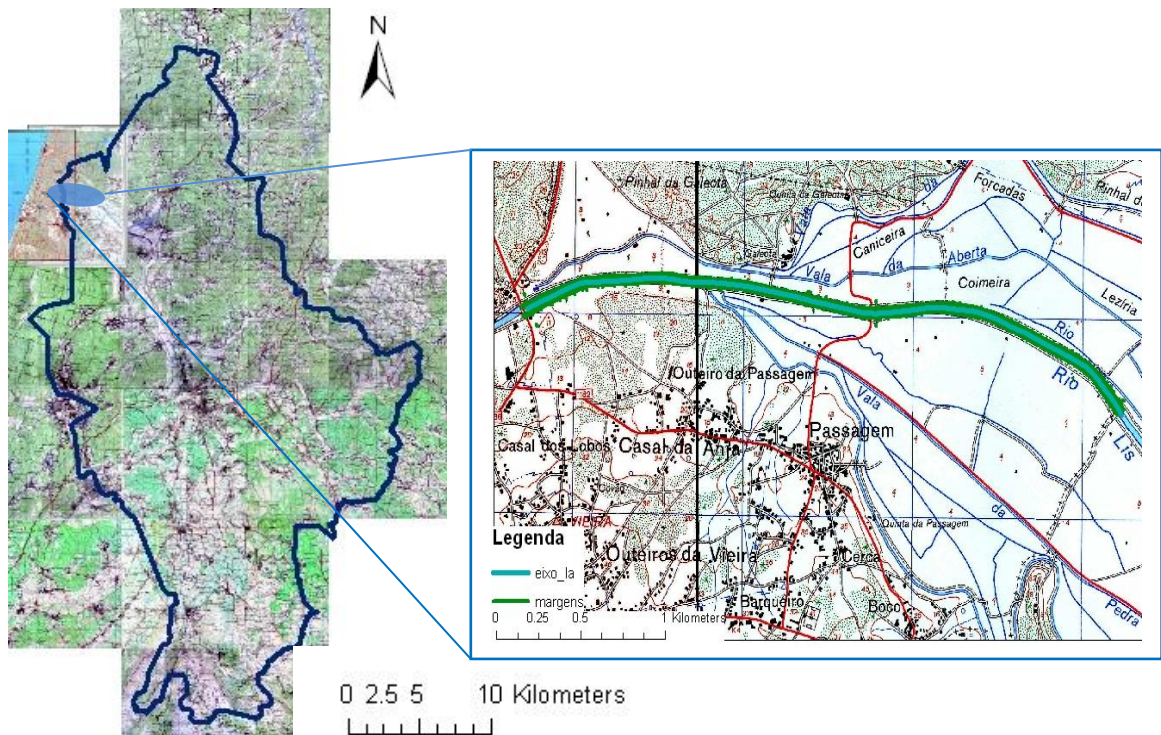
**Figura 4 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Lis.**

O Rio Lis apresenta uma classificação decimal 332. O troço em estudo localiza-se, a cerca de 3 km da sua foz, entre a ponte de Miguel, limite de montante e a ponte da Bajanca, limite de jusante, correspondendo a um troço de 4 km, Figura 5.



**Figura 5 – Troço de 4 km do Rio Lis, entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca. Ortofotomapas, com sobreposição da linha de água e das margens.**

A área da BH do Rio Lis, na secção da ponte da Bajanca, é de 785.34 km<sup>2</sup> e o comprimento da linha de água principal é 50.53 km, Figura 6.



**Figura 6 – Delimitação da bacia hidrográfica do Rio Lis e localização do trecho de 4 km entre a ponte de Miguel e a ponte da Bjanca.**

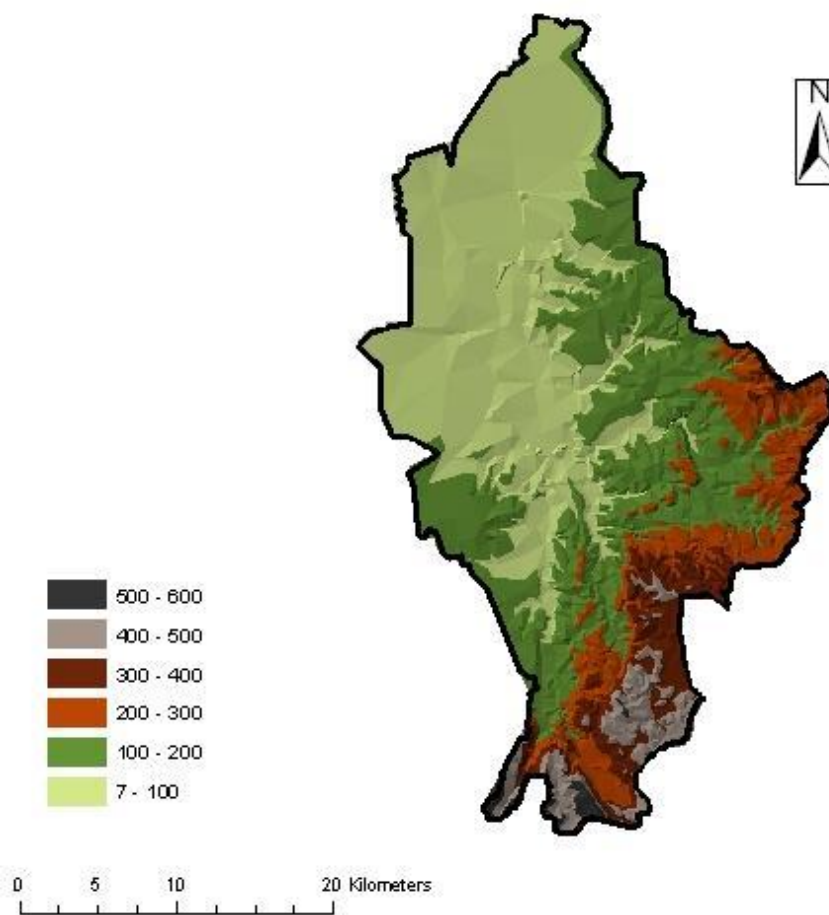
### **3.5 Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bjanca**

#### **3.5.1 Forma da bacia hidrográfica**

A bacia hidrográfica apresenta um coeficiente de compacidade,  $k_c$ , de 1.60 e possui um factor de forma,  $k_f$ , de 0.31, valores que indicam que a bacia é alongada e com pouca tendência para a ocorrência de cheias (Lencastre, 2006). Contudo, na presente área de estudo, há conhecimento de ocorrência de cheias como as que ocorrem em Outubro de 2006 e que provocaram estragos significativos em algumas infra-estruturas e campos agrícolas, informação que será detalhada no capítulo 3.6.

#### **3.5.2 Caracterização do relevo**

A Figura 7 representa a carta hipsométrica da bacia hidrográfica do Rio Lis. O MDT foi criado a partir da altimetria à escala 1/25 000 e com a extensão 3D ANALYST do software ARCGIS 9.3.1. activada.



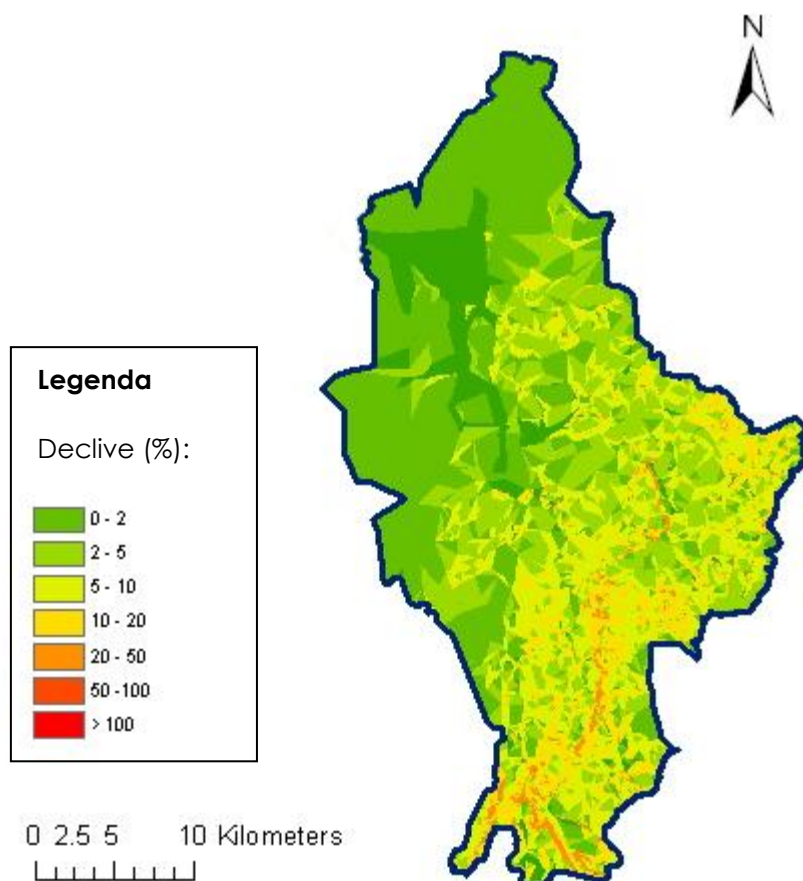
**Figura 7 – Carta hipsométrica da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.**

A bacia hidrográfica na secção em estudo apresenta altitude máxima de 579.63 m, altitude mínima de 7 m e altitude média de 160 m. Foi criada uma carta de declives, Figura 8, a partir do MDT, calculando-se o declive médio (Dm) da bacia hidrográfica do Rio Lis, para a secção da ponte da Bajanca, igual a  $Dm=8.5\%$ .

De acordo com a classificação apresentada na Figura 8, da página seguinte, e atendendo à classificação proposta por Costa, (Costa, 2001), apresentada no Quadro 5, o tipo de relevo da bacia hidrográfica pode ser classificado como ondulado.

De acordo com esta classificação, o tipo de relevo da BH para a secção da ponte da Bajanca varia entre o plano e o muito ondulado.





**Figura 8 – Carta de declives da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.**

**Quadro 5 – Tipo de relevo da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca (Costa, 2001).**

<b>Tipo de Relevo</b>	<b>Inclinação (%)</b>
Plano	0 a 2
Levemente Ondulado	2 a 5
Ondulado	5 a 10
Muito Ondulado	10 a 20
Montanhoso	20 a 50
Muito Montanhoso	50 a 100
Escarpado	>100

### **3.5.3 Caracterização do tipo hidrológico do solo**

O relevo e o tipo de solo condicionam o escoamento superficial da água na bacia hidrográfica. A velocidade da água na superfície do solo e na rede hidrográfica, os fenómenos de infiltração e a susceptibilidade de erosão dos solos da bacia são factores que determinam o caudal de ponta de cheia (Lencastre, 2006).

Neste estudo não foi possível caracterizar o tipo de solos, com maior detalhe, uma vez que ainda não existe cartografia digital disponível na Direcção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural (DGADR), apenas está disponível cartografia à escala 1/ 25 000 para o Sul do país.

Foi digitalizada e georreferenciada a carta de classificação hidrológica dos solos de Portugal continental à escala 1/ 3 000 000. Os solos são classificados segundo as suas características hidrológicas de acordo com a classificação do *Soil Conservation Service* (SCS), Figura 9. No Anexo I é apresentada com maior detalhe a classificação do SCS.



**Figura 9 – Classificação dos solos de acordo com o grupo hidrológico para a bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.**

No Quadro 6 é apresentada a distribuição dos tipos hidrológicos de solos para a bacia hidrográfica do Rio Lis na secção considerada.

**Quadro 6 – Distribuição dos solos segundo o grupo hidrológico (classificação do SCS), para a bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.**

Tipo de Solo	Área (%)	Área (km <sup>2</sup> )
Tipo B	66.22	520.04
TipoD	33.78	265.30

---

### **3.5.4 Ocupação do solo – Corine Land Cover**

A ocupação do solo influencia a infiltração da água e o escoamento superficial (Lencastre, 2006).

Neste estudo não foi possível obter as Cartas de Ocupação do Solo, por não existir na DGADR, e atendendo a essa condição, utilizou-se a carta *Corine Land Cover* n.º 31, de 2006, à escala 1/ 1 000 000.

A carta de ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio Lis está representada na Figura 10 e Quadro 7, onde são apresentadas as percentagens dos diferentes tipos de ocupação do solo. Destaca-se a ocupação com floresta resinosa de aproximadamente 29% da área total.

## Legenda

Ocupação do solo (segundo a Carta Corine Land Cover)

- Aeroportos e aeródromos
- Agricultura com espaços naturais e semi-naturais
- Culturas temporárias de regadio
- Culturas temporárias de sequeiro
- Culturas temporárias e/ou pastagens associadas a culturas permanentes
- Florestas abertas, cortes e novas plantações
- Florestas de folhosas
- Florestas de resinosas
- Florestas mistas
- Florestas de resinosas
- Indústria, comércio e equipamentos gerais
- Olivais
- Pastagens permanentes
- Pomares
- Redes Márias e ferroviárias e espaços associados
- Rocha nua
- Sistemas culturais e parcelares complexos
- Tecido urbano descontínuo
- Vegetação esclerófila
- Vegetação esparsa
- Vegetação herbácea natural
- Áreas áridas
- Áreas de construção
- Áreas de deposição de resíduos
- Áreas de extração de inertes

0 2.5 5 10 Kilometers

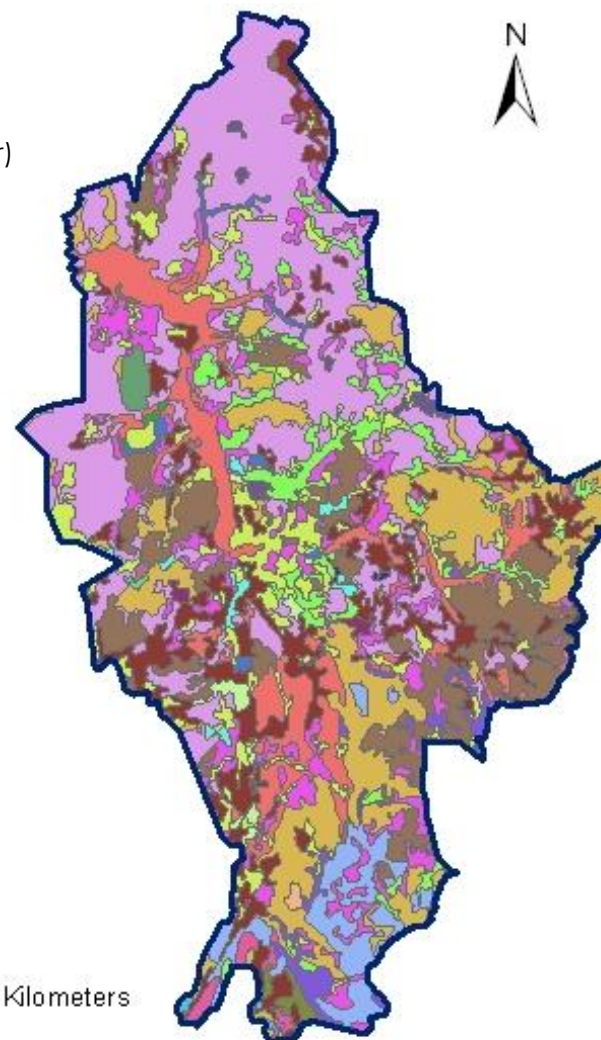


Figura 10 – Ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.

**Quadro 7 – Percentagem de ocupação do solo segundo a carta Corine Land Cover para a bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.**

Ocupação do Solo	A (km <sup>2</sup> )	A (%)
Aeroportos e aeródromos	4.20	0.53
Agricultura com espaços naturais e semi-naturais	62.67	7.98
Áreas ardidas	1.06	0.13
Áreas de construção	2.23	0.28
Áreas de deposição de resíduos	0.53	0.07
Áreas de extracção de inertes	4.11	0.52
Culturas temporárias de regadio	61.39	7.82
Culturas temporárias de sequeiro	5.18	0.66
Culturas temporárias e/ou pastagens associadas a culturas permanentes	37.74	4.81
Florestas abertas, cortes e novas plantações	76.15	9.70
Florestas de folhosas	13.49	1.72
Florestas de resinosas	226.80	28.88
Florestas mistas	102.96	13.11
Indústria, comércio e equipamentos gerais	5.00	0.64
Olivais	11.96	1.52
Pastagens permanentes	0.70	0.09
Pomares	5.00	0.64
Redes viárias, ferroviárias e espaços associados	0.69	0.09
Rocha nua	0.98	0.12
Sistemas culturais e parcelares complexos	85.14	10.84
Tecido urbano descontínuo	56.50	7.19
Vegetação esclerófila	13.48	1.72
Vegetação esparsa	2.90	0.37
Vegetação herbácea natural	4.48	0.57

### 3.5.5 Número de escoamento (CN)

De acordo com a classificação do SCS, Anexo I, obteve-se o CN para diferentes grupos hidrológicos e ocupação do solo, para as condições médias de humedecimento do mesmo, Quadro 8, da página seguinte.

O CN na bacia hidrográfica, para as condições médias de humedecimento do solo (AMC-II), foi obtido através da média ponderada das áreas do Quadro 9 para diferentes ocupações e grupos hidrológicos, tendo-se calculado o valor de 76. Considerando as condições de elevado humedecimento do solo (AMC-III), o Número de escoamento é igual a CN=89. Tendo sido, este último, o valor utilizado nos cálculos que se seguem.

**Quadro 8 – Números de escoamento da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.**

Grupo Hidrológico do solo	Ocupação do Solo (CLC)	CN (n.º de escoamento)	Área (km <sup>2</sup> )
B (Potencial de escoamento superficial abaixo da média)	Aeroportos e aeródromos	99	0.21
	Agricultura com espaços naturais e semi-naturais	77	32.40
	Áreas de construção	83	2.08
	Áreas de deposição de resíduos	83	0.53
	Áreas de extracção de inertes	83	3.64
	Culturas temporárias de regadio	68	33.87
	Culturas temporárias de sequeiro	73	3.59
	Culturas temporárias	82	34.06
	Florestas abertas, cortes e novas plantações	68	62.98
	Florestas folhosas	68	7.05
	Florestas resinosas	68	200.21
	Florestas mistas	68	67.34
	Indústria, comércio e equipamentos gerais	90	4.28
	Olivais	72	0.53
	Pomares	72	1.56
	Redes viárias, ferroviárias e espaços associados	99	0.69
	Sistemas culturais e parcelares complexos	90	54.07
	Tecido urbano descontinuo	100	40.89
D (Elevado potencial de escoamento)	Aeroportos e aeródromos	99	3.99
	Agricultura com espaços naturais e semi-naturais	87	30.27
	Áreas ardidas	84	1.06
	Áreas de construção	91	0.14
	Áreas de extracção de inertes	91	0.47
	Culturas temporárias de regadio	79	27.53
	Culturas temporárias de sequeiro	83	1.58
	Culturas temporárias	92	3.68
	Florestas abertas, cortes e novas plantações	85	13.18
	Florestas de folhosas	85	6.44
	Florestas de resinosas	85	26.60
	Florestas mistas	85	35.62
	Indústria, comércio e equipamentos gerais	95	0.72
	Olivais	87	11.44
	Pastagens permanentes	89	0.70
	Pomares	85	3.44
	Rocha nua	90	0.98
	Sistemas culturais e parcelares complexos	94	31.07
	Tecido urbano descontinuo	100	15.61
	Vegetação esclerófila	79	13.48
Vegetação esparsa	79	2.90	
Vegetação herbácea natural	79	4.48	

---

### 3.5.6 Rede hidrográfica

#### 3.5.6.1 Ordem das linhas de água

Segundo o critério de *Strahler* o Rio Lis, na secção da ponte da Bajanca, classifica-se com ordem 4, numa representação da rede hidrográfica gerada através do modelo digital do terreno com base na carta militar à escala 1/25000, Figura 11.



**Figura 11 – Ordem das linhas de água da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.**

#### 3.5.6.2 Linha de água principal

A linha de água principal apresenta um comprimento total de 50.53 km, Figura 12.



**Figura 12 – Linhas de água da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca.**

### 3.5.6.3 Tempo de resposta da bacia ( $t_{lag}$ )

O tempo de resposta da bacia ou tempo *lag*, ( $t_{lag}$ ), é definido como o intervalo de tempo entre o centro de gravidade da precipitação útil e a ponta do hidrograma (Lencastre, 2006).

O  $t_{lag}$  foi calculado através da fórmula do *Soil Conservation Service (SCS)*, equação 14, tendo sido obtido o valor para o tempo de resposta da bacia hidrográfica igual a 4.75 horas.

$$t_{lag} = \frac{l^{0,8} \times (0,03937 \times S + 1)^{0,7}}{734,43 \times D^{0,5}} \quad (14)$$

Onde:

$t_{lag}$  - Tempo de resposta da bacia (h),



---

$l$  - Comprimento da linha de água principal ( $m$ ),

$D$  - Declive médio da bacia hidrográfica (%);

$S$  - Capacidade máxima de retenção da bacia hidrográfica (mm).

A capacidade máxima de retenção da bacia é igual a 31,39 mm calculada através da relação:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (15)$$

Onde:

$CN$  - Número de escoamento.

#### **3.5.6.4 Tempo de concentração ( $t_c$ )**

O tempo de concentração é definido como o tempo necessário para que toda a área de drenagem de uma determinada bacia hidrográfica contribua para o escoamento superficial na secção de saída. É ainda considerado como uma característica constante da bacia, sendo independente das características das precipitações (Lencastre, 2006).

Para o cálculo do tempo de concentração, aplicou-se a fórmula do *Soil Conservation Service* (SCS):

$$t_c = 1,67 \times t_{lag} \quad (16)$$

e obteve-se o valor de 7.93 horas.

### **3.6 Registo de Cheias/ Inundações**

Neste subcapítulo é apresentada a informação recolhida relativa a registos de cheias e inundações que ocorreram no Rio Lis. São também apresentadas as entidades que foram consultadas no âmbito da realização do presente estudo e ainda a informação que daí resultou.

A densidade da população da zona em estudo é muito pequena. As povoações mais próximas da área em análise são Vieira de Leiria e Coimbra.

Foram consultadas várias entidades, nomeadamente: a Protecção Civil, os Bombeiros Municipais, a Associação de Regantes do Vale do Lis, a ARH do Centro, a Oikos, a Câmara Municipal de Leiria, entre outras, para recolha de

---

informação relativa a registos históricos de cheias e inundações que tenham ocorrido no Rio Lis, em especial na zona em estudo. De acordo com a informação recebida, por parte dos Bombeiros Municipais, existem registos de cheias que ocorreram em 1997 e 2006, junto à confluência do Rio Lis com o Rio Lena. Em relação à área de estudo, não foi possível obter informação sobre as alturas de água e a extensão da inundações para os registos de cheias que tenham ocorrido, embora, em visita ao local, e, em conversa com a população, se tenha apurado ter havido uma cheia, há cerca de 30 anos, onde o leito maior e os terrenos adjacentes terão sido atingidos.

Posteriormente à consulta efectuada, foi analisado o *Memorandum*, relativo às cheias que ocorreram, em Outubro de 2006, realizado pela Associação de Regantes e Beneficiários do Vale do Lis.

O *Memorandum* identifica várias situações e danos nas linhas de água que constituem o sistema de defesa contra cheias e redes de drenagem do Aproveitamento Hidroagrícola do Vale do Lis. São de realçar os aspectos que seguidamente se enumeram, relativos ao episódio de precipitação extrema de Outubro de 2006, (ARVRL, 2006):

- I. Rombo na linha de água, designada por colector de Monte Redondo/Carreira, a 24 de Outubro de 2006. Ponto de descarga muito significativo dos grandes caudais, constituindo perigo para as casas de habitação da freguesia de Carreira. Por consequência deste rombo, ficaram submersas as parcelas agrícolas em frente a Coimbrão, (área de estudo), tendo-se verificado a subida do nível da água sobre os solos provocando mesmo a submersão de um troço da estrada municipal, que liga Aroeira à ponte do Braço e Galeota. Nesta zona, as culturas em risco foram essencialmente vinha e milho.
- II. Inundação de áreas extensas na parte jusante do vale, que abrange o troço de 4 km em análise. Todo o volume de água descarregado para os campos adjacentes, tem escoamento, através das redes de drenagem interiores do vale, que só poderão ser restituídas para o rio, através das comportas da Galeota e da Bajanca, (secção de jusante do presente estudo). Através deste evento, foi possível verificar dois tipos de fenómenos: em primeiro lugar, o efeito potenciador dos riscos que se

---

verificaram junto à povoação de Carreira, e em segundo, os efeitos da inundação do leito maior, nos terrenos de Coimbrão e Galeota, (zona de estudo). Para o referido episódio de precipitação extrema, o balanço estimado das culturas danificadas foram superiores a 150 hectares e ainda verificaram-se graves consequências negativas no conjunto de instalações e infra-estruturas colectivas, nomeadamente nas estações elevatórias, redes de caminhos e rega.

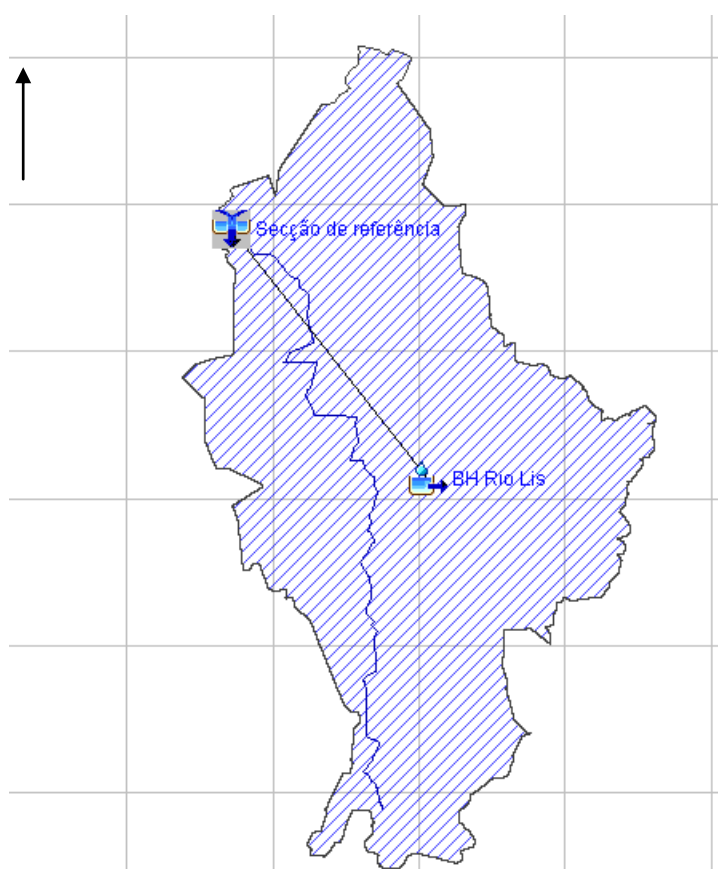
---

## 4. Modelação hidrológica. Aplicação do modelo HEC-HMS

### 4.1 Metodologia aplicada ao caso de estudo

Após a análise das características físicas da BH do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca (capítulo anterior) e com o apoio da extensão HEC-GEOHMS prepararam-se os dados de entrada do modelo HEC-HMS, versão 3.4.

O caudal determinado foi obtido para a secção de jusante, uma vez se ter considerado a diferença entre a secção de montante e a secção de jusante pequena, (a extensão do troço são 4 km), existindo uma pequena área de contribuição e, ainda, por ser a mais desfavorável.



**Figura 13 – Esquema do modelo da bacia hidrográfica do Rio Lis na secção da ponte da Bajanca. Desenho ilustrativo sem escala.**

Para aplicar o modelo hidrológico *HEC-HMS* foi necessário preparar os dados de entrada, segundo as suas componentes, respectivamente: o modelo da bacia, o modelo meteorológico e as especificações de controlo.

Os dados de entrada do modelo da bacia considerados são os elementos hidrológicos e os parâmetros do escoamento, (as bacias e sub-bacias, os troços da linha de água, as confluências, os reservatórios, as depressões, as

---

fontes e as derivações). O modelo meteorológico compreende os dados da precipitação e da evapotranspiração. As especificações de controlo indicam o intervalo de tempo da simulação, (o instante inicial, o instante final e ainda o intervalo de cálculo da simulação do hidrograma de cheia afluyente).

#### **4.2 Determinação do caudal de ponta de cheia e hidrograma de cheia**

O método de determinação do caudal de ponta de cheia para um período de retorno  $T=100$  anos aplicado foi o método do SCS segundo os pressupostos apresentados no Anexo I.

Para a determinação das precipitações intensas com a duração pretendida e um período de retorno ( $T$ ) igual a 100 anos, consideraram-se as curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF), propostas por Brandão *et al.* (2001) para o posto udográfico de Coimbra (12G/01), Anexo II, por ser o posto que se encontra mais perto da zona de estudo. Cujá forma geral é:

$$i = a t^b \quad (17)$$

Sendo:

$i$  a intensidade da precipitação (mm/h);

$t$  a duração da precipitação (min);

$a$  e  $b$  são os parâmetros em função do período de retorno ( $T$ ) e da localização do posto udográfico, sendo respectivamente  $a=632,17$  e  $b=-0,640$ .

Deste modo, a precipitação total ( $P$ ) ocorrida é

$$P = i \times t \quad (18)$$

Como dados de entrada no modelo hidrológico HEC-HMS foram considerados a área da bacia hidrográfica, as perdas iniciais da precipitação, o número de escoamento, o tempo de resposta da BH e a precipitação.

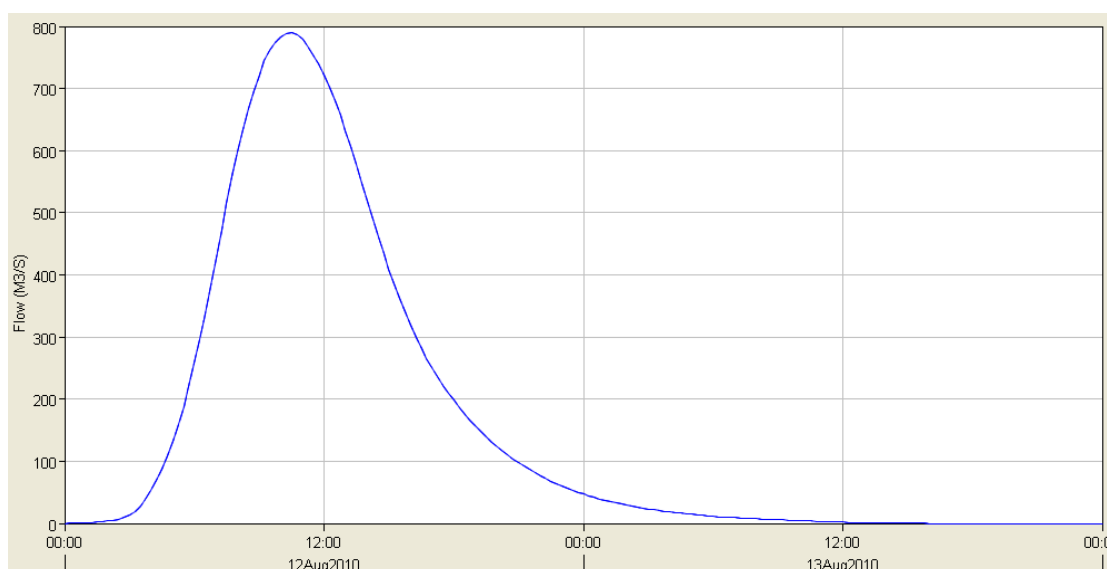
Na determinação do hidrograma de cheia, escolheu-se o método do hidrograma unitário do SCS e considerou-se o escoamento base nulo, uma vez que o escoamento de base tem pouco significado para intervalos de precipitação intensa, (Lencastre, 2006).

Após correr o programa, foi possível obter os resultados que se apresentam no Quadro 9: o caudal de ponta de cheia, tempo para a ponta de cheia, a

precipitação total, a precipitação útil, as perdas de precipitação, o escoamento total e o hidrograma de cheia são apresentados na Figura 14.

**Quadro 9 – Resultados da aplicação do modelo HEC-HMS, versão 3.4, para a bacia hidrográfica do Rio Lis, na secção da ponte da Bajanca.**

<b>Resultados do modelo hidrológico HEC-HMS</b>	
Caudal de Ponta de cheia (m <sup>3</sup> /s)	789,80
Tempo para a ponta de cheia (h)	10,5
Precipitação total (mm)	72,95
Precipitação útil (mm)	34,60
Perdas totais (mm)	38,35
Escoamento total (mm)	34,60



**Figura 14 – Hidrograma de Cheia obtido através do programa HEC-HMS, versão 3.4, para um período de retorno de 100 anos, aplicado à secção da ponte da Bajanca do Rio Lis.**

Através da aplicação do modelo hidrológico HEC-HMS, à bacia hidrográfica do Rio Lis, para a secção da ponte da Bajanca, estima-se que, para uma precipitação total de 72,95 mm, o escoamento total correspondente é igual a 34,60 mm, alcançando um caudal de ponta de cheia, ao fim de 10,5 horas, de 789,90 m<sup>3</sup>/s.

Uma vez que o modelo não foi calibrado, o valor de caudal obtido foi comparado com o valor do Plano de Bacia hidrográfica do Rio Lis, tendo-se considerado o resultado razoável.

---

## 5. Modelação hidráulica. Aplicação dos modelos LISFLOOD-FP e HEC-RAS ao caso de estudo.

### 5.1 Introdução

Neste capítulo são aplicados dois modelos hidráulicos, a um troço de 4 km, do Rio Lis, onde a secção de jusante considerada será a ponte da Bajanca e a secção de montante, a ponte de Miguel.

Na Figura 15 apresenta-se o troço do Rio Lis, assim como a localização das secções transversais levantadas topograficamente.



**Figura 15 – Troço de 4 km do Rio Lis entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca.**

Para a modelação do troço em análise, foram identificadas e levantadas topograficamente 70 secções transversais, distanciadas entre si, entre 60 a 150 m, tendo em conta a irregularidade do traçado da linha de água. Os dados topográficos das margens e terrenos adjacentes foram obtidos através de altimetria, à escala 1/25 000, em conjunto com os dados do levantamento topográfico do leito do canal.

No presente estudo foram aplicados os modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS que apresentam características distintas. O LISFLOOD-FP é um modelo de base *raster* 1D acoplado a um modelo 2D para simular o escoamento no leito maior do canal, enquanto que, o modelo HEC-RAS é apenas unidimensional. A versão do modelo HEC-RAS utilizada no presente estudo é uma versão comercial da *BOSS-RMS™*, (*River Modeling System*), desenvolvida para ser aplicada em ambiente CAD.

Nos capítulos 5.2 e 5.3 os modelos LISFLOOD-FP e HEC-RAS são apresentados de forma mais detalhada, atendendo às suas especificações.

---

## 5.2 Modelo LISFLOOD-FP

### 5.2.1 Notas prévias sobre o modelo hidráulico LISFLOOD-FP

O LISFLOOD-FP é um modelo hidráulico de base *raster* que foi especialmente desenvolvido para tirar o máximo partido de dados de alta resolução topográfica, embora, no presente estudo, não tenha sido utilizado este tipo de dados. O modelo tem por base a equação unidimensional (1D) da onda cinemática para a representação do escoamento do canal acoplado a um modelo bidimensional (2D) de propagação de onda de cheia para a simulação do escoamento no leito maior.

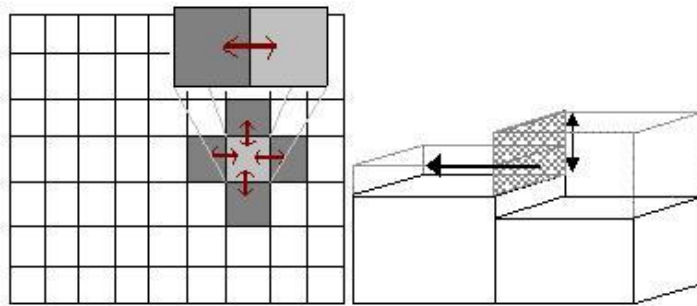
A topografia do canal e as zonas inundáveis são discretizadas numa malha regular de formato *raster* *ascii*, permitindo a visualização dos resultados do modelo através de um SIG.

### 5.2.2 Hipóteses simplificativas e limitações do modelo LISFLOOD-FP

O modelo LISFLOOD-FP assume as seguintes hipóteses simplificativas:

- Para os regimes fluviais, o escoamento no canal é representado através das equações básicas do escoamento na forma unidimensional e a geometria do canal, no seu leito menor, é simplificada a um rectângulo;
- O perímetro molhado do canal é aproximado à largura do canal, por se considerar que a altura de água na secção transversal é muito pequena relativamente à largura do leito menor;
- Para a modelação do leito maior (fora das margens), o escoamento é discretizado numa malha de células *raster*, o que permite ao modelo a representação bidimensional do escoamento fora das margens. O caudal entre duas células é em função da diferença de carga entre essas células, Figura 16. Esta metodologia é designada por *storage cell concept*;





**Figura 16 – Representação esquemática do escoamento no leito maior do modelo LISFLOOD-FP. Desenho adaptado do Manual do Utilizador do modelo LISFLOOD-FP (Bates, 2007).**

- O caudal nas células da *malha raster* pode ser calculado através da fórmula analítica do escoamento uniforme com a aplicação da lei de resistência, equação de Manning ou a lei de vazão do descarregador, o que permite uma solução aproximada da onda de difusão em duas dimensões;
- Entre o escoamento no canal principal e as zonas de inundação não é considerada a transferência de quantidade de movimento, pelo que só é aplicado o princípio da conservação da massa;
- O regime de escoamento é gradualmente variado;
- O modelo utiliza o Sistema Internacional de unidades.

Limitações do modelo a destacar:

- O *software* está limitado a situações de modelação onde os dados topográficos estão disponíveis e são exactos e, ainda, a situações onde é possível caracterizar as condições de fronteira do modelo, nomeadamente a variação do caudal com o tempo;
- Um factor determinante na sua aplicação é o número de células que consegue simular, está limitado a  $10^6$  células.

### **5.2.3 Requisitos do modelo hidráulico LISFLOOD-FP**

Os dados requeridos pelo modelo LISFLOOD-FP são caracterizados através dos seus ficheiros de entrada, (descritos anteriormente no capítulo 2.5.3), e apresentados no Quadro 10, (Bates, 2007).

**Quadro 10 – Dados de entrada do modelo LISFLOOD-FP.**

<b>Tipo de dados</b>	<b>Origem</b>	<b>Observações</b>
<b>Modelo Digital do Terreno (MDT)</b>	Os dados típicos têm origem em fotogrametria aérea ou varrimento aéreo por laser (LIDAR)	A resolução da malha <i>raster</i> de 25 a 100 m para a delimitação de zonas inundáveis é aceitável, embora resoluções mais pequenas sejam preferíveis.
<b>Condições de Fronteira:</b>  <b>- Hidrograma de cheia</b>  <b>- Caudal através do domínio em estudo</b>  <b>- Origens do caudal dentro do domínio</b>	Registos de estações hidrométricas  - registos de estações hidrométricas, - cota da superfície livre num determinado ponto; - dados da curva característica de maré, registos da maré e dados de inundações frequentes.  Águas de origem pluvial e costeira.	O modelo pode ser aplicado para o escoamento permanente ou variável.  Pode ser usado para especificar a condição de fronteira a jusante e/ ou para fazer a simulação de inundações em zonas costeiras.  É usado para especificar pontos de descarga ou entrada do caudal dentro do domínio. Pode ser aplicado para simplificar a simulação do escoamento na zona costeira.
<b>Declive do canal</b>	Valor retirado do MDT	Se necessário pode ser caracterizado em cada ponto do canal
<b>Largura do canal</b>	Valor retirado do MDT	Retirado do MDT
<b>Altura da água nas margens</b>	Valor retirado do MDT	Podem ser caracterizadas individualmente ou em pontos específicos do canal.
<b>Intervalo de tempo</b>	O passo de cálculo pode ser um valor fixo ou adaptativo, (calculado pelo <i>software</i> ).	Pode variar entre 2 a 20 s.

#### **5.2.4 Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP ao caso de estudo. Preparação dos dados de entrada**

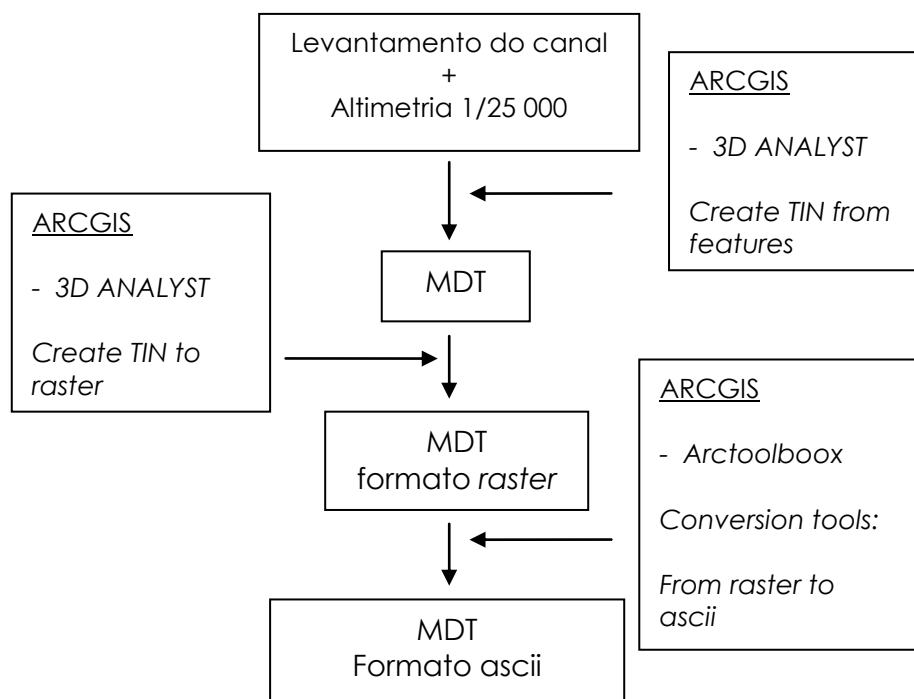
Para aplicar o modelo hidráulico LISFLOOD-FP é necessária uma preparação prévia dos dados de entrada. Neste exemplo de aplicação utilizaram-se quatro tipos de dados, como seguidamente se enumera e explica.

---

**i. Modelo Digital do Terreno (ficheiro: lis.dem.asc)**

Com base no levantamento topográfico do leito do canal e, uma vez que não foi possível obter informação topográfica mais detalhada, para as margens e terrenos adjacentes, incorporou-se a altimetria à escala 1/25 000, para se efectuar a caracterização do terreno. Para isso foi necessário criar o modelo digital do terreno (MDT) e posteriormente convertê-lo para o formato raster. O formato do MDT é o formato ascii. A resolução da célula do MDT escolhida, atendendo aos dados de base, é de 3 m.

A Figura 17 apresenta os processos envolvidos na criação do MDT utilizado na aplicação do modelo LISFLOOD-FP.



**Figura 17 – Processos envolvidos na criação do MDT. Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP para o troço de 4 km do Rio Lis em estudo.**

**ii. Ficheiro River (ficheiro: lis.river)**

O ficheiro *river* é a componente do modelo que representa a linha de água, contém informação sobre a sua localização e natureza. Cada canal é caracterizado em função da sua largura, do coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) e das cotas de fundo do leito.

Neste exemplo, considerou-se um canal uniforme, com declive constante calculado com base nas cotas do perfil longitudinal nas secções de montante e jusante do troço de 4 km do Rio Lis considerado. No Quadro 11 apresentam-se os valores introduzidos no modelo para caracterizar o canal considerado.

Os valores do coeficiente de rugosidade de *Manning* ( $n$ ), dependem do tipo de solos e da cobertura vegetal, tendo-se considerado o valor de referência, que se considera ser conservativo, de  $0.04 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  para o leito do canal.

**Quadro 11 – Caracterização do canal. Modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: *lis.river*).**

Dados de entrada	Valores
<b>n - Coeficiente de rugosidade de Manning (<math>\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}</math>)</b>	0.04
<b>Caudal (<math>\text{m}^3/\text{s}</math>)</b>	789.80
<b>Largura das margens (m)</b>	Montante: 44 Jusante: 60
<b>Cotas de fundo das condições de fronteira do troço de 4 km do Rio Lis, entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca (m)</b>	Montante (ponte de Miguel): 1.67 Jusante (ponte da Bajanca): 0.65
<b>Caracterização do canal</b>	70 Nota: no ficheiro <i>river</i> introduzem-se as coordenadas x e y do ponto de cota mais baixa de cada secção transversal do canal. Neste caso, o levantamento foi efectuado para 70 secções transversais, de acordo com a Figura 15, obtendo-se assim um vector que representa o perfil longitudinal do canal.

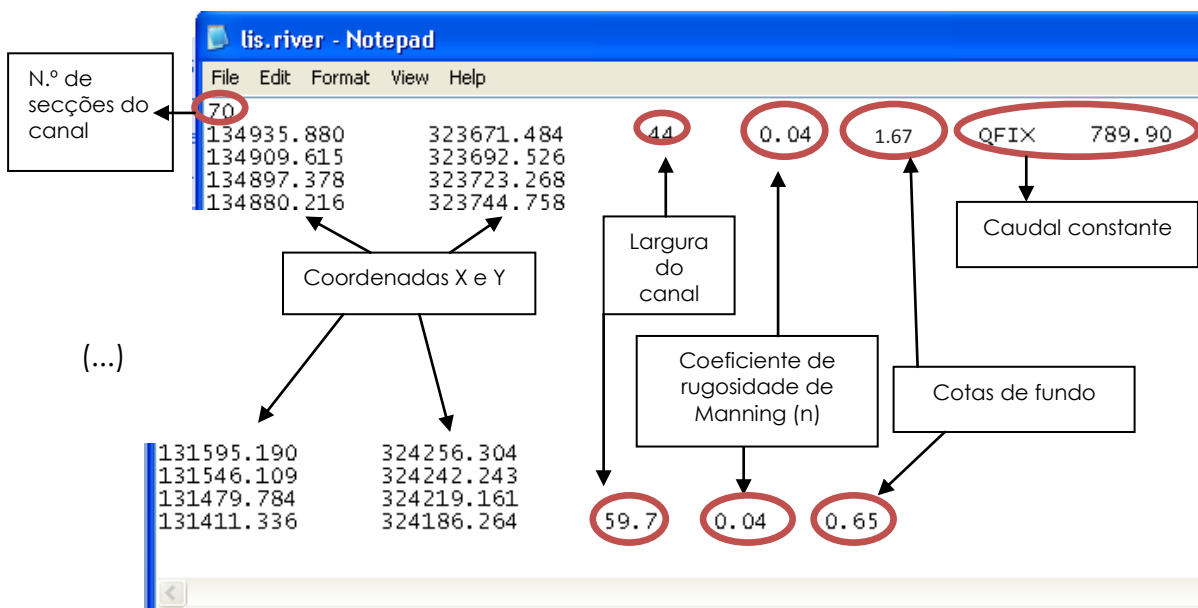
Na Figura 18 apresenta-se uma extracção da informação contida no ficheiro *river* aplicado no exemplo em estudo.

### iii. Condições de fronteira (ficheiro: *lis.bci*)

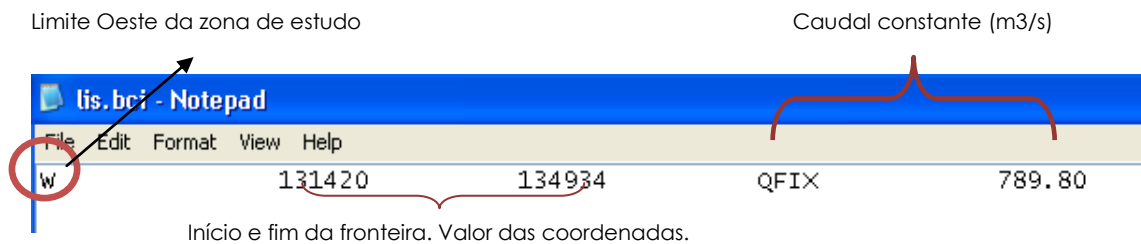
As condições de fronteira são introduzidas no modelo, através do ficheiro *lis.bci*. É necessário introduzir as coordenadas dos limites do canal e identificar o tipo de condição, definida através de uma das siglas, do Quadro 5 – Tipos de condições de fronteira, utilizadas no ficheiro com a extensão *.bci* do modelo hidráulico LISFLOOD-FP.

No caso específico deste estudo, considerou-se um caudal constante ( $Q_{FIX}$ ) e igual ao caudal de ponta de cheia.

Na Figura 19, apresentam-se os elementos que foram introduzidos no ficheiro *lis.bci*, aplicadas à zona em estudo.



**Figura 18 – Caracterização do canal – ficheiro: *lis.river* – Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP para o troço de 4 km do Rio Lis, entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca.**

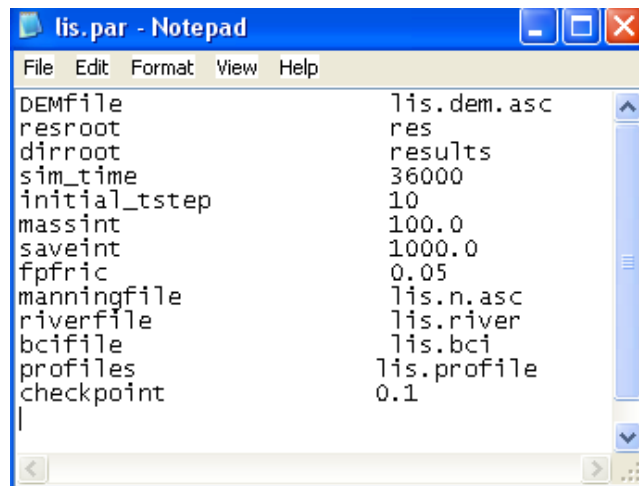


**Figura 19 – Condições de fronteira – ficheiro: *lis.bci* – Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP para o troço de 4 km do Rio Lis, entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca.**

#### iv. Parâmetros do modelo (ficheiro: *lis.par*)

O ficheiro *lis.par* define os parâmetros que serão usados pelo modelo hidráulico LISFLOOD-FP, ou seja, contém a informação necessária para fazer correr a simulação. Neste ponto apenas falaremos dos parâmetros utilizados no presente estudo.

Na Figura 20, são apresentados os parâmetros utilizados na aplicação do modelo hidráulico para o troço do Rio Lis considerado.



**Figura 20 – Parâmetros do modelo – ficheiro: *lis.par* – Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP para o troço de 4 km do Rio Lis, entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca.**

Notas da Figura 20:

1. *DEMfile* – é o ficheiro com o MDT no formato ascii;
2. *Resroot* – este parâmetro identifica os ficheiros com os resultados, à medida que a simulação decorre. Todos os ficheiro com os resultados apresentam o prefixo *.res*;
3. *Dirroot* – este parâmetro permite criar uma pasta onde são gravados os resultados, à medida que a simulação decorre;
4. *Sim\_time* – é o tempo de simulação. No caso deste exemplo considerou-se 10 horas, o valor é dado em segundos (s).
5. *Inicial\_tstep* – corresponde ao passo de cálculo, neste caso, são 10 segundos;
6. *Massint* – definição do intervalo de tempo, em segundos, no qual a informação do ficheiro *res.mass* é gravada na pasta dos resultados, no ponto 5.2.5, alínea i., falar-se-á neste ficheiro;
7. *Saveint* – este parâmetro define o intervalo, em segundos, no qual o ficheiro com os resultados é gravado na pasta *results*;
8. *Fpfriction* – Valor do coeficiente de rugosidade de Manning. No caso em estudo, considerou-se  $0.05 \text{ m}^{1/3}.\text{s}$  para as margens e  $0.04 \text{ m}^{1/3}.\text{s}$  para o leito menor;
9. *Manningfile* – ficheiro com a malha *raster* correspondente aos valores do coeficiente de rugosidade de Manning;
10. *Profiles* – Perfil da superfície livre para o tempo definido em *Saveint*;
11. *Riverfile* – é o nome do ficheiro que contém a geometria do canal e informação relativa às condições de fronteira;

- 
12. Bcfile – é o nome do ficheiro que identifica o tipo das condições de fronteira da zona de estudo;
  13. Checkpoint – é a palavra-chave utilizada pelo *software* que possibilita, no caso de algum problema durante a simulação, como por exemplo, o programa desligar-se ou bloquear, iniciar a simulação a partir do último *checkpoint*. O valor apresentado é o intervalo, em horas, para o qual o LISFLOOD-FP, no presente caso, gravou a última verificação.

### **5.2.5 Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP ao caso de estudo. Resultados e discussão**

Durante a simulação, o programa cria diversos ficheiros com os resultados obtidos. Os ficheiros com os dados de saída do modelo são gravados, na pasta *results*, para diferentes intervalos de tempo, segundo o indicado no ficheiro *lis.par*, como se pode ver, na Figura 20 atrás apresentada.

O modelo hidráulico LISFLOOD-FP cria diferentes tipos de dados de saída, os quais serão identificados e descritos nos parágrafos que se seguem para o caso do presente estudo.

#### **i. Ficheiro *res.mass* ou resultados da aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP**

O programa cria um ficheiro com informação detalhada sobre o desempenho do modelo. A informação contida no ficheiro é gravada segundo as indicações do ficheiro *lis.par*, (Figura 20), de acordo com o intervalo de tempo especificado pelo utilizador.

O Quadro 12 apresenta os valores finais obtidos, para esta simulação, incluindo os parâmetros resultantes do ficheiro *res.mass*, como sendo:

- o tempo, em segundos, para o qual os dados foram gravados, (*Time*);
- o passo de cálculo especificado pelo utilizador, (*Tstep*);
- o tempo mínimo relativo ao passo de cálculo determinado pelo *software*, durante a iteração, (*MinTstep*);
- o número de passos de cálculo desde o início da simulação, (*itCount*);
- a área inundada, (*Area*);
- o volume de água no domínio, (*Vol*);
- o caudal inicial, (*Qin*);

- a altura de água na secção mais a jusante, (*Hds*);
- o caudal calculado para a secção de referência, (*Qout*);
- o erro do balanço da massa para cada passo de cálculo, (*Qerror*);
- as perdas acumuladas devidas à infiltração durante a simulação.

O último parâmetro não foi considerado nesta simulação.

**Quadro 12 – Resultados obtidos através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: *lis.mass*).**

Parâmetros	Designação utilizada pelo software	Resultados
Tempo (s)	<i>Time</i>	36000.00
Passo de cálculo (s)	<i>Tstep</i>	10.00
Intervalo de tempo mínimo calculado pelo modelo durante a iteração	<i>MinTstep</i>	10.00
Número de iterações	<i>itCount</i>	3600
Área inundável (km <sup>2</sup> )	<i>Area</i>	3.66
Volume de água (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	<i>Vol,</i>	7.47
Caudal inicial (m <sup>3</sup> /s)	<i>Qin</i>	789.80
Altura de água na secção de referência (m)	<i>Hds</i>	7.62
Caudal na secção de referência (m <sup>3</sup> /s)	<i>Qout</i>	724.11
Erro associado ao balanço da massa (m <sup>3</sup> /s)	<i>Qerror</i>	-0.056

**ii. Alturas de água ao longo da simulação (ficheiros com o formato *.wd*).  
As unidades são em metros.**

Durante a simulação o *software* cria uma malha no formato *raster*, *ascii*, onde cada *pixel* contém um valor com a respectiva altura de água. No presente estudo, são apresentados 36 ficheiros com os valores das alturas de água, determinadas pelo *software*, para o passo de cálculo definido no ficheiro *lis.par*, segundo o valor indicado no parâmetro *saveint*, Figura 20.



---

**iii. Cotas de cheia (ficheiro: *res.mxe*) e alturas máximas da superfície livre (ficheiro: *res.max*). As unidades são em metros.**

Estes ficheiros consistem numa malha no formato *raster ascii*, onde cada *pixel* contém informação relativa às cotas de cheia (*res.mxe*) ou informação relativa às alturas de água (*res.max*), previstas pelo modelo, durante a simulação.

**iv. Resultados da zona inundável para o tempo inicial (ficheiro: *res.inittm*), total (ficheiro *res.totaltm*) e altura de água máxima (ficheiro: *res.maxtm*) obtida durante a simulação.**

Estes ficheiros consistem numa malha no formato *raster ascii*, onde cada *pixel* contém informação relativa à zona inundável para o tempo inicial, tempo total da inundaçãõ e alturas da superfície livre máximas obtidas.

Nota: Todos os resultados, alíneas ii a iv, são visualizados através de um *software SIG*, ou através da aplicação *FloodView* incluída na aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP. Esta informação está apresentada no Anexo IV.

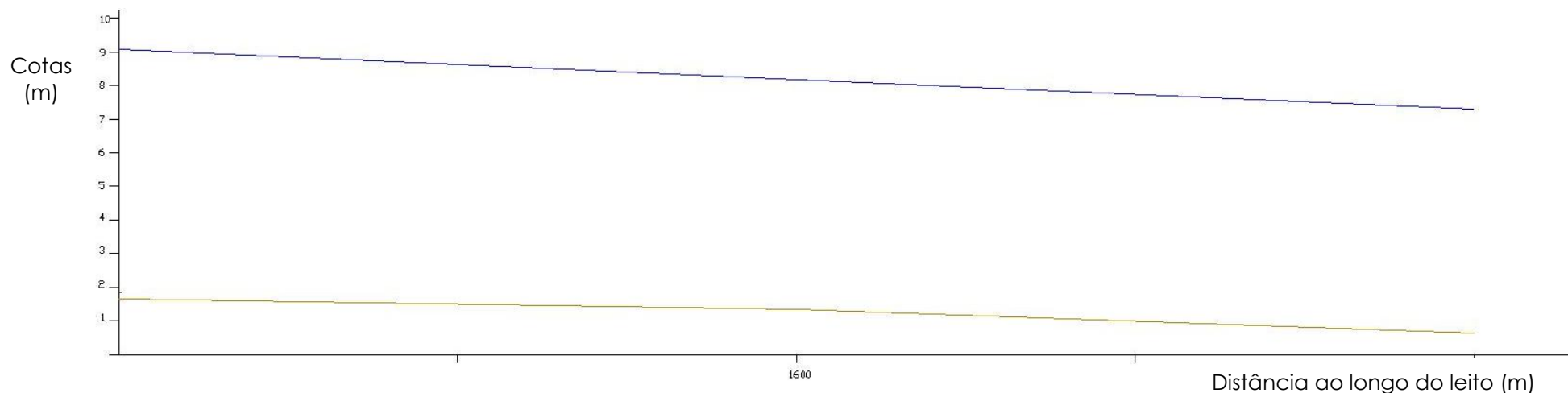
**v. Perfil da superfície livre (ficheiro: *res.profile*)**

Os valores do perfil da superfície livre são dados através de um ficheiro de formato de texto, Figura 21. O ficheiro contém um grande volume de informação e compreende quatro colunas. Na primeira, é apresentada a distância ao longo do talvegue, desde a secção de montante. Na segunda, são apresentados os valores das cotas do fundo do canal. Na terceira, a altura de água e, na quarta, o caudal. Todas as unidades são expressas em metros. O próprio *software* determina o declive do leito do canal, através da interpolação entre os valores das cotas da secção mais a montante e da secção mais a jusante do troço de 4 km em apreço, razão pela qual o leito é rectilíneo. Obteve-se o perfil da superfície livre apresentada na Figura 22.

Chainage	DEM Z	H	Q
Channel segment: 0			
0.00000	1.67000	9.76336	789.80011
27.01148	1.66300	9.70347	783.81677
46.11148	1.65805	9.66531	780.14020
73.12296	1.65105	9.62897	777.30505
100.13445	1.64405	9.59692	775.03296
127.14593	1.63705	9.57024	773.47168
146.24593	1.63210	9.54699	771.76782
173.25740	1.62510	9.52005	770.14923
200.26888	1.61810	9.49418	768.66351
227.28035	1.61110	9.47061	767.47754
246.38036	1.60615	9.45207	766.38391

Nota: Os resultados ilustrados dizem respeito apenas às primeiras 11 linhas do ficheiro *res.profile*.

**Figura 21 – Ficheiro *res.profile* da aplicação do modelo LISFLOOD-FP ao troço de 4 km do Rio Lis entre a secção da ponte de Miguel e da ponte da Bajanca.**



**Figura 22 – Perfil da superfície livre – ficheiro: *res.profile* – Aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP para o troço de 4 km do Rio Lis, entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca.**

---

No troço do Rio Lis em estudo existem três pontes, nomeadamente, no sentido de montante para jusante:

- a ponte de Miguel;
- a ponte da Junceira;
- a ponte da Bajanca.

Para as condições do regime de escoamento consideradas, que correspondem a um caudal constante e igual ao caudal de cheia,  $Q_p=789.80\text{m}^3/\text{s}$ , para um período de retorno,  $T=100$  anos, as referidas estruturas ficarão submersas, não existindo folga entre a superfície livre e os tabuleiros das pontes. No Quadro 13, são apresentados os valores da cota de fundo, as alturas de água e as cotas dos tabuleiros das pontes.

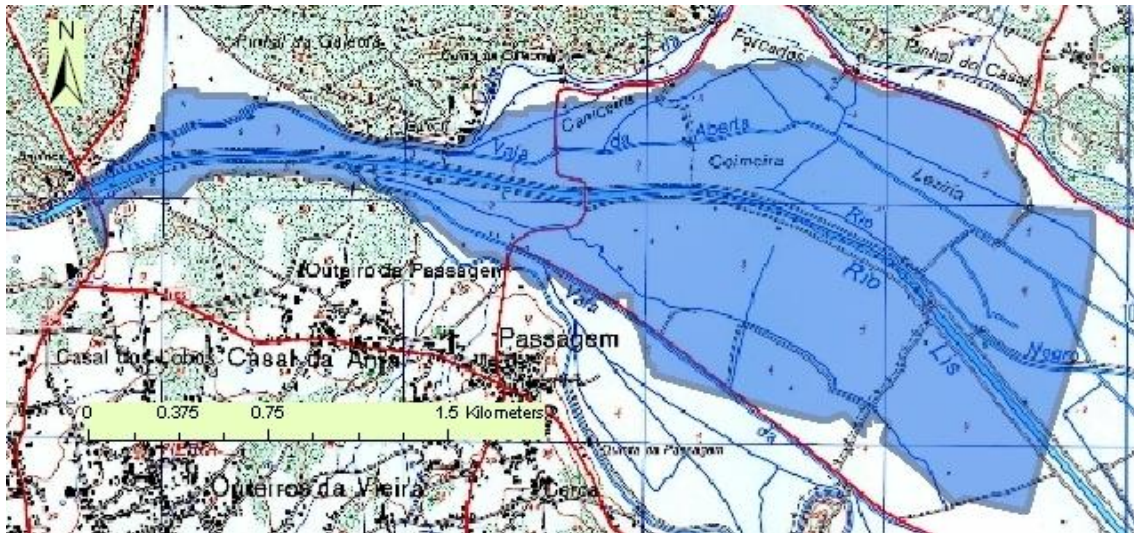
**Quadro 13 – Cotas do leito, cotas da cheia centenária, alturas de água e cotas dos tabuleiros, nas secções de inserção das pontes de Miguel, da Junceira e da Bajanca.**

<b>Estrutura</b>	<b>Cota do leito (m)</b>	<b>Cota da superfície livre (m)</b>	<b>Alturas de água (m)</b>	<b>Cota do tabuleiro (m)</b>
<b>Ponte de Miguel</b>	1.67	9.76	8.09	8.44
<b>Ponte da Junceira</b>	1.35	8.77	7.42	7.10
<b>Ponte da Bajanca</b>	0.65	7.62	6.97	5.58

### **Área inundável**

A zona inundável, para o troço de 4 km do Rio Lis entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca, é determinada com base nos elementos topográficos (o MDT), onde, durante a simulação, o programa preenche os pixéis da malha raster, com os valores respectivos das alturas de água e/ou cotas de cheia.

Na Figura 23, é representada a zona inundável, com uma área total de  $3.66\text{km}^2$ , sobreposta à cartografia militar.



**Figura 23 – Delimitação da zona inundável obtida através da aplicação do modelo LISFLOOD-FP para o troço do Rio Lis em estudo.**

### **5.3 Modelo HEC-RAS**

#### **5.3.1 Notas prévias sobre o modelo HEC-RAS, versão comercial do RIVERCAD-PRO**

No presente estudo foi aplicado o programa RIVERCAD-PRO, compatível com AUTOCAD e que utiliza como base de cálculo o modelo hidráulico HEC-RAS.

Como anteriormente referido, no ponto 2.5.2, o HEC-RAS – *River Analysis System* – é um modelo capaz de modelar o escoamento unidimensional em canais naturais e artificiais, permitindo o cálculo e análise hidráulica em regime permanente (uniforme e gradualmente variado), e em regime variável (Brunner, 2002).

O RIVERCAD-PRO foi desenvolvido para integrar todas as tarefas necessárias da modelação hidráulica efectuadas através do modelo HEC-RAS, de forma a permitir a análise dos perfis da superfície livre, em ambiente CAD. Todos os dados do modelo HEC-RAS (dados de entrada e de saída) são armazenados directamente num ficheiro de desenho CAD, não existindo assim a necessidade de se manterem ficheiros externos ao modelo (Boss-International, 2007).

O modelo RIVERCAD-PRO foi desenvolvido pela *BOSS-RMSTM*, (*River Modeling System*), e permite efectuar as tarefas que se listam, (Boss International, 2007):

- 
- definição das secções transversais, assim como todos os elementos topográficos (curvas de nível, MDT, dados importados dos modelos HEC-2 e/ou HEC-RAS);
  - definição das condições iniciais do perfil da superfície livre;
  - definição de zonas inundáveis, alterações da geometria das secções transversais do canal, caracterização da influência de estruturas, como sendo pontes, passagens hidráulicas, entre outros;

Após a correcta definição do modelo, é possível determinar não só o perfil da superfície livre da água como também a zona inundável.

O RIVERCAD-PRO inclui seis módulos de trabalho, respectivamente HEC-2; HEC-RAS; DAMBRK; *Floodplain Mapping*; DEM e GIS. Estes módulos podem ser independentes ou combinados e permitem o desenvolvimento de modelos hidráulicos que calculam o perfil da superfície livre da água. No presente trabalho, apresenta-se apenas aplicação do módulo HEC-RAS (Boss International, 2007).

### **5.3.2 Hipóteses simplificativas e limitações do modelo hidráulico HEC-RAS**

O modelo HEC-RAS é aplicado no mapeamento e delimitação das zonas inundáveis associados a diferentes períodos de retorno, como também, na determinação das respectivas superfícies livres da água (Brunner, 2002).

O HEC-RAS é um modelo unidimensional que permite simular o escoamento permanente e variável de uma linha de água a partir de cálculos hidráulicos. Foi projectado para um ambiente interactivo com múltiplas tarefas e múltiplos utilizadores. O sistema é composto pela utilização de uma relação gráfica que separa a análise das componentes hidráulicas, da capacidade de armazenamento, da gestão de dados, de gráficos e relatório de erros (Brunner, 2002).

O programa HEC-RAS é constituído por três componentes hidráulicas unidimensionais: (1) modelação do escoamento permanente; (2) modelação do escoamento variável; e (3) modelação do transporte de sedimentos, permitindo a utilização dos mesmos dados geométricos de representação e dos mesmos dados geométricos e hidráulicos para a resolução dos modelos numéricos pelas três componentes (Brunner, 2002).

---

O modelo permite a introdução de várias estruturas hidráulicas que poderão ser seleccionadas na simulação do perfil da superfície livre da água (Brunner, 2002).

Os gráficos gerados são concebidos a partir do próprio programa ou a partir da associação a outros *softwares*. Neste exemplo de estudo, o programa de desenho AUTOCAD é o ambiente de trabalho do modelo HEC-RAS, que serve de suporte a toda a análise hidráulica que seja necessária desenvolver, para o fim que se pretender.

Entre muitas aplicações práticas da modelação hidráulica efectuada através do modelo HEC-RAS, listam-se as principais:

- delimitação de zonas inundáveis,
- drenagem urbana,
- os impactos futuros da construção de urbanizações,
- projectos de sistemas de evacuadores,
- redução dos estragos causados pelas inundações
- regularização de linhas de água.

As limitações do modelo a destacar são:

- O campo da velocidade é unidimensional, o que significa que, os vectores velocidades das partículas, em cada posição da secção transversal são paralelos entre si, sendo esta uma hipótese simplificativa que não considera as componentes do campo de velocidades segundo as direcções perpendiculares no plano da secção transversal;
- A aplicação do modelo HEC-RAS não é apropriada quando a secção transversal apresenta irregularidades acentuadas, são exemplos disso, o caso de estuários, leitos maiores de rios de grandes dimensões, onde a aplicação de um modelo 2D é mais adequada.

### **5.3.3 Requisitos do modelo hidráulico HEC-RAS**

Como foi dito no ponto 5.3.1, o RIVERCAD-PRO utiliza o ambiente CAD como suporte de trabalho para a análise hidráulica que se pretende realizar.

No Quadro 14 apresentam-se os tipos de dados de entrada requeridos pelo *software* RIVERCAD-PRO, (Boss International, 2007).

**Quadro 14 – Dados de entrada do modelo HEC-RAS, (versão comercial do RIVERCAD-PRO).**

<b>Tipo de dados</b>	<b>Origem</b>	<b>Observações</b>
<b>Levantamento topográfico das secções transversais</b>	Levantamento de campo, (diversas escalas); Curvas de nível; MDT; Importação de ficheiros no formato HEC-2 e HEC-RAS.	Os dados do modelo são armazenados directamente no ficheiro CAD (.dwg). O RIVERCAD-PRO, através dos valores das cotas de cada secção transversal, traça, automaticamente os perfis transversais de cada secção do troço da linha de água considerado.
<b>Condições de fronteira</b>	Valores do caudal; curvas de vazão; altura da superfície da água; altura uniforme; altura crítica.	As condições de fronteira são definidas de acordo com o regime de escoamento a modelar. O RIVERCAD-PRO permite modelar o regime lento (condições de fronteira a jusante), o regime rápido (condições de fronteira a montante) e um regime "misto", designação do próprio software, para regimes de transição, quando é necessário caracterizar as condições de fronteira a montante e a jusante.
<b>Declive do canal</b>	Troço a troço, (distância entre duas secções transversais), o software calcula automaticamente a respectiva inclinação do canal.	-
<b>Comprimento entre secções transversais</b>	É necessário dar ao programa essa informação.	O comprimento entre secções do canal é introduzido, ou através de um valor, ou através de uma <i>polilíne</i> , desenhada em ambiente CAD.
<b>Rugosidade</b>	São caracterizadas a rugosidade do leito e das margens de cada secção transversal.	-
<b>Largura do canal</b>	São definidas duas estações, designação do próprio software para a separação do leito e das margens.	-
<b>Intervalo de tempo</b>	Automático	-

#### **5.3.4 Aplicação do modelo hidráulico HEC-RAS ao caso de estudo. Preparação dos dados de entrada**

A preparação dos dados de entrada no HEC-RAS é efectuada de forma simples, não sendo necessária a preparação prévia de tanta informação como nos capítulos referentes ao modelo LISFLOOD-FP.

---

Para a aplicação do HEC-RAS, foram fornecidos ao modelo o caudal de ponta de cheia, para T=100 anos, os valores do coeficiente de rugosidade de Manning e as condições de fronteira.

As secções transversais foram caracterizadas, uma a uma, de acordo com o levantamento topográfico do leito do canal. Após inserção dos elementos topográficos do leito da linha de água considerada, introduziu-se a informação relativa às linhas de escoamento (*flow path*) e, por último, introduziram-se as condições iniciais da simulação, Quadro 15.

**Quadro 15 – Dados de entrada introduzidos no modelo hidráulico HEC-RAS aplicados à zona de estudo.**

<b>Dados de entrada</b>	<b>Valores</b>
<b>Coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler (<math>m^{1/3}.s^{-1}</math>)</b>	Leito: 25 Margens: 20
<b>Caudal (<math>m^3/s</math>)</b>	789.80
<b>Condições de fronteira</b>	Caudal de ponta de cheia

### **5.3.5 Aplicação do modelo hidráulico HEC-RAS ao caso de estudo. Resultados e discussão**

Após a preparação dos dados de entrada, o modelo ficou pronto para a realização da sua simulação.

O HEC-RAS permite a visualização rápida dos resultados da análise hidráulica que se pretende efectuar, sendo possível obter o perfil da superfície livre e também os valores das características do escoamento simulado, através de tabelas, onde o utilizador selecciona os parâmetros que pretende estudar. A título de exemplo são apresentados, no Quadro 16, os resultados obtidos para as secções de atravessamento das pontes da Bajanca, da Junceira e de Miguel, de acordo com os parâmetros seleccionados:

- o caudal;
- as cotas do leito e da superfície livre;
- as alturas de água;
- a altura crítica para a secção mais a jusante;
- a energia, as velocidade do escoamento e o número de Froude.



**Quadro 16 – Resultados da aplicação do modelo hidráulico HEC-RAS para o troço de 4 km do Rio Lis, entre a secção da ponte de Miguel e da ponte da Bajanca.**

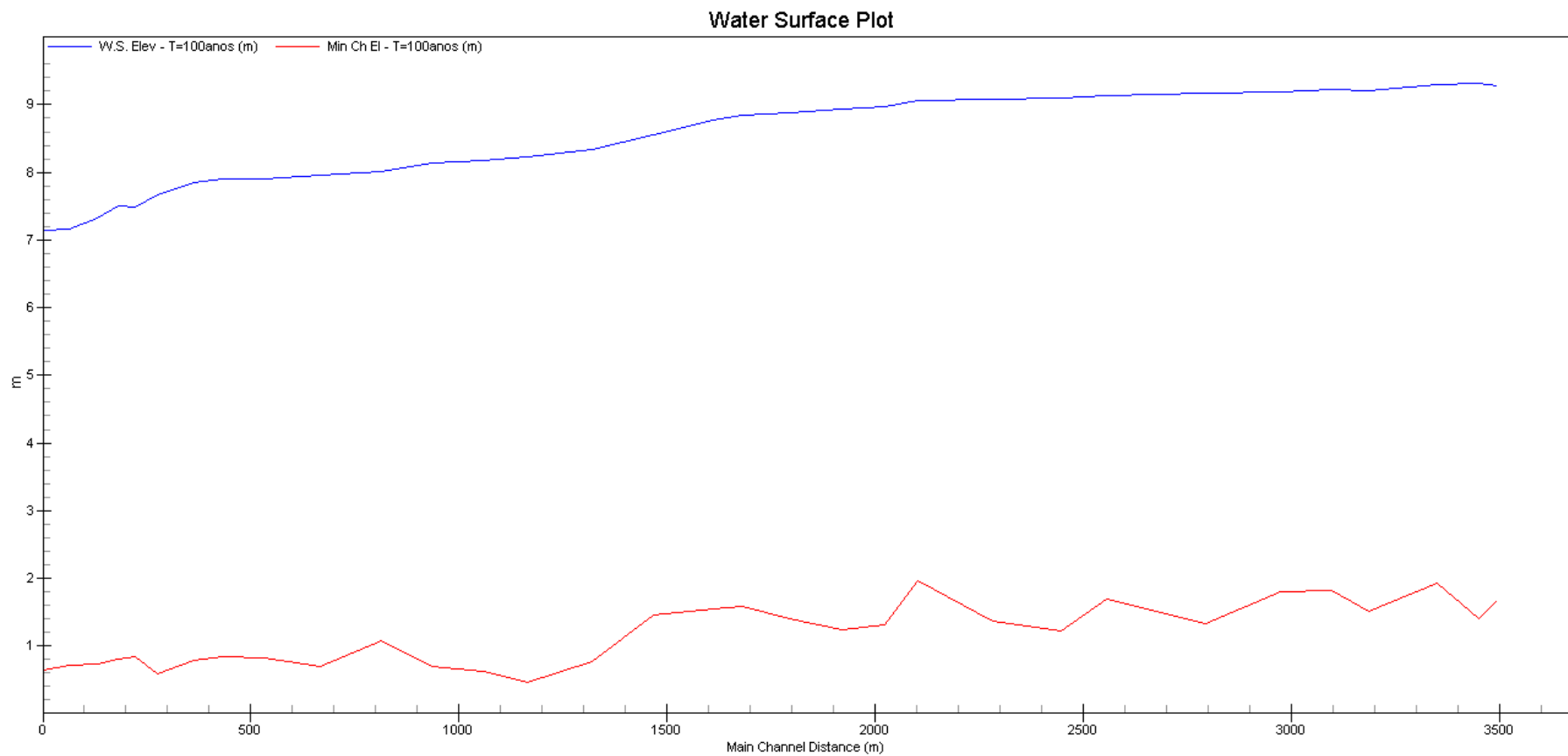
Secção Transversal	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	Cota do leito do canal (m)	Cota da superfície livre (m)	Altura de água (m)	Altura crítica (m)	Energia (m)	Velocidade (m/s)	N.º de Froude
Ponte de Miguel	789.80	1.67	9.28	7.61		9.51	2.39	0.34
Ponte da Junceira	789.80	1.35	9.05	7.70		9.07	0.85	0.11
Ponte da Bajanca	789.80	0.65	7.15	6.50	4.07	7.45	2.45	0.34

Para as condições de regime de escoamento consideradas, caudal de ponta de cheia,  $Q_p=789.80$  m<sup>3</sup>/s, para um período de retorno,  $T=100$  anos, as passagens superiores (pontes de Miguel, Junceira e Bajanca) ficarão submersas, não existindo folga entre a superfície livre e os tabuleiros das pontes, anteriormente referidas. No Quadro 17 são apresentados os valores das cotas de fundo do canal, as cotas da superfície livre, as alturas de água e as alturas dos tabuleiros das referidas pontes.

**Quadro 17 – Cotas do leito, cotas da cheia centenária, alturas de água e cotas dos tabuleiros, nas secções de inserção das pontes de Miguel, da Junceira e da Bajanca. Aplicação do modelo hidráulico HEC-RAS.**

Estrutura	Cota do leito (m)	Cota da superfície livre (m)	Alturas de água (m)	Cota do tabuleiro (m)
Ponte de Miguel	1.67	9.28	7.61	8.44
Ponte da Junceira	1.35	9.05	7.70	7.10
Ponte da Bajanca	0.65	7.15	6.50	5.58

Na Figura 24 é apresentado o perfil da superfície livre com as respectivas cotas da superfície livre.

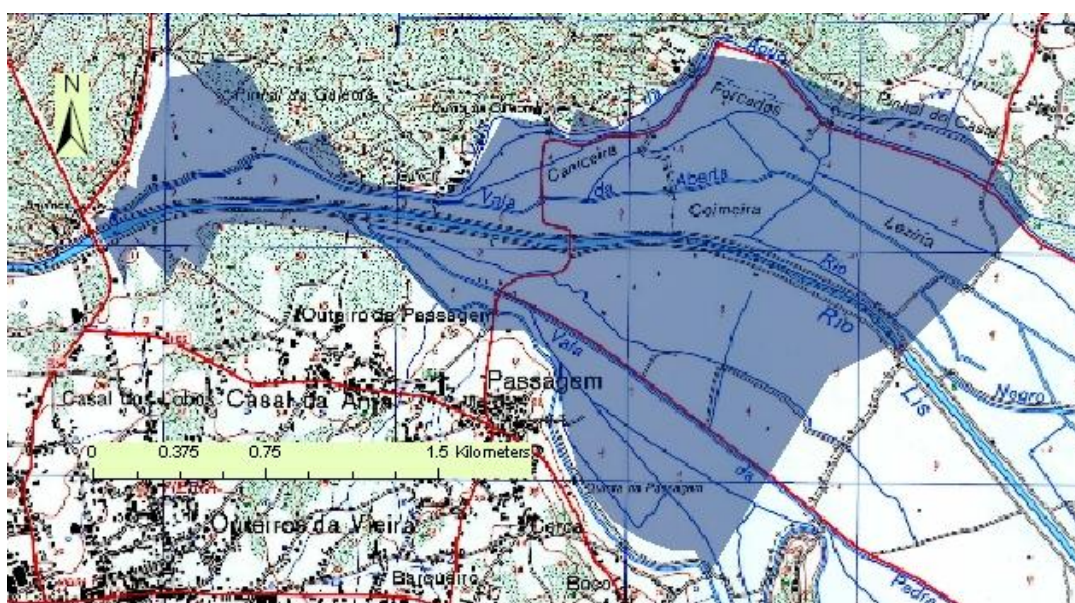


**Figura 24 – Perfil da superfície livre. Aplicação do modelo hidráulico HEC-RAS para o trecho de 4 km do Rio Lis entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca.**

---

## Área inundável

Com o perfil da superfície livre ao longo do trecho considerado, atendendo ao volume afluente, proveniente da bacia hidrográfica do Rio Lis, para um período de retorno igual a 100 anos é gerada a superfície livre de escoamento, com base nos elementos topográficos disponíveis (como anteriormente referidos, levantamento do leito da linha de água e altimetria à escala 1/25 000). Após criada a área de inundação, o RIVERCAD-PRO gera uma série de ficheiros no formato *shapefile*, o que possibilita a sobreposição da zona inundável, sobre a informação cartográfica disponível, permitindo a sua visualização em ambiente SIG. Na Figura 25 é apresentada a área inundável,  $A= 3.90 \text{ km}^2$ , sobreposta à cartografia militar.



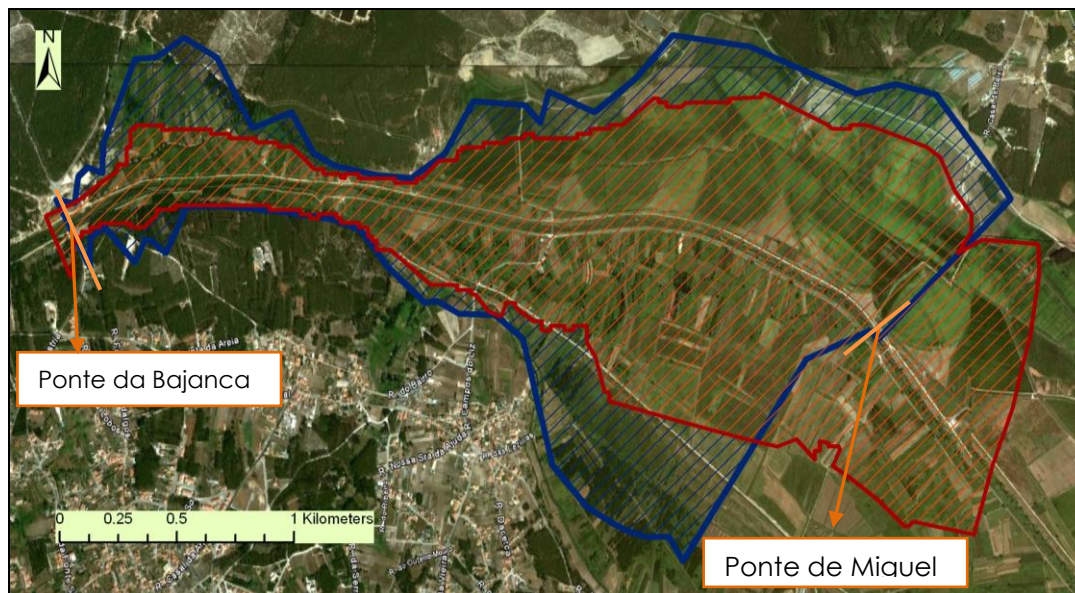
**Figura 25 – Delimitação da zona inundável obtida através da aplicação do modelo HEC-RAS para o trecho de 4 km do Rio Lis em estudo.**

## **5.4 – Comparação dos resultados**

Neste subcapítulo são comparados os resultados obtidos através dos modelos LISFLOOD-FP e HEC-RAS.

Em primeiro lugar, comparar-se-ão as áreas de inundação, com especial atenção aos limites da zona de inundação obtidos para um período de retorno de 100 anos, através dos dois modelos hidráulicos analisados. Na Figura 26 é apresentada a delimitação das zonas de inundação obtidas através dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS.

Em segundo lugar, serão comparadas as alturas de água para as secções de maior relevância na zona de estudo, designadamente as pontes da Bajanca, da Junceira e de Miguel, determinadas através dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS e apresentadas no Quadro 19.



**Figura 26 – Comparação das zonas inundáveis determinadas através dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e RIVERCAD-PRO.**

É possível observar na Figura 26 que, as zonas de inundação obtidas através dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS, são significativamente diferentes, não só na área de inundação,  $3,66 \text{ km}^2$  e  $3,90 \text{ km}^2$ , apresentando uma diferença de  $0,24 \text{ km}^2$ , mas também na forma dos limites da zona de inundação. Esta desigualdade poderá estar relacionada com as diferentes metodologias de cálculo utilizadas por cada um dos modelos. Verifica-se que com o mesmo tipo de dados de entrada, especificamente, a informação relativa ao terreno, o levantamento batimétrico e as secções transversais do troço considerado, são obtidos resultados diferentes, através da aplicação dos modelos LISFLOOD-FP e HEC-RAS. Atendendo aos pressupostos do LISFLOOD-FP, o modelo, utiliza a equação 1D da onda cinemática para a representação do escoamento no leito menor acoplado a um modelo 2D de propagação da onda de cheia para a simulação do escoamento no leito maior. Enquanto que, o HEC-RAS é um modelo 1D, não sendo o mais adequado para a simulação do escoamento no leito maior.

Um dos pontos fortes do modelo LISFLOOD-FP é o MDT, o que caracteriza este programa, como sendo de base *raster*, permitindo uma maior precisão na

---

descrição dos elementos topográficos da zona em estudo e ainda a possibilidade de representação bidimensional do escoamento, ao longo da malha *raster*, fora do leito menor.

Como já foi referido, o programa LISFLOOD-FP, determina o escoamento no leito maior através das equações da continuidade e da quantidade de movimento, discretizando-as através das células da malha *raster*. O que permite a representação bidimensional do escoamento (Figura 1) através do conceito do armazenamento da célula (*storage cell concept*, exemplificado na Figura 16) permitindo assim, a solução aproximada da onda de difusão da cheia, em duas dimensões.

Por outro lado, o modelo HEC-RAS é unidimensional, o que permite a determinação das alturas de água em cada secção ao longo do troço considerado e a delimitação da zona inundável é efectuada através da união dos pontos que correspondem à vertical da secção que apresenta as alturas de água determinadas nessa secção.

O resultado da modelação com a aplicação do programa LISFLOOD-FP, mostra que a área de inundação simulada pelo *software* ultrapassa os limites das secções definidas a montante e a jusante, as pontes de Miguel e da Bajanca, respectivamente. Verifica-se que, com base na cota da superfície livre nas secções de fronteira do troço, o modelo cria uma zona inundada adicional correspondente à intersecção entre o plano horizontal para a cota em cada secção de fronteira e o MDT.

Tal acontece porque a base do modelo LISFLOOD-FP é o MDT, o que permite ao programa calcular as alturas de água ao longo da malha *raster*, célula a célula, através da metodologia apresentada na Figura 16, designada por *storage cell concept*.

Através da análise do Quadro 18, verifica-se que as diferenças obtidas para as alturas de água nas secções transversais escolhidas são da ordem dos 50 e 30 cm nas secções das pontes da Bajanca, Miguel e Junceira, respectivamente.

---

**Quadro 18 – Resultados obtidos através da aplicação dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS: Alturas de água obtidas para as secções das pontes de Miguel, Junceira e da Bajanca do troço do Rio Lis em estudo.**

<b>Estrutura</b>	<b>Cota do leito (m)</b>	<b>Alturas de água (m) – LISFLOOD-FP</b>	<b>Alturas de água (m) – HEC-RAS</b>	<b>Diferença (m)</b>	<b>Diferença (%)</b>
<b>Ponte de Miguel</b>	1.67	8.09	7.61	0.48	6.31
<b>Ponte da Junceira</b>	1.35	7.42	7.70	0.28	3.77
<b>Ponte da Bajanca</b>	0.65	6.97	6.50	0.47	7.23

---

## 6. Avaliação do risco de inundação

### 6.1 Introdução

A avaliação do risco de inundação surge no âmbito legal nacional, através do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro como medida de prevenção do risco associado a inundações, e de redução das suas consequências negativas para a comunidade.

Neste capítulo, atendendo ao Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro far-se-á uma análise da avaliação do risco de inundação, segundo o exposto nos Artigos 7º e 8º do referido documento, para cada um dos resultados obtidos através dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS.

A avaliação do risco de inundação efectuada no presente estudo, diz respeito, segundo a classificação do Artigo 7º do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro, relativo às cartas de zonas inundáveis, a uma inundação de média probabilidade de ocorrência, ou seja, classificação utilizada no caso de períodos de retorno iguais ou superiores a 100 anos. No presente estudo o período de retorno considerado é  $T=100$  anos.

Segundo o Artigo 7º, existem três cenários que deverão constar, nas cartas de zonas inundáveis para áreas de risco, nomeadamente:

- Inundação de baixa probabilidade de ocorrência;
- Inundação de média probabilidade de ocorrência, que corresponde a períodos de retorno iguais ou superiores a 100 anos;
- Inundação de alta probabilidade de ocorrência, períodos de retorno inferiores a 100 anos.

Ainda, de acordo com o referido Artigo, para cada um dos cenários é preciso indicar os elementos que se listam:

- Extensão da inundação;
- Profundidades de água, cotadas topograficamente;
- Caudal de cheia.

---

Cada um dos cenários deverá ser analisado nos termos do Artigo 8º do referido Decreto-Lei, referente aos conteúdos das cartas de risco de inundação, passando a citar aqueles que importam ao presente trabalho:

- *“Número indicativo de habitantes potencialmente afectados”;*
- *“Edifícios sensíveis”;*
- *“Tipo de actividade económica da zona potencialmente afectada, nomeadamente actividades agrícolas, industriais e serviços considerados fundamentais, (...) e património cultural nacional e mundial”;*
- *“Instalações referidas no anexo I do Decreto-Lei n.º 173/2008, de 26 de Agosto, que possam causar poluição accidental em caso de inundações”;*
- *“Estabelecimentos abrangidos pelo Decreto-Lei n.º 254/2007, de 12 de Julho, que estabelece o regime de prevenção de acidentes graves que envolvam substâncias perigosas (...).”*

No presente estudo apenas analisaremos o cenário de inundação de média probabilidade de ocorrência. No subcapítulo 6.2 são apresentados os elementos de ocupação do solo presentes na zona de estudo e identificados no local.

## **6.2 Caracterização da ocupação da área inundada**

No local foram levantados os elementos mais representativos da ocupação do solo nas áreas inundáveis obtidas através dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS. Na Figura 27 é apresentada a localização desses elementos, que possam ser abrangidos pelo Artigo 7.º do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro. Com base nos dados apresentados será avaliado o risco de inundação e apresentado nos subcapítulos 6.3 e 6.4.

O troço do Rio Lis em estudo localiza-se entre a ponte de Miguel e a ponte da Bajanca, a cerca de 3 km da foz. As povoações mais próximas são no limite Sul, Vieira de Leiria, com população residente de cerca de 5781 habitantes (Censos de 2001) e no limite Norte, Coimbrão, com população residente de cerca de 1545 habitantes (Censos de 2001).



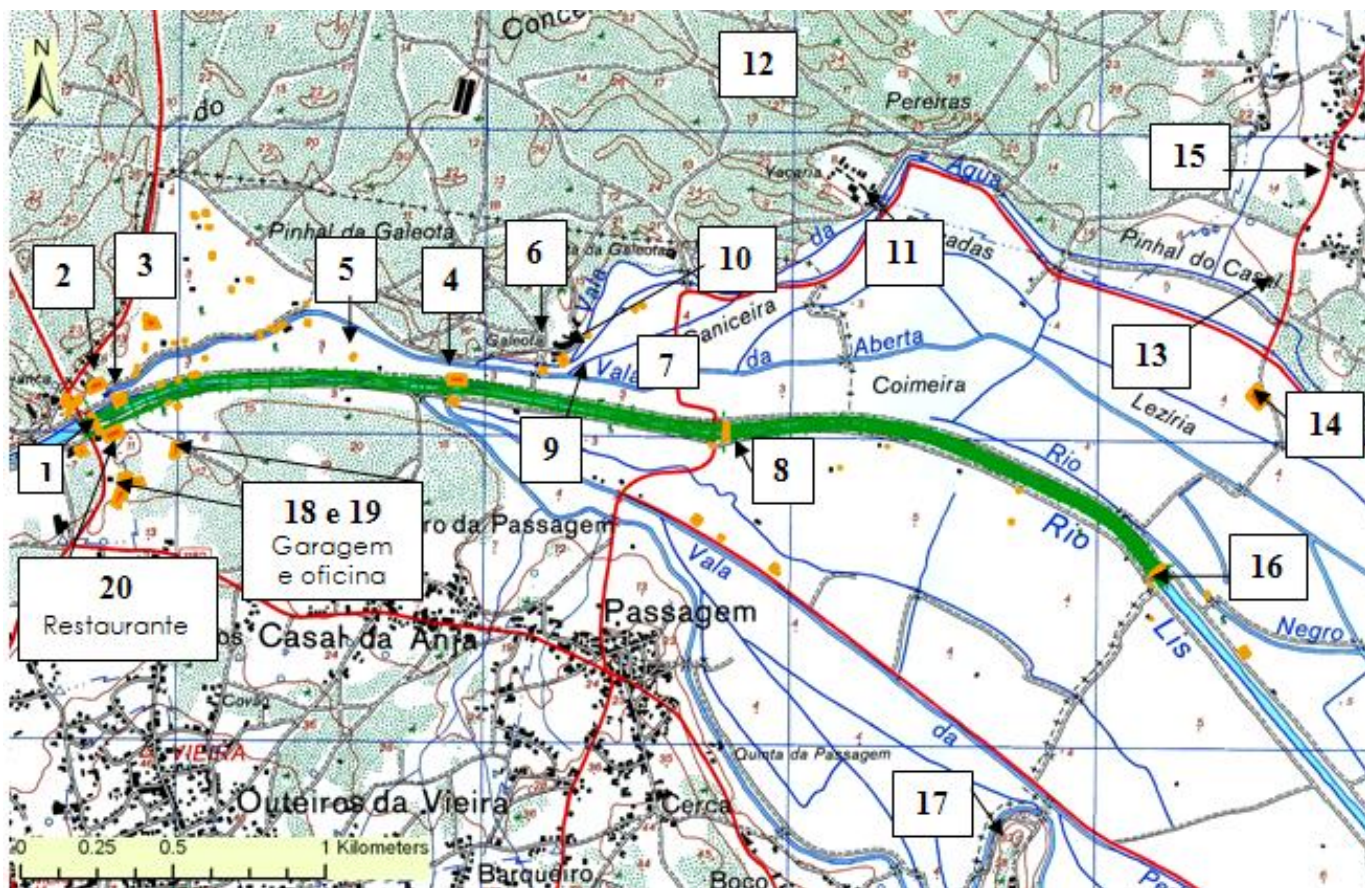


Figura 27 – Levantamento de campo.

Os locais identificados Figura 27, são:

1. Ponte da Bajanca. Vista para jusante e montante, Figura 28 e 29;
2. Lar de Idosos, Figura 30;
3. Estação de bombagem, Figura 31;
4. Estação de bombagem, Figura 32
5. Telheiro, Figura 33;
6. Casas de habitação, Figura 34;
7. Campos agrícolas 35;
8. Ponte da Junceira. Vista para jusante e montante, Figura 36 e 37;
9. Canal de rega, Figura 38;
10. Quinta, Figura 39;
11. Exploração agrícola, Figura 40;
12. SimLis. ETAR, Figura 41;
13. Estufa, Figura 42;
14. Ruínas/ Vacaria, Figura 43;
15. Casas de habitação, Figura 44;
16. Vacaria, Figura 45;
17. Ponte da Miguel. Vista para jusante e montante, Figura 46 e 47.



Figura 28 – Ponte da Bajanca, jusante.



Figura 29 – Ponte da Bajanca, montante.



Figura 30 – Lar de idosos.



Figura 31 – Estação de bombagem.



Figura 32 – Estação de bombagem.



Figura 33 – Telheiro.



Figura 34 – Casas de habitação.



Figura 35 – Campos agrícolas.



Figura 36 – Ponte da Junceira, jusante.



Figura 37 – Ponte da Junceira, montante.



Figura 38 – Canal de rega.



Figura 39 – Quinta.



Figura 40 – Exploração Agrícola.



Figura 41 – SimLis. ETAR.



Figura 42 – Estufa.



Figura 43 – Ruínas/ Vacaria.



Figura 44 – Casas de habitação.



Figura 45 – Vacaria.



Figura 46 – Ponte de Miguel, jusante.



Figura 47 – Ponte de Miguel, montante.

---

### **6.3 Elementos de ocupação do solo susceptíveis à inundação de média probabilidade de ocorrência determinada através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP.**

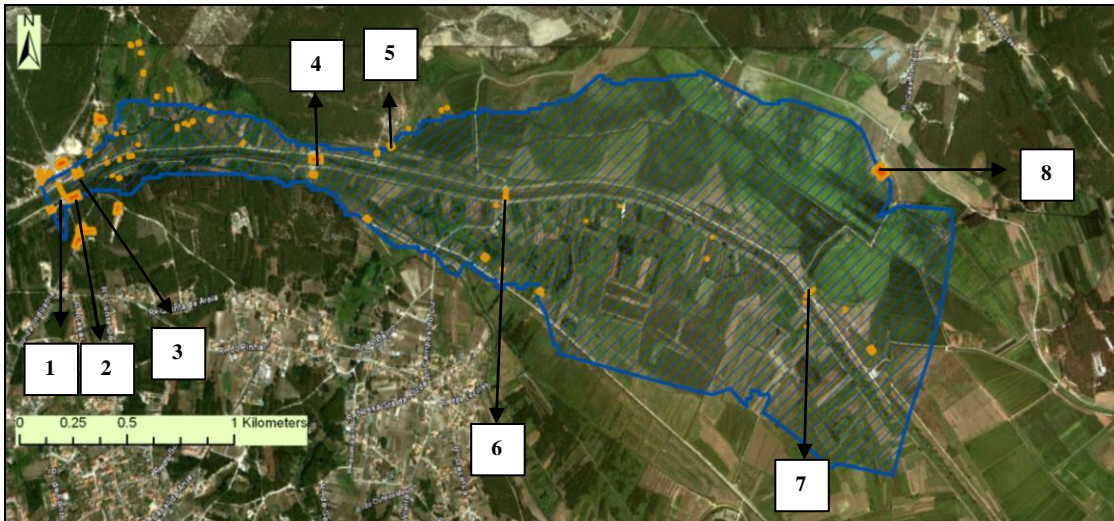
Após a delimitação da zona de inundação obtida através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP e, adicionando-se ainda a informação recolhida no terreno, Figura 27, foi possível identificar quais os elementos que são susceptíveis à inundação simulada através do modelo LISFLOOD-FP, para um período de retorno de 100 anos, conforme Artigos 7.º e 8.º do Decreto-Lei n.º 115/2020, de 22 de Outubro.

Os aspectos considerados de risco para a zona em estudo são os apresentados no Quadro 19.

**Quadro 19 – Elementos de ocupação do solo susceptíveis à inundação de média probabilidade de ocorrência determinada através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP.**

<b>Aspectos analisados, incluindo os considerados no Artigo 8º do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 20 Outubro</b>	<b>Resultados obtidos através da aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP</b>
<b>N.º de habitantes</b>	Não foi determinado.
<b>Estruturas*</b> <small>* São consideradas estruturas, todo o tipo de elementos levantados durante a visita ao local, que ocupam a zona inundável, incluindo as construções vistas através do <i>Google-Earth</i> e os edifícios sensíveis definidos segundo o Decreto-Lei n.º 115/010, de 20 de Outubro.</small>	48
<b>Edifícios sensíveis</b>	Nenhum.
<b>Tipo de actividade económica</b>	Agricultura
<b>Tipo de infra-estruturas rodoviárias</b>	Três pontes
<b>Instalações referidas no anexo I do Decreto-Lei n.º 173/2008, de 26 de Agosto</b>	Não se aplica
<b>Estabelecimentos abrangidos pelo Decreto-Lei n.º 254/2007, de 12 de Julho</b>	Não se aplica

Através do Quadro 19 e da Figura 48 da página seguinte é possível afirmar que, para a modelação efectuada através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, a zona inundável obtida abrange, segundo o exposto no Artigo 8.º do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro, campos agrícolas e 48 construções, onde se incluem, duas estações de bombagem, casas de habitação, ruínas, telheiros e três estruturas rodoviárias, designadamente a ponte da Bajanca, da Junceira e de Miguel.



**Figura 48 – Vista em planta da zona inundável obtida para a simulação efectuada através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP. Fotografia do Google-Earth.**

**Legenda:**

- 1 – Ponte da Bajanca;
- 2 – Restaurante;
- 3 – Estação de bombagem;
- 4 – Estação de bombagem;
- 5 – Quinta;
- 6 – Ponte da Junceira;
- 7 – Ponte de Miguel;
- 8 – Ruínas, vacaria/ palheiro.

**6.4 Elementos de ocupação do solo, susceptíveis à inundação de média probabilidade de ocorrência, determinada através do modelo hidráulico HEC-RAS.**

Após a delimitação da zona de inundação obtida através do modelo hidráulico HEC-RAS e sobrepondo a informação recolhida no terreno, Figura 27, foi possível identificar quais os elementos que são susceptíveis à inundação simulada no presente estudo, para um período de retorno de 100 anos, de acordo com os Artigos 7.º e 8.º do Decreto-Lei n.º 115/2020, de 22 de Outubro

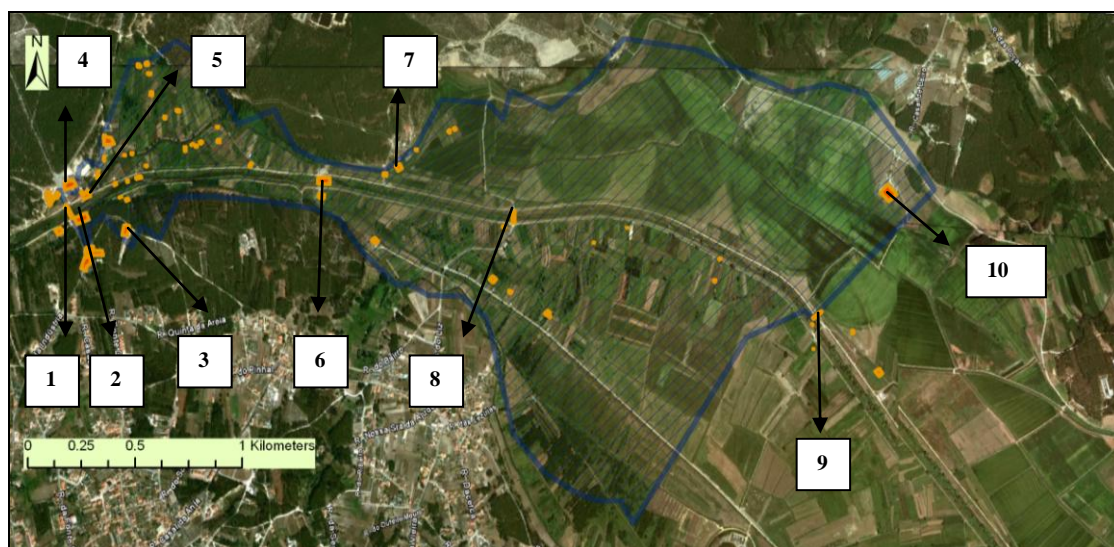
Os aspectos considerados de risco para a zona em estudo são os apresentados no Quadro 20.

Através do Quadro 20 e da Figura 49 é possível afirmar que, para a modelação efectuada através do modelo hidráulico HEC-RAS, a zona inundável obtida abrange, segundo o exposto no Artigo 8.º do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 20 de Outubro, campos agrícolas e 52 construções, onde se

incluem, 2 tipos de edifícios sensíveis nomeadamente uma garagem/ oficina e um lar de idosos e ainda um restaurante, duas estações de bombagem, casas de habitação, ruínas, telheiros, campos agrícolas e três estruturas rodoviárias, designadamente a ponte da Bajanca, da Junceira e de Miguel.

**Quadro 20 – Elementos da ocupação susceptíveis à inundação de média probabilidade de ocorrência determinada através do modelo hidráulico HEC-RAS.**

Aspectos analisados, incluindo os considerados no Artigo 8º do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 20 Outubro	Resultados obtidos através da aplicação do modelo hidráulico HEC-RAS
<b>N.º de habitantes</b>	Não foi determinado.
<b>Estruturas*</b> * São consideradas estruturas, todo o tipo de elementos levantados durante a visita ao local, que ocupam a zona inundável, incluindo as construções vistas através do Google-Earth e os edifícios sensíveis definidos segundo o Decreto-Lei n.º 115/010, de 20 de Outubro.	52
<b>Edifícios sensíveis</b>	Lar de idosos, Garagem/oficina.
<b>Tipo de actividade económica</b>	Agricultura
<b>Tipo de infra-estruturas rodoviárias</b>	Três pontes
<b>Instalações referidas no anexo I do Decreto-Lei n.º 173/2008, de 26 de Agosto</b>	Não se aplica
<b>Estabelecimentos abrangidos pelo Decreto-Lei n.º 254/2007, de 12 de Julho</b>	Não se aplica



**Figura 49 – Vista em planta da zona inundável obtida para a simulação efectuada através do modelo hidráulico HEC-RAS. Fotografia do Google-Earth.**

**Legenda:**

- 1 – Ponte da Bajanca;
- 2 – Restaurante;
- 3 – Garagem/ oficina;
- 4 – Lar de idosos;
- 5 – Estação de bombagem;
- 6 – Estação de bombagem;

- 7 – Quinta;
- 8 – Ponte da Junceira;
- 9 – Ponte de Miguel;
- 10 – Ruínas, vacaria/ palheiro.

### 6.5 Comparação dos resultados obtidos: LISFLOOD-FP e HEC-RAS

Pretende-se neste ponto comparar os resultados obtidos através dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS e apresentados no Quadro 21.

Os resultados indicam que a simulação efectuada através do modelo hidráulico HEC-RAS é a mais desfavorável, atendendo às zonas susceptíveis de risco de inundação, uma vez que a extensão de inundação obtida através do modelo HEC-RAS é superior à obtida através do modelo LISFLOOD-FP, apresentando mais estruturas abrangidas pela inundação.

Da análise do Quadro 21, é possível afirmar que a zona inundável do modelo HEC-RAS abrange 52 construções, das quais 2 são consideradas edifícios sensíveis, enquanto que, a zona inundável determinada através do programa LISFLOOD-FP, não atinge nenhum dos edifícios referidos.

**Quadro 21 – Comparação dos resultados obtidos através dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS na avaliação do risco de inundação do troço de 4 km do Rio Lis em análise.**

Aspectos analisados	Resultados obtidos através da aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP	Resultados obtidos através da aplicação do modelo hidráulico HEC-RAS
<b>N.º de habitantes</b>	Não foi determinado.	Não foi determinado.
<b>Estruturas*</b> * São consideradas estruturas, todo o tipo de elementos levantados durante a visita ao local, que ocupam a zona inundável, incluindo as construções vistas através do Google-Earth e os edifícios sensíveis definidos segundo o Decreto-Lei n.º 115/010, de 20 de Outubro.	48	52
<b>Edifícios sensíveis</b>	Nenhum.	Lar de idosos, Garagem/oficina.
<b>Tipo de actividade económica</b>	Agricultura	Agricultura
<b>Tipo de infra-estruturas rodoviárias</b>	Três pontes	Três pontes
<b>Instalações referidas no anexo I do Decreto-Lei n.º 173/2008, de 26 de Agosto</b>	Não se aplica	Não se aplica
<b>Estabelecimentos abrangidos pelo Decreto-Lei n.º 254/2007, de 12 de Julho</b>	Não se aplica	Não se aplica

---

## 7. Conclusões, limitações e trabalhos futuros

### 7.1 Conclusões

- A aplicabilidade dos modelos hidráulicos é vasta, tendo-se verificado que para os seis modelos apresentados: FLO-2D, HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAC-2D, TUFLOW e SOBEK, o âmbito geral de aplicação é a delimitação de zonas inundáveis e a determinação das respectivas áreas de inundação, independentemente das características específicas de cada modelo;
- Segundo a bibliografia consultada, os modelos 2D são mais adequados à simulação do escoamento do leito maior do que os modelos 1D;
- O exemplo de aplicação do capítulo 2.2.4. demonstrou que, através da modelação 2D é possível o conhecimento mais detalhado do comportamento do escoamento do leito maior de uma determinada linha de água, não sendo possível o mesmo grau de detalhe, através da modelação 1D;
- Os modelos de base *raster*, de acordo com a bibliografia consultada, apresentam vantagens sobre os que não o são, uma vez que, o terreno pode ser representado com mais rigor e precisão e, conseqüentemente os resultados poderão estar mais próximos da realidade;
- Segundo o exemplo de aplicação do capítulo 2.2.2, existe uma relação directa entre a resolução da malha *raster* de um MDT e os resultados obtidos na delimitação de zonas inundáveis;
- O limite definido por essa área de inundação permite avaliar o risco de inundação;
- Com a delimitação da zona inundável do troço de 4 km do Rio Lis, através dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS, concluiu-se que a área de inundação obtida através do segundo modelo é superior em relação ao primeiro, obtendo-se os valores 3.66 km<sup>2</sup> e 3.90 km<sup>2</sup>, respectivamente;



- 
- A diferença obtida na delimitação da zona de inundação através dos modelos LISFLOOD-FP e HEC-RAS deve-se principalmente a cinco aspectos intrínsecos aos *softwares*:
    - i. O modelo LISFLOOD-FP é um modelo de base *raster* que permite caracterizar o terreno com rigor;
    - ii. O modelo LISFLOOD-FP possibilita a modelação bidimensional do escoamento no leito maior;
    - iii. O modelo HEC-RAS é um modelo unidimensional que calcula a altura de água, de secção em secção transversal, ao longo de um determinado troço considerado;
    - iv. O modelo HEC-RAS utiliza as secções transversais e as linhas de percurso do escoamento para a descrição da geometria do canal;
    - v. No modelo HEC-RAS, o campo de velocidades é 1D, o que significa que os vectores das velocidades são paralelos entre si, em cada posição da secção transversal.
  - Com base nos resultados obtidos e atendendo aos pressupostos do ponto anterior, através da aplicação do modelo LISFLOOD-FP foi possível obter-se resultados mais rigorosos em termos da extensão da inundação, como se pode observar na Figura 26, a forma da área de inundação acompanha o terreno, por outro lado, no modelo HEC-RAS a zona inundável apresenta linhas mais rectas, observando-se algum afastamento à realidade;
  - Verifica-se que, para o caso de estudo, os valores das alturas de água obtidos através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, para as secções das pontes de Miguel e da Bajanca são superiores aos valores obtidos através da aplicação do programa HEC-RAS, cerca de 50 cm e, que, na secção da ponte da Junceira, as alturas de água obtidas através do programa LISFLOOD-FP são inferiores aos valores obtidos, através do modelo hidráulico HEC-RAS, cerca de 30 cm;
  - De acordo com os valores das alturas de água obtidos, para as secções das pontes de Miguel, da Junceira e da Bajanca, estima-se que, para o
-

---

período de retorno,  $T=100$  anos, as referidas estruturas poderão ficar submersas;

- O número de elementos de ocupação do solo afectados, tendo em conta a área de inundação obtida através do *software* HEC-RAS, é 52, enquanto que, para a área inundada obtida através do *software* LISFLOOD-FP, o número de elementos é igual a 48;
- Não se verificou a afectação de edifícios sensíveis para a zona inundável obtida através do *software* LISFLOOD-FP, no entanto, através do *software* HEC-RAS verifica-se a afectação do lar de idosos, situado junto à margem direita do Rio Lis, na secção da ponte da Bajanca e ainda, uma garagem/oficina de automóveis junto à margem esquerda, pela extensão da inundação.

## **7.2 Limitações do presente estudo**

- Durante a realização do presente estudo foi notória a dificuldade encontrada quando se pretendeu recolher informação relativa ao registo de cheias e/ou inundações que ocorreram no Rio Lis;
- Seria de extrema importância calibrar/validar a aplicação dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS, com registos históricos existentes na zona em estudo. A validação dos modelos não foi possível realizar, durante a elaboração do presente trabalho, por não ter sido possível obter a informação necessária sobre os registos de cheias que tenham ocorrido no troço estudado.

## **7.3 Trabalhos futuros**

- Seria interessante uma análise comparativa dos resultados obtidos para diferentes resoluções da malha *raster* do MDT, no caso do modelo hidráulico LISFLOOD-FP;
- Atendendo à capacidade do modelo hidráulico LISFLOOD-FP de importar dados topográficos de elevada resolução, seria importante comparar os resultados obtidos no presente estudo, com resultados obtidos através da preparação do modelo com esse tipo de informação;

- 
- Por forma a abranger as diferentes probabilidades de ocorrência estabelecidas através do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro, o presente estudo poderá ser alargado a caudais de ponta de cheia para diferentes períodos de retorno, (T), nomeadamente, T <100 anos e T >100 anos;
  - Uma primeira tentativa de calibração/validação dos modelos hidráulicos LISFLOOD-FP e HEC-RAS para o troço considerado pode ser levada a cabo para o episódio de precipitação extrema que ocorreu em Outubro de 2006;
  - Por forma a completar a avaliação do risco efectuada no presente estudo, a quantificação do risco poderia ser efectuada, num trabalho futuro:
    - i. De acordo com o conceito técnico, (Betâmio, 2010), o risco pode ser quantificado em termos de probabilidade de ocorrência e das suas consequências, associado à situação considerada, num determinado intervalo de tempo, através das relações 19, 20, 21 e 22:

$$\begin{aligned} \textbf{Risco} &= \text{Probabilidade de Ocorrência} \times \text{Consequências} \\ &= \text{Valor Expectável de Perdas/Danos} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\textbf{Consequências} = \text{Exposição} \times \text{Vulnerabilidade} \text{ (Euros/ano)} \quad (20)$$

$$\textbf{Exposição} = \text{Valor exposto ao impacto} - \text{danos totais (Euros)} \quad (21)$$

$$\textbf{Vulnerabilidade} = \text{grau de perda no valor exposto (\%)} \quad (22)$$

- ii. No presente estudo, seria necessário avaliar do ponto de vista económico os elementos susceptíveis à inundação, dando especial atenção ao exposto nos Artigos 7.º e 8.º do Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro.

---

## **Bibliografia**

### **(1) Referências bibliográficas**

Almeida, A. B., 2006. Prevenção Contra Cheias Naturais, Tendências e Estratégias no Contexto de uma Gestão do Risco, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

ARVRL, 2006, Associação de Regantes e Beneficiários do Vale do Lis, Memorandum, Cheias do Rio Lis, Monte Real.

Bates, P.D., De Roo, A.P.J., 2000, A simple raster-based model for flood inundation simulation, Journal of Hydrology, Elsevier.

Bates, P., Fewtrell, T., Trigg, M., Neal, J., 2007, LISFLOOD-FP, User Manual and Technical Note, Code Release 3.1.1, School of Geographical Sciences, University of Bristol, United Kingdom.

Betâmio A., 2010, Serviços de Água – Adaptação às Alterações Climáticas, Aplicação do Conceito de Risco nas Acções de Adaptação, Évora.

BMT WBM, 2008, Tuflow - User Manual, Build 2008-08-AC, Tuflow Flood and Tide Simulations Software, Australia.

Boss International, 2007, User's Manual, Boss RiverCad XP for AutoCad, Madison, USA.

Brunner W., Gary, 2008, HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, version 4.0, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA.

---

Brunner W., Gary, 2008, HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic User's Manual, version 4., US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA.

Chanson, H., 2004, The hydraulics of open channel flow: an introduction, Elsevier Science & Technology, Oxford, UK

Chow, V.T., 1959, Open Channel Hydraulics, McGraw-hill, Book Company, New York, USA.

Costa, T., Lança, R., 2001. *Capítulo I. Hidrologia de Superfície*, Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Algarve, Faro.

De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G. & Van Deursen, W.P.A., Physically-based River Modelling Within a GIS: The LISFLOOD Model, Joint Research Centre, Space Applications Institute, AIS Unit Environment and Natural Hazards, Ispra, Italy, PCRaster Environmental Software, Utrecht, The Netherlands.

EDF-DRD, 2002, TELEMAC-2D User Manual version 5.2, France.

FLO Engineering, Inc. 1998, Green River Flo-2D Discharge Routing Model Flaming Gorge Dam to Colorado River Confluence, Breckenridge, Colorado.

Lencastre, A., Franco, F. M., 2006, Lições de Hidrologia, Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Lencastre, A., 1996, Hidráulica Geral, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Manzanares A., 1979, Hidráulica Geral I e II, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

---

MAYOR, F.2008. La Gestión Del Agua Más Allá De Los Países, Palavras Del Agua, Tribuna Del Água, Zaragoza.

Ramos C. M., 2005, Drenagem em Infra-Estruturas de Transportes e Hidráulica de Pontes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

MHL, 2006, Review and Assessment of Hydrologic/Hydraulic Flood Models, New South Wales Government, Manly Hydraulics Laboratory, NSW, Australia.

Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., Reeve D. E., 2010, Hydraulic modeling - Principles, methods and applications, Spon Press, NY, USA.

Novais-Barbosa, J., 1985, Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral Volume 1 e 2, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

O'Brien, J. S., Flo-2D Inputs Manual, 2007, Flo-2D Software, Inc, United States of America (USA).

Tickle, k. S., Goulter I. C., Xu, C., Wasimi, S. A., Bouchart, F., Stochastic hydraulics, Method for performance evaluation of hydrologic and hydraulic models, Queensland University, Australia, 1996.

Sauvaget, P., David, E., Demmerle, D., Lefort, P., Optimum Design of Large Flood Relief Culverts Under The A89 Motorway in the Dordogne-Isle Confluence Plain, Laboratoire d'Hydraulique de France - LHF, Grenoble, France.

Phillips, B.C., Yu, ., Thompson G., Silva, N., 2005, 1D and 2D Modelling of Urban Drainage Systems using XP-SWMM and TUFLOW, 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen.

---

Pires V., Marques J., Silva A., 2010, Cheias na Madeira no Inverno 2009/2010. Caso de estudo: dias 2 e 20 de Fevereiro de 2010. Nota Técnica N° DOMC 12 /2010-011. DOMC, IM, I.P. Lisboa.

Quintela, A., 1998, Hidráulica, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

Ray, K., Linsley, J. R., Max, A., 1980, Hydrology for Engineers, McGraw-Hill, New York, USA.

UNESCO, 2000, Floodplain modelling in the Manu-Dhalai basin of Bangladesh, A modeling case-study with Sobek, Manu-Dhalai, Bangladesh

Warner, C. J., Brunner W., Gary, Wolf, W. G., 2008, HEC-RAS River Analysis System, Application Guide, version 4, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA.

Warner, C. J., Brunner W., Gary, Wolf, W. G., 2008, HEC-RAS River Analysis System, Release Notes, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA.

Yang, J., Townsend R. D., Daneshfar B. 2005, Applying the HEC-RAS model and GIS techniques in river network floodplain delineation, NRC, Canada.

**(2) Legislação consultada:**

Decreto-Lei n.º 468/71, de 5 de Novembro. DR n.º 260/71, Série I, de 1971-11-05:  
Estabelece o regime dos terrenos do domínio público hídrico.

Decreto-Lei n.º 89/87, de 26 de Novembro. DR n.º 48/87, Série I, de 1987-02-26.  
Ministério do Plano e da Administração do Território:

---

Estabelece as medidas de protecção às zonas ameaçadas pelas cheias, introduzindo alterações ao Decreto-Lei n.º 468/71, de 5 de Novembro.

Decreto-Lei n.º 364/98, de 21 de Novembro. DR n.º 270/98, Série I-A, de 1998-11-21. Ministério do Equipamento, do Planeamento e da Administração do Território:

Estabelece a obrigatoriedade de elaboração da carta de zonas inundáveis nos municípios com aglomerados urbanos atingidos por cheias:

Decreto-Lei n.º 254/2007, de 12 de Julho. DR n.º 133, Série I, de 2007-07-12:

Estabelece o regime de prevenção de acidentes graves que envolvam substâncias perigosas e de limitação das suas consequências para o homem e o ambiente, transpondo para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 2003/105/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, que altera a Directiva n.º 96/82/CE, do Conselho, de 9 de Dezembro, relativa ao controlo dos perigos associados a acidentes graves que envolvam substâncias perigosas.

Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro. DR n.º 249, Série I, de 29-12-2005:

Aprova a Lei da Água, transpondo para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 2000/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro, e estabelecendo as bases e o quadro institucional para a gestão sustentável das águas.

Directiva 2007/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2000:

Relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações.



---

Decreto-Lei n.º 173/2008, de 26 de Agosto. DR n.º 164, Série I, de 26-08-2008:

Estabelece o regime jurídico relativo à prevenção e controlo integrados da poluição, transpondo para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 2008/1/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 15 de Janeiro.

Decreto-Lei n.º 115/2010, de 20 de Outubro. DR n.º 206, Série I, de 22-10-2010:

Estabelece um quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundações.

**(2) Sítios da Internet consultados em Maio de 2011:**

Agência Portuguesa do Ambiente:

<http://www.iambiente.pt>

Autoridade Nacional de Protecção Civil:

<http://www.prociv.pt/>

Câmara Municipal de Leiria:

<http://www.cm-leiria.pt/>

Câmara Municipal da Marinha Grande:

<http://www.cm-mgrande.pt>

Delft Hydraulics Software:

<http://delftsoftware.wldelft.nl>

Diário da República Electrónico:

<http://www.dre.pt>

European Union, European Commission - JRC - Floods: Prediction, Mitigation, Impact Assessment – LISFLOOD-FP:

[http://natural-hazards.jrc.ec.europa.eu/activities\\_lisflood.html](http://natural-hazards.jrc.ec.europa.eu/activities_lisflood.html)

---

Flo 2d: 2-Dimensional Flood Routing Model Software:

<http://www.flo-2d.com>

Flood and Tide Simulation Software –TUFLOW:

<http://www.tuflow.com>

Instituto da Água:

<http://www.inag.pt>

Instituto Geográfico do Exercito:

<http://www.igeoe.pt/>

Jornal "Sol"- Inundações na Ilha da Madeira, Funchal, a 20 de Fevereiro de 2010:

[http://sol.sapo.pt/inicio/Sociedade/Interior.aspx?content\\_id=4856](http://sol.sapo.pt/inicio/Sociedade/Interior.aspx?content_id=4856)

Junta de Freguesia de Vieira de Leiria:

<http://www.jf-vieiradeleiria.pt/>

Junta de Freguesia de Coimbra:

<http://www.jfcoimbrao.pt/>

O Portal da União Europeia:

<http://europa.eu/>

Sistema Nacional de Informação Geográfica:

<http://snig.igeo.pt/portal/>

Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos:

<http://www.snirh.pt>

Telemac System Software Information:

<http://www.telemacsystem.com>

---

United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service:

<http://www.wsi.nrcs.usda.gov>

University of Bristol - Geography source - LISFLOOD-FP:

<http://source.ggy.bris.ac.uk/wiki/Lisflood>

Unesco:

<http://www.unesco-ihe.org/Flood-Management-Education-Platform/Case-Studies/Manu-Dhalai-Bangladesh-case-study>.

---

**ANEXO I** – Número de escoamento

---

O número de escoamento (CN) depende do tipo hidrológico do solo, da sua utilização e das condições da superfície (LENCASTRE e FRANCO).

Segundo o método do *Soil Conservation Service* (SCS), o CN é dado através da relação:

$$CN_{III} = \frac{23 CN_{II}}{(10 + 0,13 CN_{II})} \quad (A1.1)$$

em que  $CN_{III}$  é o número de escoamento em condições de elevada precipitação antecedente e  $CN_{II}$  o número de escoamento para condições de humidade média no solo, conforme exposto em CHOW (1988). O valor de  $CN_{II}$  pode ser definido da análise conjunta do Quadro A1.1 e da Figura A1.1.

**Quadro A 1.1 – Números de escoamento  $CN_{II}$  para diversas utilizações do solo segundo o SCS. (Lencastre,2006).**

Utilização ou cobertura do solo		Grupo hidrológico do solo			
		A	B	C	D
Terras lavradas: não cultivadas		72	81	88	91
cultivadas		62	71	78	81
Pastagens: pobres		68	79	86	89
boas		39	61	74	80
Prados em boas condições		30	58	71	78
Florestas: pouco densas		45	66	77	83
densas		25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, campos de golfe, cemitérios, etc.:					
— em boas condições: cobertura com 75% ou mais de relva		39	61	74	80
— fracas condições: cobertura com 50% a 75% de relva		49	69	79	84
Áreas comerciais (85% de impermeabilização)		89	92	94	95
Zonas industriais (72% de impermeabilização)		81	88	91	93
Áreas residenciais:					
<i>Tamanho dos lotes (média)</i>	<i>Impem. (média)</i>				
(m <sup>2</sup> )	(%)				
500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
1250	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84
Lotes de parques pavimentados, telhados, passeios, etc.		98	98	98	98
Ruas, estradas:					
— pavimentadas, com sarjetas e colectores		98	98	98	98
— empedradas		76	85	89	91
— terra batida		72	82	87	89

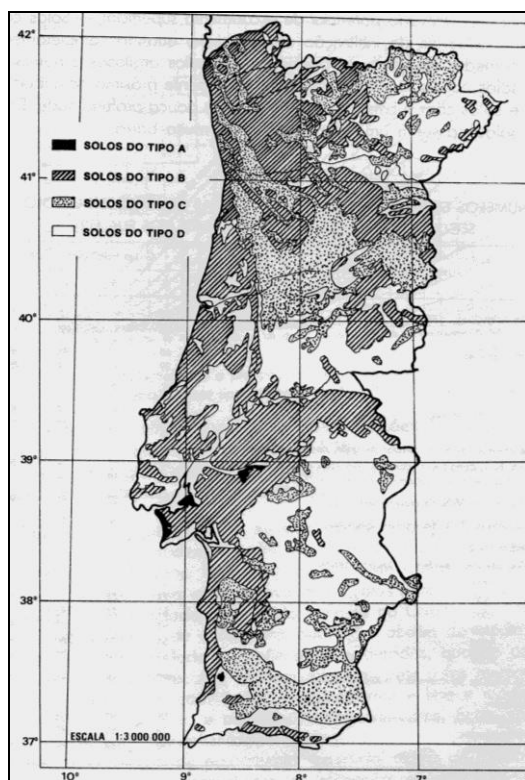


Figura A 1.1 – Carta de classificação hidrológica dos solos de Portugal Continental (Lencastre, 2006).

Quadro A 1.2 – Definição das condições de antecedentes de humidade (Matias, 2005).

Condição antecedente de humidade	Definição
<b>AMCI</b>	Situação em que os solos estão secos, mas acima do ponto de emurchecimento. A consideração deste caso é pouco recomendável para estudos de caudais de cheia.
<b>AMCII</b>	Situação média que, segundo <i>Morel-Seytoux e Verdin (1980)</i> , deve corresponder aproximadamente à capacidade do campo. Esta situação corresponde provavelmente às condições de humidade antecedentes de cheias de pequena dimensão.
<b>AMCIII</b>	Situação em que ocorrem precipitações consideráveis nos cinco dias anteriores e o solo se encontra quase saturado. É a situação mais propícia à formação de maiores cheias, e portanto aquela que se reveste de maior importância para o projecto.

**Quadro A 1.3 -Classificação hidrológica dos solos segundo o SCS (Matias, 2005).**

<b>Tipo hidrológico de solo</b>	<b>Características dos solos</b>
<b>TIPO A</b>	Solos dando origem a baixo escoamento directo, ou que apresentam permeabilidade bastante elevada. Inclui areias com bastante espessura, e com pouco limo ou argila, e arenitos com bastante espessura e muito permeáveis.
<b>TIPO B</b>	Solos menos permeáveis que os do tipo A, mas com permeabilidade superior à média. Inclui fundamentalmente solos arenosos menos espessos que os do tipo A e arenitos menos espessos e menos agregados que os do tipo A.
<b>TIPO C</b>	Solos originando escoamentos directos superiores à média e superiores aos originados pelos tipos anteriores. Inclui solos pouco espessos e solos com quantidades apreciáveis de argilas, se bem que menos do que os do tipo D.
<b>TIPO D</b>	Solos com argilas expansivas e solos pouco espessos, com sub-horizontes quase impermeáveis que originam elevado escoamento directo.

---

**ANEXO II** – Curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF).

---



No Quadro A2.1 apresentam-se os parâmetros das curvas de intensidade-duração-frequência (curvas IDF) deduzidas por BRANDÃO *et al.* (2001), com base nos registos de postos udográficos do Continente, considerando, para o efeito, durações da precipitação,  $t$ , compreendidas entre 5 minutos e 48 horas e períodos de retorno,  $T$ , que variam entre os 2 e os 1000 anos.

No presente estudo, o posto hidrográfico analisado é o posto de Coimbra, uma vez que é o posto mais próximo da área da bacia hidrográfica do Rio Lis, apresentando no Quadro A2.1 os valores correspondentes aos parâmetros  $a$  e  $b$  das curvas de IDF do posto udográfico 12G/01.

As curvas de IDF obedecem à equação 17 do capítulo 4.2 para a intensidade média de precipitação expressa em mm/h e duração da precipitação em minutos.

**Quadro A2.1 – Parâmetros das curvas de IDF estabelecidas com base em precipitações intensas registadas no posto udográfico de Coimbra (IG) – 12G/01.**

T (anos)	5 a 30 minutos		30 minutos a 6 horas		6 horas a 48 horas	
	a	b	a	b	a	b
2	230.61	-0.622	280.69	-0.653	271.67	-0.653
5	307.00	-0.616	374.38	-0.647	485.15	-0.695
10	357.50	-0.614	436.65	-0.644	639.05	-0.712
20	405.90	-0.613	496.49	-0.643	792.84	-0.725
50	468.52	-0.611	574.03	-0.641	998.29	-0.738
100	515.43	-0.610	632.17	-0.640	1155.70	-0.745
500	623.80	-0.608	766.63	-0.639	1527.60	-0.758
1000	670.37	-0.521	824.45	-0.638	1689.90	-0.762

---

**Anexo III** – Valores do coeficiente de rugosidade de *Manning*, disponibilizados pelo software RIVERCAD-PRO

---

**Quadro A3.1 – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning “n”.**

<b>Type of Channel and Description</b>	<b>Minimum</b>	<b>Normal</b>	<b>Maximum</b>
<b>A. Natural Streams</b>			
<b>1. Main Channels</b>			
a. Clean, straight, full, no rifts or deep pools	0.025	0.03	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.03	0.035	0.04
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.04	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.05
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.04	0.048	0.055
f. Same as "d" but more stones	0.045	0.05	0.06
g. Sluggish reaches, weedy. deep pools	0.05	0.07	0.08
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.07	0.1	0.15
<b>2. Flood Plains</b>			
a. Pasture no brush			
1. Short grass	0.025	0.03	0.035
2. High grass	0.03	0.035	0.05
b. Cultivated areas			
1. No crop	0.02	0.03	0.04
2. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. Mature field crops	0.03	0.04	0.05
c. Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.05	0.07
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.05	0.06
3. Light brush and trees, in summer	0.04	0.06	0.08
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.07	0.11
5. Medium to dense brush, in summer	0.07	0.1	0.16
d. Trees			
1. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.03	0.04	0.05
2. Same as above, but heavy sprouts	0.05	0.06	0.08
3. Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.08	0.1	0.12
4. Same as above, but with flow into branches	0.1	0.12	0.16
5. Dense willows, summer, straight	0.11	0.15	0.2
<b>3. Mountain Streams, no vegetation in channel, banks</b>			
usually steep, with trees and brush on banks submerged			
a. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.03	0.04	0.05
b. Bottom: cobbles with large boulders	0.04	0.05	0.07

**Quadro A3.1 (Cont.) – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning n”.**

<b>Type of Channel and Description</b>	<b>Minimum</b>	<b>Normal</b>	<b>Maximum</b>
<b>B. Lined or Built-Up Channels</b>			
<b>1. Concrete</b>			
a. Trowel finish	0.011	0.013	0.015
b. Float Finish	0.013	0.015	0.016
c. Finished, with gravel bottom	0.015	0.017	0.02
<b>Type of Channel and Description</b>	<b>Minimum</b>	<b>Normal</b>	<b>Maximum</b>
d. Unfinished	0.014	0.017	0.02
e. Gunite, good section	0.016	0.019	0.023
f. Gunite, wavy section	0.018	0.022	0.025
g. On good excavated rock	0.017	0.02	
h. On irregular excavated rock	0.022	0.027	
<b>2. Concrete bottom float finished with sides of:</b>			
a. Dressed stone in mortar	0.015	0.017	0.02
b. Random stone in mortar	0.017	0.02	0.024
c. Cement rubble masonry, plastered	0.016	0.02	0.024
d. Cement rubble masonry	0.02	0.025	0.03
e. Dry rubble on riprap	0.02	0.03	0.035
<b>3. Gravel bottom with sides of:</b>			
a. Formed concrete	0.017	0.02	0.025
b. Random stone in mortar	0.02	0.023	0.026
c. Dry rubble or riprap	0.023	0.033	0.036
<b>4. Brick</b>			
a. Glazed	0.011	0.013	0.015
b. In cement mortar	0.012	0.015	0.018
<b>5. Metal</b>			
a. Smooth steel surfaces	0.011	0.012	0.014
b. Corrugated metal	0.021	0.025	0.03
<b>6. Asphalt</b>			
a. Smooth	0.013	0.013	
b. Rough	0.016	0.016	
<b>7. Vegetal lining</b>	<b>0.03</b>		<b>0.5</b>

**Quadro A3.1 (Cont.) – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning “n”.**

<b>Type of Channel and Description</b>	<b>Minimum</b>	<b>Normal</b>	<b>Maximum</b>
<b>C. Excavated or Dredged Channels</b>			
<b>1. Earth, straight and uniform</b>			
a. Clean, recently completed	0.016	0.018	0.02
b. Clean, after weathering	0.018	0.022	0.025
c. Gravel, uniform section, clean	0.022	0.025	0.03
d. With short grass, few weeds	0.022	0.027	0.033
<b>2. Earth, winding and sluggish</b>			
a. No vegetation	0.023	0.025	0.03
b. Grass, some weeds Dense weeds or aquatic plants in deep	0.025	0.03	0.033
c. channels	0.03	0.035	0.04
d. Earth bottom and rubble side	0.028	0.03	0.035
e. Stony bottom and weedy banks	0.025	0.035	0.04
<b>Type of Channel and Description</b>	<b>Minimum</b>	<b>Normal</b>	<b>Maximum</b>
f. Cobble bottom and clean sides	0.03	0.04	0.05
<b>3. Dragline-excavated or dredged</b>			
a. No vegetation	0.025	0.028	0.033
b. Light brush on banks	0.035	0.05	0.06
<b>4. Rock cuts</b>			
a. Smooth and uniform	0.025	0.035	0.04
b. Jagged and irregular	0.035	0.04	0.05
<b>5. Channels not maintained, weeds and brush</b>			
a. Clean bottom, brush on sides	0.04	0.05	0.08
b. Same as above, highest stage of flow	0.045	0.07	0.11
c. Dense weeds, high as flow depth	0.05	0.08	0.12
d. Dense brush, high stage	0.08	0.1	0.14

---

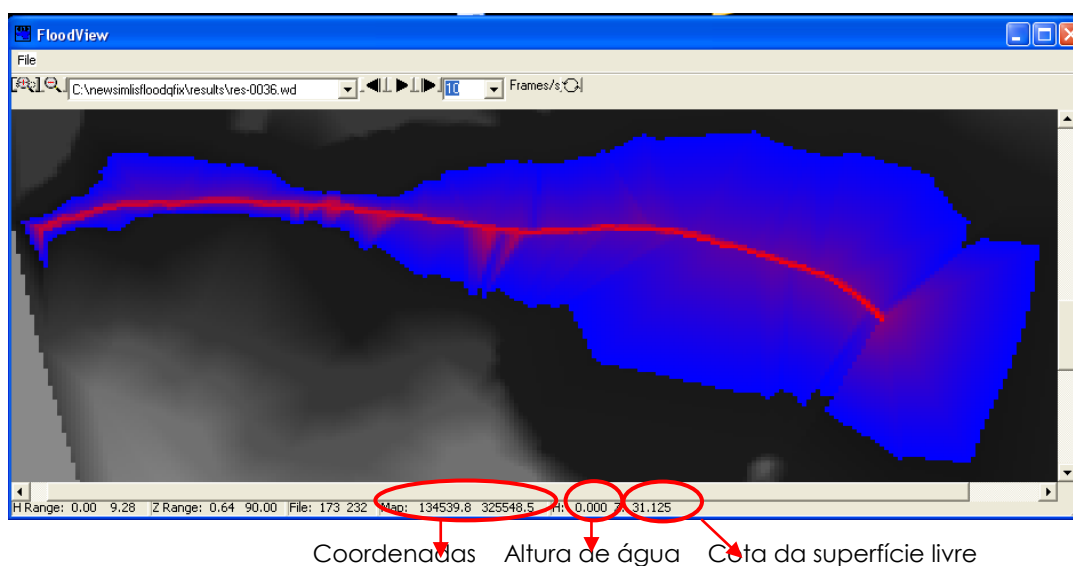
**Anexo IV** – Resultados do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, ficheiros no formato ascii. Visualização através do *FloodView*.

---

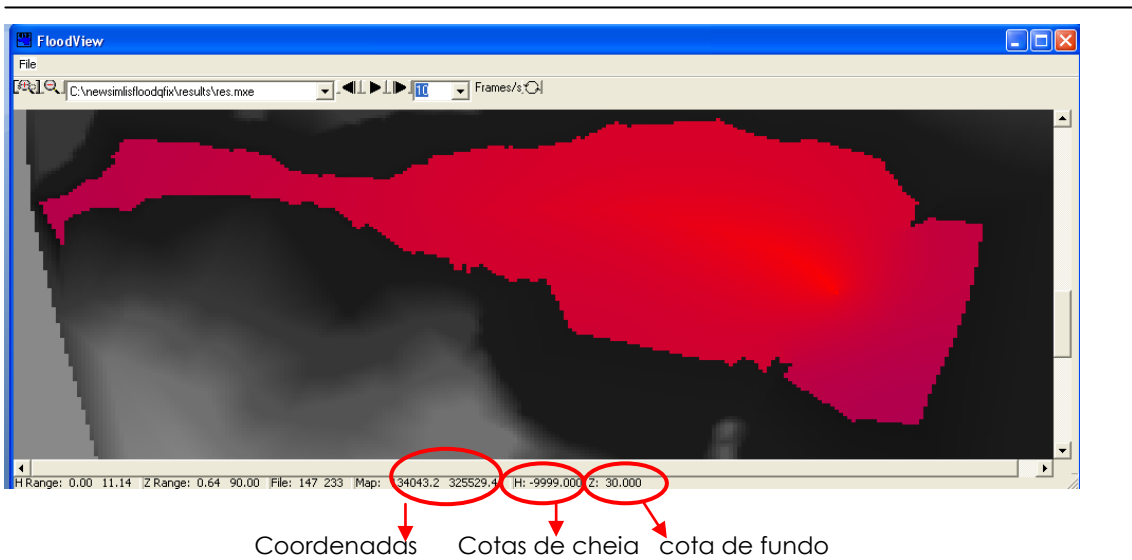
---

O FloodView permite visualizar os resultados da aplicação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP. Ao passar o cursor na imagem, a informação contida em cada pixel, aparece, na barra inferior, da janela da aplicação.

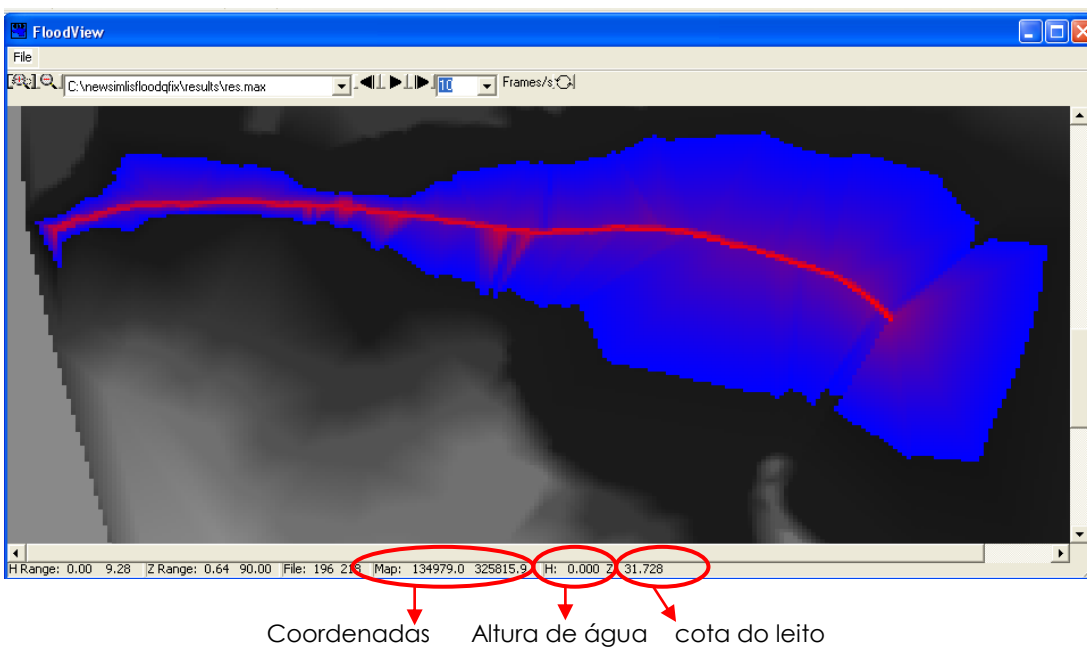
As Figuras, que seguidamente se apresentam, compreendem o MDT em formato *raster* numa camada inferior e a delimitação da zona de inundação, numa camada superior. Dependendo da informação que se pretende analisar, na parte inferior da janela do *FloodView* é possível obter valores para as alturas de água, as cotas de cheia, alturas máximas da superfície livre, delimitação da zona inundável (para o tempo inicial, total e alturas de água máximas da simulação). Todas as unidades são em metros.



**Figura A4.1 – Alturas de água simuladas através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: res.0172.wd).**

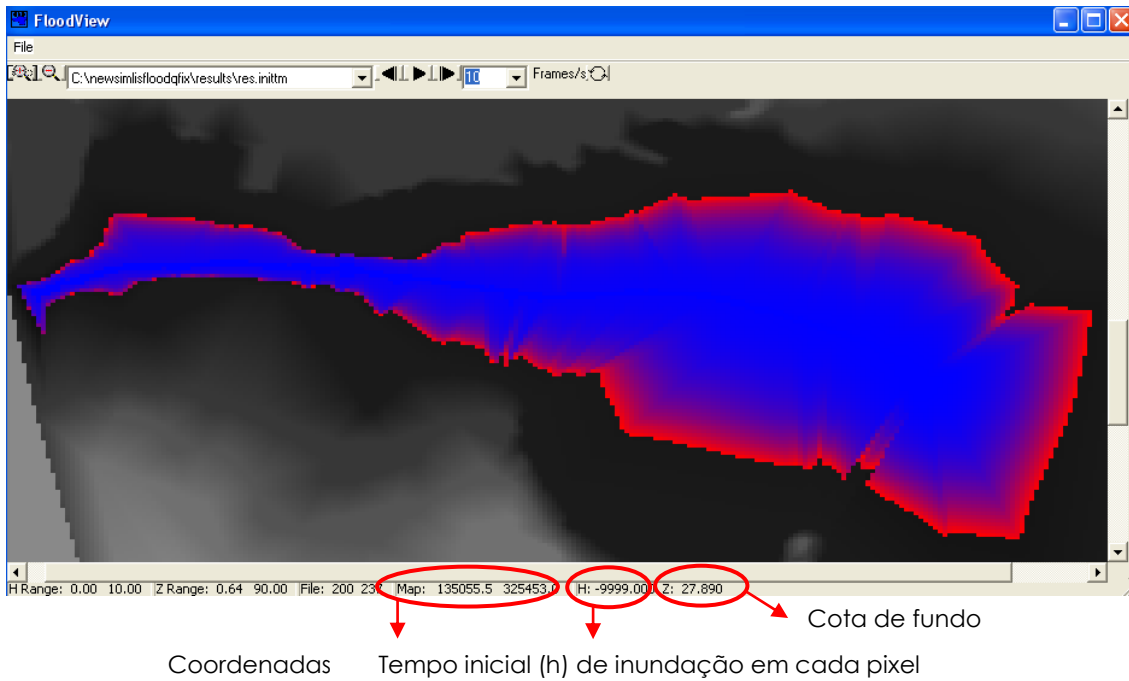


**Figura A4.2 – Cotas de cheia simuladas através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: res.mxe).**

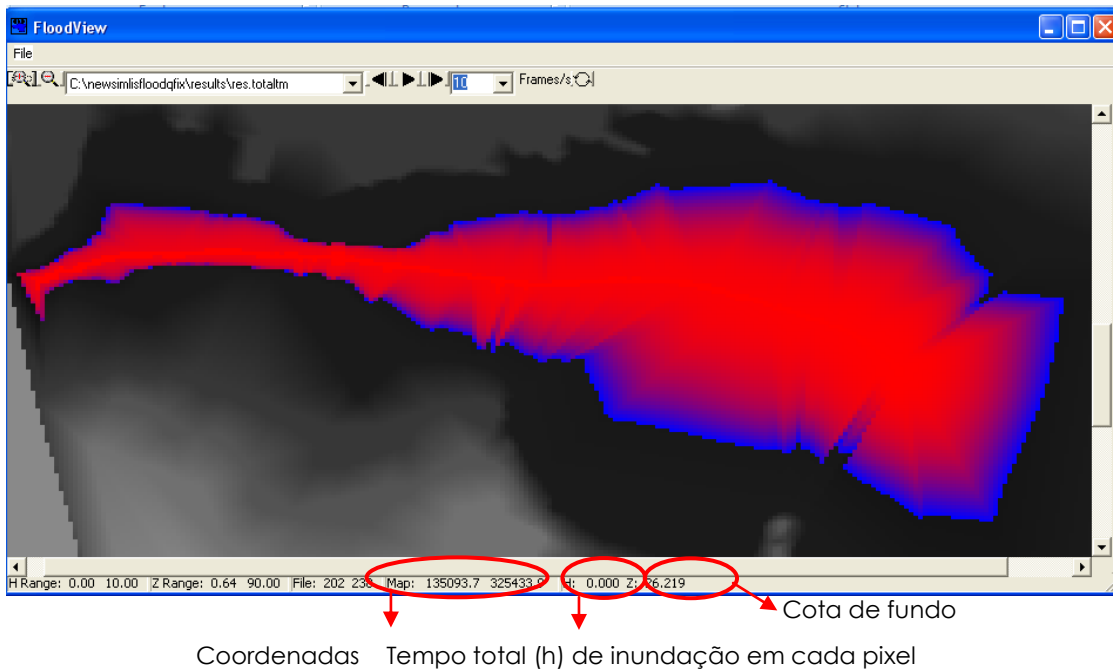


**Figura A4.3 – Alturas máximas da superfície livre simuladas através do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: res.max).**





**Figura A4.4 – Tempo de inundação inicial para cada célula, (pixel), da malha raster, obtido durante simulação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: res.inittm).**



**Figura A4.5 – Tempo de inundação total para cada célula, (pixel), da malha raster, obtido durante simulação do modelo hidráulico LISFLOOD-FP, (ficheiro: res.totaltm).**