



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

**Regras de Operação do Reservatório de Magos
para Controlo de Cheias**

Fernanda Alexandra Firmino Fiúza

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia dos Recursos Hídricos



Orientador: Maria Madalena Vitório Moreira Vasconcelos

**Évora
2010**

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

Regras de Operação do Reservatório de Magos para Controlo de Cheias

Fernanda Alexandra Firmino Fiúza

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia dos Recursos Hídricos



174 693

Évora, 2010

“... a água é para o mundo o mesmo que o sangue é para o nosso corpo e, sem dúvida, mais: ela circula segundo regras fixas, tanto no interior quanto no exterior da Terra, ela cai em chuva e neve, ela surge do solo, corre em rios, e depois retorna aos vastos reservatórios que são os oceanos e mares que nos cercam por todos os lados ...”

Leonardo Da Vinci

Resumo

Face à Directiva 2007/60/CE relativa à avaliação e gestão do risco de inundações, ao Decreto-Lei n.º 344/2007 que aprova o Regulamento de Segurança de Barragens, ao aumento de áreas urbanizadas e às projecções dos modelos de clima para o fim do século, que apontam para o aumento da frequência e da intensidade da ocorrência de inundações causadas por eventos de precipitação intensa de curta duração, é crucial a definição de regras de operação nos reservatórios com controlo de cheias.

O Reservatório de Magos pertence à bacia hidrográfica do rio Tejo, está situado no Concelho de Salvaterra de Magos e tem como usos principais a rega e o controlo de cheias.

Este trabalho tem como objecto de estudo a definição das regras de operação (restrição no caudal descarregado) do Reservatório de Magos para controlo de cheias no troço a jusante.

São aplicados o modelo hidrológico *HEC-HMS 3.1.0*, o modelo hidráulico *HEC-RAS 3.1.3* e o modelo de simulação de reservatórios *HEC-ResSim 3.0* para o cálculo do hidrograma de cheia, da zona inundável e para simulação do balanço de água no reservatório, respectivamente.

Como resultado são apresentadas as regras de operação (caudal máximo e mínimo a descarregar) do Reservatório de Magos para controlo da zona inundável a jusante, no caso de um evento de cheia.

Palavras-chave: controlo de cheias, regras de operação de reservatórios, zonas inundáveis, *HEC-HMS*, *HEC-RAS*, *HEC-ResSim*

Abstract

Based on the Directive 2007/60/CE related to the Assessment and Management of Flood Risks, on the Decree-Law n. ° 344/2007 which approves the Regulation for Dam Safety, the increased urban areas and to the projections of climate models by the end of the century which is pointing to an increased frequency and intensity of occurrence of floods caused by intense rainfall events of short duration, establishing rules of operation for flood control in reservoirs becomes crucial.

The Magos Reservoir belongs to the river Tagus basin, located in the county of Salvaterra de Magos and has as its main uses the irrigation and flood control.

This study aims to establish the rules of operation (flow discharged restriction) of the Reservoir of Magos for flood control in the downstream reach.

The methodology used in the present work includes the application of the Hydrological model HEC-HMS 3.1.0, the Hydraulic model HEC-RAS 3.1.3 and a reservoir simulation model HEC-ResSim 3.0 to calculate the hydrograph of peak discharge, floodplain zone and simulate reservoir operations, respectively.

As a result the rules of operation (maximum flow and minimum discharge) of Magos Reservoir for flood control in a downstream reach in case of flood event are presented.

Key words: flood control, floodplain zones, rules of operation of reservoir, HEC-HMS, HEC-RAS, HEC-ResSim

Agradecimentos

Um agradecimento muito especial à minha orientadora de dissertação de mestrado, Professora Madalena Moreira que contribuiu para a realização deste trabalho, através das valiosas sugestões, pelo seu encorajamento e segurança que sempre me soube transmitir em relação ao meu trabalho.

Índice de Texto

1. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS	1
1.1 Justificação e Enquadramento	1
1.2 Objectivos e Metodologia do Trabalho.....	7
1.2.1 Objectivos.....	7
1.2.2 Metodologia.....	8
1.3 Estrutura do Texto	10
2. MODELO DE SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS <i>HEC-RESSIM 3.0</i>	12
2.1 Conceitos Teóricos da Simulação do Balanço de Água em Reservatórios	12
2.2 Descrição do Modelo HEC-ResSim 3.0	15
2.2.1 Módulo Bacia Hidrográfica	18
2.2.2 Módulo Reservatório	19
2.2.3 Módulo Simulação.....	21
2.3 Potencialidades do modelo HEC-ResSim 3.0.....	22
2.4 Revisão Bibliográfica	23
3. CARACTERIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO E DA BACIA HIDROGRÁFICA DA RIBEIRA DE MAGOS NA SECÇÃO DA BARRAGEM DE MAGOS.....	26
3.1 Introdução.....	26
3.2 Enquadramento Geográfico	26
3.3 Caracterização do Reservatório de Magos.....	27
3.3.1 Descrição das Estruturas Hidráulicas	27
3.3.2 Informação Disponível	29
3.4 Usos da Albufeira de Magos.....	30
3.5 Caracterização Geomorfológica.....	30
3.5.1 Forma da Bacia Hidrográfica	31
3.5.2 Caracterização do Relevo	31
3.5.3 Caracterização do Solo	34
3.5.4 Ocupação do Solo.....	36
3.5.5 Número de Escoamento.....	37
3.5.6 Rede de Drenagem	39
3.5.6.1 Ordem dos Cursos de Água	39
3.5.6.2 Linha de Água Principal.....	40
3.5.6.3 Densidade de Drenagem.....	40
3.5.6.4 Tempo de Resposta da Bacia, t_{lag} ,	41
3.5.6.5 Tempo de Concentração, t_c ,.....	42
3.6 Relatório da Visita de Campo à Ribeira de Magos	43

4. ESTUDO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DA RIBEIRA DE MAGOS NUM TROÇO A JUSANTE DA SECÇÃO DO RESERVATÓRIO DE MAGOS.....	45
4.1 Considerações Gerais.....	45
4.2 Modelação Hidrológica.....	45
4.2.1 Introdução.....	45
4.2.2 Determinação do Caudal de Ponta de Cheia e do Hidrograma de Cheia.....	47
4.3. Modelação Hidráulica.....	49
4.3.1 Introdução.....	49
4.3.2 Caracterização Geomorfológica do Troço da Ribeira de Magos a Jusante da Barragem de Magos.....	49
4.3.3 Delimitação das Zonas Inundáveis.....	51
4.4. Definição das Regras de Operação do Reservatório de Magos.....	52
5 SIMULAÇÃO DO RESERVATÓRIO DE MAGOS PARA CONTROLO DE CHEIAS	56
5.1 Introdução.....	56
5.2 Simulação do Balanço de Água no Reservatório de Magos.....	57
5.2.1 Módulo Bacia Hidrográfica.....	57
5.2.2 Módulo Reservatório.....	59
5.2.3 Módulo Simulação.....	66
5.3 Resultados.....	67
6. CONCLUSÕES.....	71
6.1 Síntese do Trabalho Realizado e Conclusões Gerais.....	71
6.2 Estudos Futuros.....	73
BIBLIOGRAFIA	75
ANEXOS	I
ANEXO I.....	II
ANEXO II	VII
ANEXO III.....	XI

Índice de Figuras

Figura 1 – Bacia Hidrográfica do Rio Tejo e pormenor da Bacia Hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos (adaptada do INAG).....	27
Figura 2 – Planta do Reservatório de Magos.....	28
Figura 3 – Carta hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos.....	32
Figura 4 – Histograma das classes de declive da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos.....	33
Figura 5 – Carta de solos da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos (adaptada de DGADR).....	34
Figura 6 – Grupo hidrológico do solo da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos (adaptada de DGADR).....	36
Figura 7 – Ocupação do solo da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos (adaptada de IGP).....	37
Figura 8 – Ordem de <i>Strahler</i> da rede hidrográfica da Ribeira de Magos até à secção da Barragem de Magos.....	39
Figura 9 – Rede hidrográfica a montante da Barragem de Magos, à escla 1/25000.....	40
Figura 10 – Reservatório de Magos.....	44
Figura 11 – Galeria ripícola da Ribeira de Magos.....	44
Figura 12 – Resultados da modelação hidrológica aplicada à bacia hidrográfica do Reservatório de Magos – Hidrograma de cheia para o período de retorno de 100 anos.....	48
Figura 13 – Identificação das secções transversais do troço em estudo da Ribeira de Magos traçadas à escala 1/10 000 no modelo ArcView 3.2.....	50
Figura 14 – Perfil longitudinal do troço da Ribeira de Magos em estudo, traçado com base na cartografia à escala 1/10 000.....	51
Figura 15 – Planta de identificação da zona inundável para o período de retorno de 100 anos no troço de jusante da Barragem de Magos com base na cartografia à escala 1/10 000.....	52
Figura 16 – Planta de identificação da zona inundável para o caudal máximo a descarregar com base na cartografia à escala 1/10 000.....	54
Figura 17 – Planta do Reservatório de Magos e troço a jusante onde se pretende controlar a inundação de terrenos e vias de comunicação.....	56
Figura 18 – Módulo Bacia Hidrográfica.....	59
Figura 19 – Opção <i>Reservoir Network</i> da janela principal do <i>HEC-ResSim 3.0</i>	59
Figura 20 – Módulo Reservatório do modelo <i>HEC-ResSim 3.0</i> , baseado na Configuração existente.....	60
Figura 21 – Selecção do método de propagação de cheias do comando <i>Reach Editor</i> ..	61
Figura 22 – Curva de armazenamento do Reservatório de Magos - Comando <i>Reservoir Editor</i>	62
Figura 23 – Curva de vazão do descarregador de superfície controlada - Comando <i>Reservoir Editor</i>	63
Figura 24 – Número de comportas e capacidade máxima do descarregador de superfície controlada - Comando <i>Reservoir Editor</i>	64
Figura 25 – Cota do NMC, NPA - Opção <i>Operations</i> do comando <i>Reservoirs Editor</i>	65
Figura 26 – Opção <i>Simulation</i> da janela principal do <i>HEC-ResSim 3.0</i>	66
Figura 27 – Módulo Simulação.....	67
Figura 28 – Gráfico com o comportamento do Reservatório de Magos para controlo de cheias para a regra de operação estudada.....	69

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Tipo de relevo (Costa e Lança, 2001).....	33
Tabela 2 – Distribuição dos solos na bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos.	35
Tabela 3 – Grupo hidrológico da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos.	36
Tabela 4 – Ocupação do solo da bacia hidrográfica da Barragem de Magos.	37
Tabela 5 – Número de escoamento na bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos.	38
Tabela 6 – Constantes da curva IDF para o posto meteorológico de Portalegre	47
Tabela 7 – Resultados da modelação hidrológica aplicada à bacia hidrográfica do Reservatório de Magos – Características da ponta de cheia para o período de retorno de 100 anos.	48

Lista de Símbolos

Neste trabalho são usados os seguintes símbolos:

A	Área total da bacia hidrográfica (m^2)
C	Volume útil do reservatório (m^3)
CN	Número de escoamento (curve number) (-)
D	Declive médio da bacia hidrográfica (%)
D_t	Volume efluente do reservatório no intervalo Δt (m^3)
E_t	Perda por evaporação no intervalo Δt (m^3)
G	Garantia (%)
k_c	Coefficiente de compacidade (-)
K_f	Factor de forma da bacia hidrográfica (-)
l	Comprimento da linha de água principal (m)
L_t	Outras perdas de água no reservatório (m^3)
N_r	Número de anos em que existe restrições ao controlo de cheias (-)
Nt	Número total de anos do período de estudo (-)
Q_t	Volume afluente no intervalo Δt (m^3)
S	Perdas iniciais da precipitação (mm)
S_t	Armazenamento no reservatório no início do intervalo Δt (m^3)
S_{t+1}	Armazenamento no reservatório no fim do intervalo Δt (m^3)
t_c	Tempo de concentração da bacia hidrográfica (h)
t_{log}	Tempo de resposta da bacia hidrográfica (h)

1. Introdução e Objectivos

1.1 Justificação e Enquadramento

As zonas ameaçadas pelas cheias têm vindo a aumentar em Portugal, devido ao aumento da impermeabilização do solo a que se assistiu, especialmente em meio urbano, e à desflorestação nas bacias hidrográficas. Nas últimas décadas têm sido testemunhados elevados prejuízos materiais e perda de vidas provocadas por cheias de que são exemplo a região de Lisboa em Novembro de 1983, os Açores e o Alentejo no Outono de 1997 e a Ilha da Madeira em Fevereiro de 2010. Alguns dos exemplos apresentados são resultado de erros nas soluções urbanísticas adoptadas ou da operação e manutenção de obras hidráulicas inadequadas. É possível visualizar fotografias e consultar dados relativos às cheias no hidro-album da mediateca, bem como no Atlas da Água do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (www.snirh.pt).

A legislação portuguesa há muito que apresenta restrições à utilização das zonas contíguas às linhas de água. O regulamento dos Serviços Hidráulicos de 22 de Dezembro de 1982 proíbe a execução de qualquer obra nas margens ou leitos das lagoas e rios, nos vales e nos campos marginais habitualmente inundados pelas águas, nomeadamente em cheia (Varela, 1987). Estas áreas foram integradas na Reserva Ecológica Nacional (REN) na qualidade de “Leitos dos cursos de água e zonas ameaçadas pelas cheias” através do Decreto-Lei n.º 321/83 de 5 de Julho, alterado pelo Decreto-Lei n.º 93/90 de 19 de Março.

Em consequência das cheias de Novembro de 1983 ocorridas em Portugal, foi publicado o Decreto-Lei n.º 89/87 de 26 de Fevereiro, que implementou medidas de protecção

Do ponto de vista do domínio hídrico, o Esquema de Desenvolvimento do Espaço Europeu (EDEC), que define à escala da União Europeia objectivos políticos e princípios gerais com vista a afirmar um desenvolvimento sustentado e equilibrado, refere que são imprescindíveis políticas concertadas de gestão da água, sendo os elementos principais dessas políticas a prevenção, a melhor afectação dos solos e a gestão de crises, nomeadamente as cheias.

A Directiva 2000/60/CE ou Directiva-Quadro da Água (DQA) do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2000 é o principal instrumento da Política da União Europeia relativa à água. Esta Directiva, transposta para a ordem jurídica nacional em 2005 pela denominada Lei da Água, constitui uma ferramenta de elevada importância para a protecção das águas interiores, de superfície e subterrâneas, estuarinas e costeiras, de modo a assegurar o uso da água em boas condições de qualidade e quantidade, privilegia a gestão integrada dos recursos hídricos no quadro de bacias hidrográficas definidas pelos respectivos limites topográficos e envolve a análise e a monitorização dos impactos das actividades humanas sobre as massas de água.

Na Lei da Água são apresentadas medidas de protecção contra cheias e inundações nas zonas inundáveis ou zonas ameaçadas pelas cheias, descritas como as áreas contíguas à margem dos cursos de água ou do mar que se estendem até à cota alcançada pela cheia com período de retorno igual a 100 anos, bem como a necessidade de classificação específica e de medidas especiais de prevenção e protecção, delimitando-se graficamente as áreas em que é interdita a construção e aquelas em que a construção é condicionada, para segurança de pessoas e bens.

Com base na Directiva-Quadro da Água, foi aprovada a Directiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho a 23 de Outubro de 2007 relativa à Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundações (Jornal Oficial da União Europeia, 2007).

A Directiva sobre a Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundações tem como objectivo estabelecer um quadro que seja comum a todos os Estados-Membros na avaliação e redução dos riscos de inundações na União Europeia que possam causar danos na saúde pública, no ambiente, nos bens e nas actividades económicas. A Directiva aborda todos os tipos de inundações, nomeadamente as que ocorrem nos rios e zonas costeiras. Contudo, existem outros riscos de inundações, como as inundações urbanas e as inundações causadas pelos sistemas de drenagem de águas pluviais, que também têm de ser tidas em conta.

A metodologia adoptada pela Directiva pretende que as medidas de prevenção e gestão sejam organizadas por regiões hidrográficas como o estabelecido na Directiva-Quadro da Água.

Em conclusão, as medidas de prevenção e gestão incluem uma avaliação preliminar dos riscos de inundações, na qual deverá estar incluída informação sobre as inundações sofridas no passado, a probabilidade de ocorrência de futuras inundações e as consequências que possam daí advir, a realização de cartas de zonas inundáveis e de cartas de risco de inundações que indiquem os potenciais danos que possam causar à população local, aos bens e ao meio ambiente e a elaboração dos planos de gestão dos riscos de inundações que devem incluir a promoção de práticas de utilização sustentável

do solo, a melhoria da retenção da água e a inundação controlada de determinadas zonas em caso de cheia.

No primeiro ciclo de implementação da Directiva 2007/60/CE, tendo em atenção as projecções dos modelos de clima para diferentes cenários de alterações climáticas, a adaptação às alterações climáticas deve ser considerada.

A Comissão Europeia adoptou em Abril de 2009 um livro branco designado “Adaptação às Alterações Climáticas: para um quadro de acção europeu” (Jornal Oficial da União Europeia, 2009) que estabelece um quadro para a redução da vulnerabilidade da UE ao impacte das alterações climáticas. A Comissão, por ocasião da revisão da aplicação da Directiva-Quadro da Água em 2012 e da estratégia relativa à escassez de água e às secas, pretende avaliar as opções de promoção da capacidade de armazenagem de água nos ecossistemas para aumentar a capacidade de adaptação à seca e reduzir os riscos de inundação.

Os cenários de alterações climáticas afectam a gestão dos recursos hídricos e dos ecossistemas, da agricultura, da biodiversidade, das florestas, da desertificação, da energia, da saúde, da política social, da investigação, da erosão costeira de forma significativa, cabendo a cada Estado-Membro definir e promover estratégias de aumento da resiliência às alterações climáticas da saúde pública, da propriedade e da produtividade dos solos, nomeadamente na melhoria da gestão dos recursos hídricos e dos ecossistemas, para prevenção de inundações, para atenuar o efeito das secas, a erosão dos solos e a desertificação, (Jornal Oficial da União Europeia, 2009).

As projecções dos modelos de clima conhecidas apontam para o aumento da temperatura, o degelo dos glaciares, o acréscimo de episódios de seca e de cheias, nomeadamente o aumento da intensidade e frequência das precipitações intensas de curta duração, que são entre outros, indicadores da necessidade de considerar a avaliação apresentada nesta dissertação.

Os reservatórios superficiais e artificiais, criados pela construção de barragens são elementos muito importantes na gestão dos recursos hídricos. São vários os usos do caudal regularizado, ou seja, do volume armazenado no reservatório, nomeadamente abastecimento urbano e industrial; rega; produção de energia hidroeléctrica; navegação; recreio e utilização paisagística; piscicultura e, por fim, controlo de cheias. O controlo de cheias é o objecto de estudo do presente trabalho.

Em países como Portugal Continental, com elevada variabilidade dos caudais fluviais, a utilização de água superficial pressupõe a existência de reservatórios que permitam armazenar água por forma a disponibilizar os volumes a satisfazer para os diferentes usos ao longo do tempo. Em determinadas linhas de água e em certos regimes de escoamento, pode obrigar ao controlo de cheias, através da retenção de água, tendo como consequência o amortecimento do caudal de ponta de cheia.

Em Portugal Continental existem 236 barragens monitorizadas pelo Instituto da Água.

A efectivação do Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroeléctrico (PNBEPH) iniciado em 2007, a Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB) constituída em 1948, bem como o novo Regulamento de

Segurança de Barragens (RSB), publicado pelo Decreto-Lei n.º 344/2007 estabelecem que os reservatórios são fundamentais para uma adequada gestão das águas, nomeadamente para o abastecimento doméstico e público, a rega, o controlo de cheias, a produção de energia, as actividades turísticas e industriais e a navegação.

Salienta-se que o Reservatório de Magos ao abrigo do novo Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) impõe ao dono da obra e às entidades responsáveis pela exploração de barragens, neste caso a Associação de Regantes do Vale do Sorraia, um vasto conjunto de obrigações no que respeita à gestão do risco no vale a jusante da barragem, dado que a Barragem de Magos tem uma altura superior a 15 m e capacidade superior a 100000 m³.

O RSB, no seu artigo 12º, exige o estudo das cheias induzidas, uma vez que obriga a que o projecto inclua o estudo dos riscos potenciais induzidos pelo aproveitamento. Este estudo deve ser elaborado tendo em conta a definição dos critérios de dimensionamento e as regras de operação, servindo de base ao planeamento de medidas de protecção civil.

1.2 Objectivos e Metodologia do Trabalho

1.2.1 Objectivos

Pretende-se neste trabalho definir as regras de operação, nomeadamente restrições na descarga do Reservatório de Magos para controlo de cheias no troço a jusante da Barragem de Magos. Neste trabalho, estuda-se o Reservatório de Magos, porque pertence à bacia hidrográfica do Tejo caracterizada por sucessivos eventos de cheias.

Neste trabalho, desenvolve-se o modelo de simulação *HEC-ResSim 3.0* aplicado ao Reservatório de Magos, por forma a facilitar a aplicação do modelo pelo utilizador.

1.2.2 Metodologia

A Barragem de Magos está implantada na Ribeira de Magos, afluente da margem esquerda do rio Tejo, e encontra-se localizada no Concelho de Salvaterra de Magos. Construída a barragem em 1938, o reservatório tem uma capacidade total de 3384 dam³ com os principais usos a rega e o controlo de cheias.

A metodologia aplicada começa por usar o modelo hidrológico *HEC-HMS 3.1.0* para determinar o hidrograma de cheia na secção da Barragem de Magos para um período de retorno igual a 100 anos. O modelo hidráulico *HEC-RAS 3.1.3* é posteriormente aplicado na modelação hidráulica do troço a jusante da barragem e na delimitação da zona inundável para o cenário de não existência da barragem, equivalente ao cenário em que o reservatório tem a cota da superfície livre igual ao Nível de Máxima Cheia (NMC), não permitindo o amortecimento da ponta de cheia.

De seguida é definida com a aplicação do modelo hidráulico *HEC-RAS 3.1.3* a delimitação máxima aceitável da zona inundável no troço a jusante da barragem, por forma a minimizar danos nos terrenos adjacentes e é determinado o caudal que lhe dá origem.

Com base nos resultados anteriores são definidas as regras de operação. O modelo de simulação de reservatórios *HEC-ResSim 3.0* é aplicado para simular o balanço da água

no Reservatório de Magos com o objectivo de analisar o resultado da aplicação das regras de operação para controlo de cheias no troço a jusante da barragem.

Os modelos *HEC-HMS 3.1.0* e *HEC-RAS 3.1.3* estão associados ao sistema de informação geográfica *ArcView GIS 3.2*. São aplicadas as extensões *HEC-GeoHMS 1.1* e *HEC-GeoRAS 3.1* que permitem processar dados geométricos no modelo *ArcView GIS 3.2*.

A extensão *HEC-GeoHMS 1.1* permitiu a delimitação da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos e o traçado da linha de água principal da Ribeira de Magos, e a preparação dos dados hidrológicos para posteriormente determinar o caudal de ponta de cheia e o hidrograma de cheia afluente ao Reservatório de Magos com o modelo hidrológico *HEC-HMS 3.1.0*.

Com a extensão *HEC-GeoRAS 3.1* criou-se os ficheiros geométricos, linha de água principal, linhas de escoamento, margens e secções transversais que importados para o modelo hidráulico *HEC-RAS 3.1.3*, permitiram delimitar as zonas inundáveis no troço a jusante do Reservatório de Magos.

Finalmente, o modelo *HEC-ResSim 3.0* foi aplicado ao Reservatório de Magos para simular o balanço de água no reservatório, tendo em conta as regras de operação previamente definidas para o Reservatório de Magos, de modo a garantir o controlo de cheias no troço a jusante do Reservatório de Magos.

A simulação do balanço de água com base nas regras de operação do Reservatório de Magos para controlo de cheias calcula a evolução temporal do volume armazenado, da cota da superfície livre, e do caudal afluente e descarregado no Reservatório de Magos.

1.3 Estrutura do Texto

O trabalho encontra-se organizado em seis capítulos. O presente capítulo, introdutório, é dedicado à justificação do trabalho, ao seu enquadramento geral e específico e à apresentação dos objectivos e metodologia do trabalho.

No capítulo 2 são apresentadas as bases teóricas, as potencialidades do modelo de simulação *HEC-ResSim 3.0* e a revisão bibliográfica.

No capítulo 3 apresenta-se a caracterização geomorfológica da Ribeira de Magos e da sub-bacia hidrográfica na secção da Barragem de Magos. É, ainda, apresentado o enquadramento do Plano de Ordenamento da Albufeira de Magos.

No capítulo 4 apresenta-se o estudo hidrológico da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da barragem, aplicando o *HEC-HMS 3.1.0*. e o estudo hidráulico do troço a jusante da barragem, aplicando o *HEC-RAS 3.1.3*. Apresenta-se a metodologia para delimitação das zonas inundáveis e são deduzidas as regras de operação do Reservatório de Magos para controlo de cheias.

No capítulo 5 é aplicado o modelo *HEC-ResSim* para simular o comportamento do Reservatório de Magos do ponto de vista de controlo de cheias no troço a jusante da Barragem de Magos.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e são propostos trabalhos futuros que poderão dar continuidade a este trabalho.

2. Modelo de Simulação de Reservatórios *HEC-ResSim 3.0*

2.1 Conceitos Teóricos da Simulação do Balanço de Água em Reservatórios

Neste capítulo será apresentado o modelo de simulação de reservatórios *HEC-ResSim 3.0* por, normalmente, não fazer parte dos programas de ensino universitário em Portugal e, no entanto, ser uma ferramenta que complementa a aplicação dos modelos *HEC-HMS* e *HEC-RAS* no caso de existência de reservatórios.

A variação do volume armazenado num dado intervalo de tempo e num reservatório finito estima-se a partir do balanço de água aplicado ao reservatório, equação 2.1.

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - D_t - E_t - L_t \quad (2.1)$$

com a restrição

$$0 \leq S_{t+1} \leq C$$

onde:

S_{t+1} - Armazenamento no reservatório no fim do intervalo Δt , (m^3);

S_t - Armazenamento no reservatório no início do intervalo Δt , (m^3);

Q_t - Volume afluente no intervalo Δt , (m^3);

D_t - Volume efluente do reservatório no intervalo Δt , (m^3);

E_t - Perda por evaporação no intervalo Δt , (m^3);

L_t - Outras perdas de água no reservatório, (m^3);

C - Volume útil + volume de amortecimento de cheia, (m^3).

O balanço de água é aplicado normalmente para um intervalo de tempo igual a um mês ($\Delta t = 1\text{mês}$) podendo, no entanto, ser aplicado a intervalos de tempo inferior desde que estejam disponíveis dados.

A precipitação sobre o espelho de água é considerada integrada no volume afluente.

A perda por evaporação é a diferença entre a evaporação no futuro reservatório e o défice de escoamento na superfície imersa pelo reservatório, dependendo da área da superfície livre no intervalo considerado. Geralmente, não são consideradas outras perdas para além da evaporação, por serem comparativamente pequenas.

Para dimensionamento do volume de amortecimento de cheia, o modelo *HEC-ResSIM*

3.0. aplica a metodologia da simulação adoptada por McMahon *et al.* (1978):

- Selecciona-se um volume de armazenamento do reservatório igual ao volume útil, C (assumindo que o volume de amortecimento de cheia é nulo) e admite-se que se encontra inicialmente cheio, isto é, $S_0 = C$;
- Aplica-se o balanço de água para o intervalo de tempo pretendido e para o hidrograma de cheia de projecto afluente;
- Estima-se a garantia para o controlo de cheias (eq. 2.2);
- Se a garantia não for aceitável arbitra-se um valor superior para o volume C e repete-se o procedimento. O incremento do volume varia de acordo com as características do reservatório e do regime de escoamento na linha de água.

Um critério probabilístico para definir a garantia passa pela identificação da variável à qual seja possível associar uma função de distribuição de probabilidades, de modo a ser possível promover inferência estatística (Almeida *et al*, 2008).

A definição, mais utilizada pelos técnicos e investigadores, de garantia de um reservatório (G) é representada pela percentagem do número de anos durante os quais o controlo de cheias é completamente satisfeito e o número total de anos do período de estudo (McMahon *et al*, 1978), Equação 2.2.

$$G = 1 - \left(\frac{N_r}{N_t} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

onde:

N_r - Número de anos em que existem restrições ao controlo de cheias;

N_t - Número total de anos do período de estudo.

Calculados os diferentes volumes testados e a respectiva garantia é ajustada a função probabilística que melhor represente os dados calculados. Com base na função de distribuição probabilística teórica é determinado o volume de amortecimento de cheia para a garantia pretendida.

Na aplicação do estudo da definição de regras de operação para controlo de cheias a jusante de um reservatório foram consideradas as seguintes hipóteses simplificativas:

1. O reservatório encontra-se inicialmente cheio (O reservatório apresenta um nível de água igual ao nível de pleno armazenamento);

2. A análise do registo do hidrograma de cheias afluente ao reservatório baseia-se no hidrograma de cheia calculado com base no Método do *Soil Conservation Service*.

O procedimento da metodologia de simulação do balanço de água no reservatório para definição das regras de operação integra as características do hidrograma de cheia afluente, da descarga com base nas regras de operação mostrando o comportamento do armazenamento. Pode aplicar-se a dados com uma duração qualquer do intervalo de tempo e integra a modelação de regras de operação, mesmo que complicadas (Santos, 1992).

2.2 Descrição do Modelo HEC-ResSim 3.0

O modelo *HEC-ResSim 3.0 (Reservoir System Simulation)* foi desenvolvido por Joan D. Klipsch e Marylin B. Hurst no *Hydrologic Engineering Center*, que é uma divisão do *Institute for Water Resources (IWR)*, U. S. Army Corps of Engineers (USACE).

O *HEC-ResSim* é o modelo sucessor do *HEC-5, Simulation of Flood Control and Conservation Systems*. A primeira versão do *HEC-ResSim* foi facultada ao público em 2002 e a segunda versão em Setembro de 2003 tendo sido em Abril de 2007 apresentada a última versão, conhecida por *HEC-ResSim 3.0*. O modelo é de domínio público, divulgado livremente na Internet pela agência governamental americana, autora do modelo (<http://www.hec.usace.army.mil>).

Neste trabalho será utilizada a última versão disponível do modelo de simulação, o *HEC-ResSim 3.0*, para simular o balanço de água com as regras de operação do Reservatório de Magos para controlo de cheias.

Este modelo é leccionado nas universidades em diferentes níveis académicos, são realizados estudos e projectos recorrendo a este modelo quer a nível nacional quer a nível internacional com especial destaque, nos Estados Unidos da América, Brasil e China (Wei and Hsu, 2007).

O *HEC-ResSim 3.0* é um modelo composto por uma interface gráfica de usuário, um modelo computacional para simular o balanço de água em reservatórios, nomeadamente controlo de cheias, com capacidade de gestão, armazenamento de dados, relatórios e gráficos.

O *HEC-ResSim 3.0* foi desenvolvido para utilização de engenheiros e projectistas na realização de estudos e projectos na área dos recursos hídricos, permitindo estimar o balanço de água e definir regras de operação para controlo de cheias que permitam gerir os reservatórios em tempo real no dia-a-dia e em operações de emergência.

O modelo pode ser aplicado na gestão de redes de reservatórios permitindo gerir os volumes de água para os diferentes usos: o abastecimento de água às populações, a rega, o controlo de cheias, a produção de energia, as actividades turísticas e industriais e a navegação. Neste trabalho foi aplicado para o controlo de cheias.

O modelo *HEC-ResSim 3.0* permite incluir vários reservatórios, descarregadores e outras estruturas hidráulicas, um esquema de operações que traduz os objectivos de funcionamento do reservatório e respectivas restrições e, por fim, um conjunto de tipos de regras de operação como sejam: as condições de descarga e restrições; as condições de controlo a jusante; a curva de vazão ou a cota topográfica do reservatório; as condições de uma central hidroeléctrica; as operações de descarregadores de cheias.

A operação de múltiplos reservatórios com controlo a jusante, incluindo o balanço de volume de água armazenado permite construir alternativas para uma ampla análise de cenários. O passo de cálculo da simulação adoptado pode ser de 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 3 horas, 6 horas, 12 horas a 1 dia. São criados relatórios com os dados obtidos de todos os elementos constituintes da rede de reservatórios tendo em atenção as regras de operação seleccionadas, bem como as alternativas analisadas. O utilizador pode optar por uma tabela com a descrição de todos os elementos ou por uma tabela por cada elemento do reservatório.

Além das potencialidades acima descritas, o modelo de simulação *HEC-ResSim 3.0* permite importar ficheiros em formato *shapefile* do modelo *ArcGIS* e ficheiros em formato *dxf* do modelo *AutoCAD*. Estes ficheiros permitem ao utilizador do modelo representar as características físicas do reservatório com maior exactidão.

O *HEC-ResSim 3.0* é composto por três módulos que permitem ter acesso às condições de funcionamento do reservatório; Módulo da Bacia Hidrográfica, Módulo do Reservatório e Módulo da Simulação. Cada módulo tem o seu objectivo e um conjunto

de funções associadas que são acessíveis através de menus, barra de ferramentas e elementos esquemáticos (Klipsch and Hurst, 2007).

2.2.1 Módulo Bacia Hidrográfica

Neste módulo são criados e definidos os elementos que caracterizam a bacia hidrográfica, incluindo as estruturas hidráulicas implantadas (ex: reservatórios, diques, confluências, etc.).

O módulo da bacia hidrográfica pode incluir toda a rede hidrográfica, bem como as estruturas hidráulicas associadas, as áreas de impacto, a localização das estações hidrométricas, os dados hidrológicos e hidráulicos da área em estudo.

Neste módulo, pode-se ainda, agregar os elementos que descrevem a disposição física da bacia hidrográfica, importar a imagem de fundo representativa da zona de estudo, especificar a unidade de medida de visualização da bacia, indicar o sentido do escoamento e das estruturas hidráulicas e outros dados georreferenciados.

Este módulo possui ferramentas que permitem criar e definir graficamente os elementos da bacia e estruturas hidráulicas, podendo o utilizador renomear e modificar a representação dos elementos físicos da bacia a qualquer momento da aplicação do modelo.

É necessário apresentar as três cotas características; a cota mínima de exploração (Nme) (correspondente ao volume morto), a cota de pleno armazenamento (NPA) (correspondente ao volume útil, acima da cota mínima de exploração) e a cota de máxima cheia (NMC) (correspondente ao volume de amortecimento de cheia, acima da cota de pleno armazenamento).

As regras de operação representam os objectivos e as restrições nas descargas. As regras podem ser aplicadas nos diferentes níveis que caracterizam o reservatório.

Podem definir-se várias regras de operação para o reservatório e grupo de descarregadores. Existem diferentes tipos de regras estabelecidas, dependendo estas, do objectivo de aplicação das regras de operação ao reservatório.

Outros factores que influenciam as regras de operação de um reservatório são: a época do ano, as condições hidrológicas, a temperatura da água, o nível de água no reservatório e as operações simultâneas de outros sistemas de reservatórios.

Cada tipo de regra de operação apresenta um conjunto de opções, nomeadamente:

- No caso de aplicação à barragem (e órgãos hidráulicos) as regras podem ser as seguintes: função de descarga, função do volume de encaixe de cheias;
- No caso de aplicação a um aproveitamento hidroeléctrico as regras podem ser; função da descarga, função do volume de encaixe de cheias, função dos requisitos da central hidroeléctrica, nomeadamente o registo da série de escoamentos, a curva característica da turbina e o sistema de horários;

- No caso de aplicação a uma bomba, a regra que pode ser aplicada é a programação do arranque das bombas.

O módulo do Reservatório fica concluído quando é criada a alternativa que consiste na selecção da rede de reservatórios, do conjunto de regras de operação e do registo das séries de escoamento.

2.2.3 Módulo Simulação

Após a introdução de todos os dados necessários e criada a alternativa escolhida para as regras de operação pode realizar-se a simulação.

No Módulo Simulação é necessário especificar o tempo e duração da simulação, o intervalo de cálculo e o registo da série de escoamento a ser analisada.

Após a simulação, pode analisar-se os resultados, fazer as revisões e realizar simulações adicionais para avaliar qual o melhor comportamento do reservatório face ao impacto das regras de operação seleccionadas.

Relativamente aos resultados da simulação são criadas várias tabelas e gráficos com os dados de saída (especificando valores médios, máximos e mínimos) para cada um dos parâmetros analisados relativos ao:

- Reservatório: o volume armazenado, a cota da superfície livre, o caudal descarregado associado a uma descarga controlada ou não controlada;

- Caudal: o caudal controlado, o caudal não controlado e o caudal acumulado numa secção de referência;
- Energia Eléctrica: consumo e produção relativa às bombas e turbinas;
- Comporta: grau de abertura;
- Zona de armazenamento; o nível mínimo de exploração, o nível de pleno armazenamento e o nível de máxima cheia;
- Regras de operação: a data e hora, a cota da zona de armazenamento, o caudal afluente ao reservatório, o caudal mínimo descarregado na barragem, o caudal descarregado pela estrutura hidráulica não controlada na barragem, e por fim, o caudal descarregado por estrutura controlada.

2.3 Potencialidades do modelo HEC-ResSim 3.0

O modelo de simulação de reservatório *HEC-ResSim 3.0* é uma ferramenta com potencialidades na modelação de regras de operação num reservatório.

Os dados de entrada ao serem criados e editados no modelo são visualizados automaticamente, o que permite ao utilizador verificar se a introdução de dados está correcta.

O modelo *HEC-ResSim 3.0* fornece uma visão bastante real do reservatório ou de uma rede de reservatórios, através de um mapa esquemático baseado num conjunto de ferramentas de desenho.

O *HEC-ResSim 3.0* permite ao utilizador descrever os diferentes níveis do reservatório podendo o utilizador seleccionar várias estruturas hidráulicas. Estas estruturas são caracterizadas por realizarem descargas controladas e descargas não controladas.

É possível adicionar ao reservatório a localização e as características da central hidroeléctrica e das máquinas hidráulicas, bem como saber qual a produção e consumo de energia.

O *HEC-ResSim 3.0* possibilita estudar várias hipóteses de regras de operação com diferentes funções de descarga, para uma adequada gestão das águas.

No modelo *HEC-ResSim 3.0* é possível estabelecer a ordem prioritária das estruturas hidráulicas para descarga, e obter o relatório com as variáveis aplicadas tornando possível modelar sistemas cada vez mais complexos e com mais requisitos operacionais (USACE, 2007).

2.4 Revisão Bibliográfica

As regras de operação de reservatórios, nomeadamente no controlo de cheias, são apresentadas na literatura técnica especializada de que se destacam as principais revisões do estado da arte: Yeh (1985), Simonovic (1992), Wurbs (1993), Labadie (2004) e Lima e Lanna (2005).

Estas publicações descrevem as aplicações dos diferentes métodos de optimização da operação dos reservatórios como sejam: a programação linear (PL), a programação não

linear (PNL) a programação dinâmica (PD) e a aplicação mais recente dos métodos eurísticos (algoritmos genéticos, redes neurais e lógica fuzzy). No entanto, em qualquer destas publicações é referida a importância da aplicação da simulação para verificar e afinar os resultados.

Simonovic (1992) destaca o interesse dos utilizadores de reservatórios em modelos de elevado alcance, e fáceis de usar para que seja possível a adopção, a modificação e a execução de várias situações em tempo real, em interface interactiva do modelo com o usuário. Por outro lado também é importante criar ferramentas que permitam obter o resultado de cenários operacionais em tempo real e com recursos computacionais com consumo razoável de tempo e que permitam melhorar o desempenho do sistema às decisões operacionais anteriores.

Wurbs (1993) analisa vários tipos de modelos de simulação e optimização. O autor realça a importância de ter em conta o ambiente computacional, a disponibilidade e operacionalidade de modelos generalizados, a interpretação e comunicação dos resultados, na selecção do modelo a aplicar.

Mais recente, Labadie (2004) e Lima e Lanna (2005) destacam a importância da combinação entre os métodos de optimização e simulação.

A tendência actual é a incorporação de rotinas de optimização dentro da simulação, por forma a optimizar a disponibilidade da água a cada instante.

As técnicas de simulação pretendem representar um sistema físico real e tentam estimar o funcionamento do reservatório sob um determinado conjunto de condições ou regras pré-estabelecidas, que possa ser formulado matematicamente (Wurbs, 1993).

A simulação da operação de reservatórios consiste em aplicar, a um intervalo de tempo, o balanço de massa de água aos reservatórios, sendo especificadas as afluências ao reservatório, as características físicas do sistema e as regras de operação. Um modelo de simulação não representa directamente uma solução óptima (Simonovic, 1992). Para um problema de operação de reservatório para controlo de cheias é necessário simular várias vezes o sistema com regras de operação alternativas, por forma a obter a solução com melhor resultado.

Os modelos de simulação *HEC-3*, *HEC-5* e *HEC-ResSim* desenvolvidos pelo *Hydrologic Engineering Center – USA*, o *SIM - I* e o *SIM - II* do *Texas Water Systems*, o *ARB - Arkansas River Basin Model*, o *TVA* e o modelo *ACRES* têm sido amplamente utilizados por técnicos e investigadores de todo o mundo no planeamento de sistemas de recursos hídricos, nomeadamente os reservatórios.

É necessário ter em atenção que não existe um algoritmo único para resolver todos os problemas sobre regras de operação de reservatório, nomeadamente para controlo de cheia (Yeh, 1985; Labadie, 2004; Lima e Lanna, 2005).



3. Caracterização do Reservatório e da Bacia Hidrográfica da Ribeira de Magos na Secção da Barragem de Magos

3.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a localização e caracterização geomorfológica da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos necessária à determinação do hidrograma de cheia afluente ao Reservatório de Magos para um dado período de retorno. O caudal afluente ao Reservatório de Magos, para um dado evento, é parâmetro de entrada no balanço de água para definição das regras de operação a implementar para uma dada garantia de controlo de cheias no troço a jusante do Reservatório de Magos. São, ainda, apresentadas as características da Barragem e do Reservatório de Magos,

3.2 Enquadramento Geográfico

A bacia hidrográfica da Ribeira de Magos, afluente da margem esquerda do rio Tejo, na secção da Barragem de Magos está localizada entre 39° 03' N e 38° 56' N de latitude e 8° 29' W e 8° 41' W de longitude, e apresenta uma orientação dominante de Este-Oeste, Figura 1.

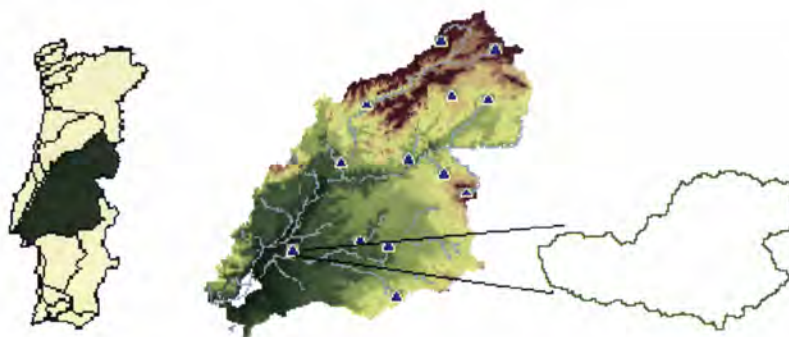


Figura 1 – Bacia Hidrográfica do Rio Tejo e pormenor da Bacia Hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos (adaptada do INAG).

O Reservatório de Magos entrou em funcionamento em 1938 e tem como principal uso a rega de uma área de 535 ha e o controlo de cheias a jusante. O Reservatório enquadra-se no Aproveitamento Hidroagrícola do Vale Sorraia, do qual fazem parte a Barragem de Montargil na Ribeira de Sôr, a Barragem de Maranhão na Ribeira de Seda e os Açudes do Gameiro e Furadouro na Ribeira de Raia.

3.3 Caracterização do Reservatório de Magos

3.3.1 Descrição das Estruturas Hidráulicas

A Barragem de Magos é uma barragem de terra que apresenta uma altura acima da fundação de 17 m e uma altura da barragem acima do terreno natural de 15 m. O coroamento tem um desenvolvimento de 400 m, com cota de coroamento de 23 m e uma largura de 5 m.

Em relação aos órgãos de descarga, a descarga de fundo em conduta sob o aterro, apresenta uma capacidade de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ controlado a montante por duas comportas planas. O descarregador de cheias em canal de encosta, localiza-se na margem esquerda, com a

cota da crista da soleira a 16,18 m, com o desenvolvimento da soleira de 17,9 m controlado por nove comportas planas de madeira e apresenta caudal máximo descarregado de $110 \text{ m}^3/\text{s}$, sem bacia de dissipação de energia.

O Reservatório de Magos apresenta a cota do nível de máxima cheia (NMC) de 21,50 m, a cota do nível de pleno armazenamento (NPA) de 19,02 m e a cota do nível mínimo de exploração (NmE) de 8,20 m. A área inundada para o nível de pleno armazenamento é de 124 ha, com a capacidade total de armazenamento igual a 3384 dam^3 , a capacidade útil igual a 3000 dam^3 e o volume morto de 384 dam^3 . O volume de encaixe de cheia é de 3075 dam^3 . A profundidade média é de cerca de 4 m.

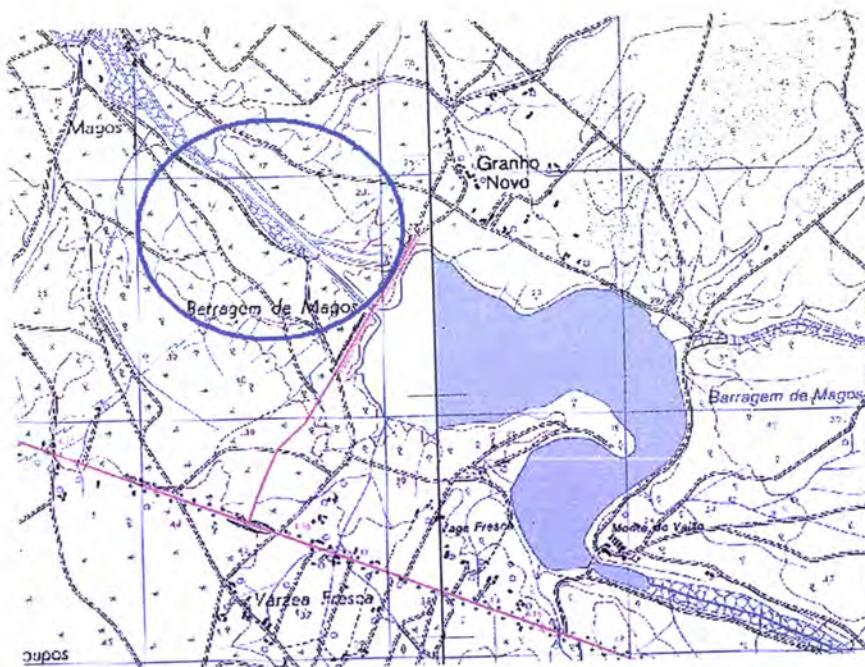


Figura 2 – Planta do Reservatório de Magos.

3.3.2 Informação Disponível

Foram utilizadas as cartas militares de Portugal Série M888, folha 377 (Azambuja), folha 378 (Raposa - Almeirim), folha 391 (Benavente), folha 392 (Coruche) e a folha 393 (Vila Nova de Erra - Coruche) do Instituto Geográfico do Exército à escala 1/25 000 como elementos cartográficos, as cartas de solos nº 377, nº 378, nº 391, nº 392 e a nº 393 à escala 1/25 000, da Direcção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural, as cartas de ocupação do solo (COS'90) nº 377, nº 378, nº 391, nº 392 e a nº 393 à escala 1/25 000 do Instituto Geográfico Português e a altimetria da zona em estudo, incluindo o troço da Ribeira de Magos a jusante da barragem, à escala 1/10 000.

Não foi aplicada a carta da ocupação do solo Corine Land Cover 2006 - CLC2006 apesar de ser mais recente que a COS'90, por ter sido criada à escala de 1/100 000 para Portugal Continental, enquanto a COS'90 apresenta uma escala de 1/25 000.

Relativamente à caracterização das precipitações intensas, foram aplicadas as curvas IDF (Intensidade-Duração-Frequência) do Posto Udográfico de Portalegre (18M/01), $I = 287,78t^{-0,404}$, $I = 884,39t^{-0,739}$ e $I = 392,58t^{-0,603}$ para duração da chuvada de 5-30 minutos, 30 minutos-6 horas e 6-48 horas, respectivamente, Brandão et al, 2001. Este é o posto udográfico mais perto da bacia hidrográfica e que melhor representa as precipitações intensas sobre a bacia hidrográfica da Ribeira de Magos.

3.4 Usos da Albufeira de Magos

O Plano de Ordenamento da Albufeira de Magos - POAM (Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2008), teve como ponto de partida a Resolução do Conselho de Ministros n.º 135/2001 de 23 de Agosto onde se fixou os usos e regimes de gestão compatíveis com a utilização sustentável dos recursos hídricos.

O Reservatório de Magos, reservatório de águas públicas, tem como uso principal a rega de campos agrícolas (Decreto Regulamentar n.º 2/88).

A nível local, o reservatório constitui-se como um importante recurso para a rega e controlo de cheias a jusante da Barragem de Magos, minimizando os caudais afluentes à bacia hidrográfica do rio Tejo, caracterizada por recorrentes episódios de cheias.

3.5 Caracterização Geomorfológica

Apresenta-se a caracterização geomorfológica da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção de referência relativa à Barragem de Magos, nomeadamente a forma, o relevo e a densidade de drenagem, bem como a caracterização física, nomeadamente o solo e o coberto vegetal que condicionam os processos de retenção de água na bacia e no solo para determinar o hidrograma de cheia afluente ao Reservatório de Magos, elemento importante para a modelação hidrológica.

3.5.1 Forma da Bacia Hidrográfica

A Ribeira de Magos é um afluente directo da margem esquerda do rio Tejo, com a classificação decimal de 301 23 apresentando um comprimento de 34,3 km e a área de drenagem de 206 km².

A Ribeira de Magos apresenta um comprimento até à secção da barragem de 26,9 km e a sua bacia hidrográfica na secção de implantação da Barragem de Magos tem a área de 105,5 km² e o perímetro de 78,5 km.

A bacia apresenta um coeficiente de compacidade, k_c igual a 1,87 e possui um factor de forma, k_f de 0,15, sabendo que quanto maior for o coeficiente de compacidade e quanto menor for o factor de forma, maior será o tempo de concentração da bacia hidrográfica, o que permite concluir que a bacia hidrográfica da Ribeira de Magos, quando comparada a outras bacias com a mesma área, é caracterizada por moderada tendência para a ocorrência de cheias.

3.5.2 Caracterização do Relevo

O relevo da bacia hidrográfica é um importante factor em conta, pois controla a velocidade do escoamento superficial e por conseguinte, o tempo de concentração influenciando o caudal de ponta de cheia a maior ou menor oportunidade de infiltração e a susceptibilidade à erosão dos solos na bacia hidrográfica da Barragem de Magos.

A Figura 3 apresenta o relevo característico da bacia hidrográfica da Barragem de Magos obtida com base no modelo digital do terreno desenvolvido no sistema de informação geográfica *ArcView GIS 3.2*.

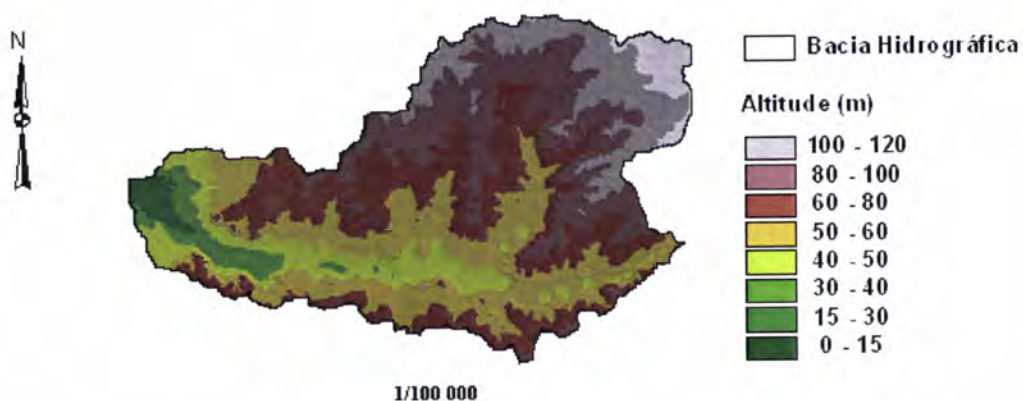


Figura 3 – Carta hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos.

Conclui-se que a bacia hidrográfica apresenta uma altitude máxima de 120 metros e uma altitude mínima de 8 metros, na secção de referência, sendo a altitude média da bacia de 70 m.

Com o histograma da Figura 4, obtido a partir do modelo de elevação digital (*DEM*) verifica-se que o declive médio da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos é de 3,3 %.

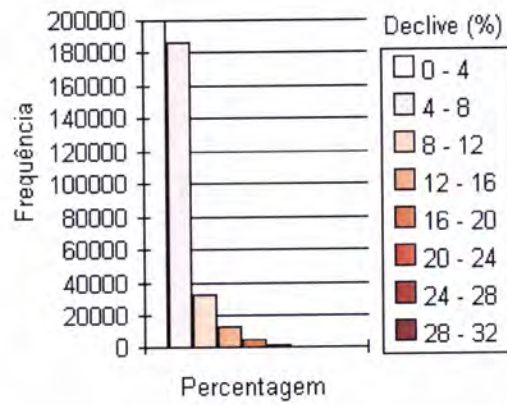


Figura 4 – Histograma das classes de declive da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos.

O tipo de relevo da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos foi analisado com base na classificação apresentada na Tabela 1 (Costa e Lança, 2001).

Tabela 1 – Tipo de relevo (Costa e Lança, 2001).

Tipo de Relevo	Declive (%)
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

A partir do valor do declive obtido na análise do histograma e com base na classificação apresentada na Tabela 1, caracteriza-se o relevo existente na bacia hidrográfica da Ribeira de Magos como levemente ondulado, o que permite afirmar que a bacia hidrográfica da Ribeira de Magos apresenta um relevo que favorece a infiltração,

indicador de velocidade de escoamento menor, e por conseguinte um aumento do tempo de concentração, condicionando o caudal de ponta de cheia.

3.5.3 Caracterização do Solo

Existe uma interacção estreita entre o relevo de uma bacia hidrográfica e o tipo de solo com a distribuição e o movimento da água na bacia. A maior ou menor velocidade do escoamento superficial irá condicionar o caudal de ponta de cheia na bacia, e também os fenómenos de erosão.

Na Figura 5 apresenta-se a carta de solos da bacia hidrográfica da Barragem de Magos que teve como base a carta de solo da Direcção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural (DGADR), na Tabela 2 representa-se a distribuição da área pelo tipo de solo.

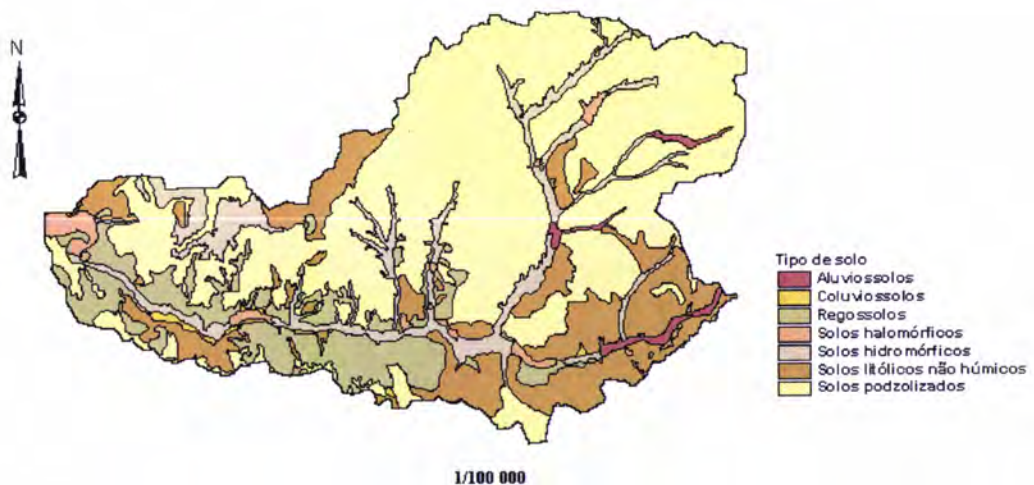


Figura 5 – Carta de solos da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos (adaptada de DGADR).

Tabela 2 – Distribuição dos solos na bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos.

Tipo de Solo	Área (%)
Aluviossolos	0,6
Coluviossolos	0,2
Regossolos	11,2
Solos Halomórficos	1,0
Solos Hidromórficos	5,1
Solos Litólicos Não Húmicos	18,8
Solos Podzolizados	63,1

Conclui-se que cerca de 63% da área da bacia hidrográfica apresenta solo podzolizado, nomeadamente com surraipa (Ppt). Este solo apresenta textura muito ligeira, predominando as fracções de areia grossa e fina. A expansibilidade do solo é nula, a capacidade de campo quase sempre muito baixa, e a permeabilidade é frequentemente muito elevada (Cardoso, 1965).

De acordo com a classificação internacional *Soil Conservation Service (SCS)* são considerados para a obtenção do número de escoamento (que depende do tipo hidrológico do solo, da sua utilização e das condições de humidade) quatro grupos hidrológicos de solos (Soil Survey Staff, 1951).

O grupo hidrológico pode ser relacionado com a granulometria do solo com base no ábaco triangular de classificação textural e na sua versão modificada para determinação do grupo hidrológico (Soil Survey Staff, 1960).

O grupo hidrológico predominante na bacia hidrográfica da Barragem de Magos é o grupo B (Figura 6) que abrange aproximadamente 69% da área total da bacia, Tabela 3. Conclui-se que a bacia é constituída na sua maioria por solos com intensidades de infiltração moderadas, o que permite afirmar que o solo na bacia hidrográfica da Ribeira de Magos apresenta escoamento superficial abaixo da média, condicionando o tempo de

concentração, e por conseguinte o caudal de ponta de cheia na bacia, e os fenómenos de erosão.

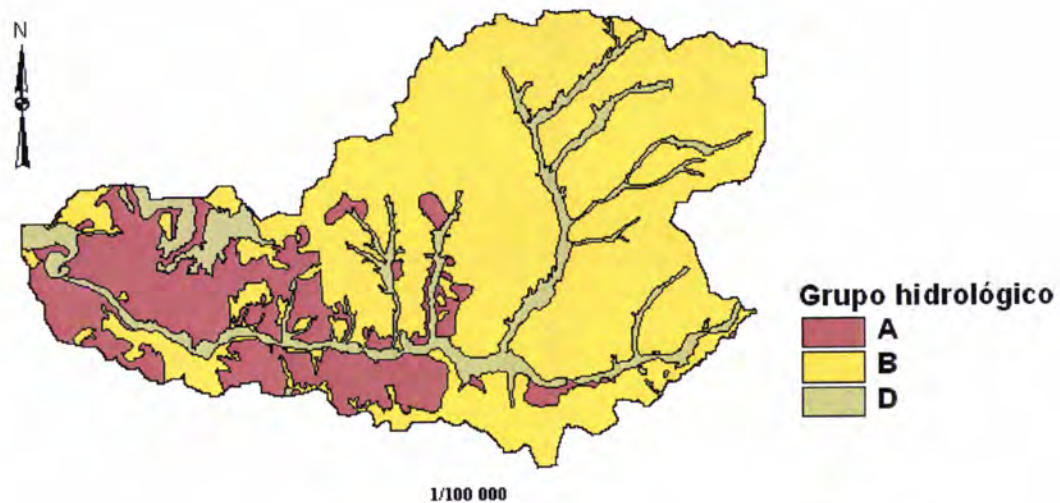


Figura 6 – Grupo hidrológico do solo da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos (adaptada de DGADR).

Tabela 3 – Grupo hidrológico da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos.

Grupo Hidrológico	Área (%)
A	18,1
B	68,9
D	13,0

3.5.4 Ocupação do Solo

A ocupação do solo de uma bacia hidrográfica tem especial interesse na análise dos fenómenos hidrológicos que ocorrem na bacia, uma vez que esta condiciona o escoamento superficial e a infiltração.

A classificação da ocupação do solo, Figura 7, teve como base a Carta de Ocupação do Solo – COS'90, facultada pelo site do Instituto Geográfico Português. A ocupação de solo predominante na bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de

Magos é a ocupação de floresta, com 73% da área total, Tabela 4, e quanto maior a área de floresta, sobretudo nas encostas, maior será o tempo de concentração da bacia hidrográfica, o que permite afirmar que a bacia hidrográfica é caracterizada por moderada tendência para reunir volume de águas à superfície, condicionando o caudal de ponta de cheia.

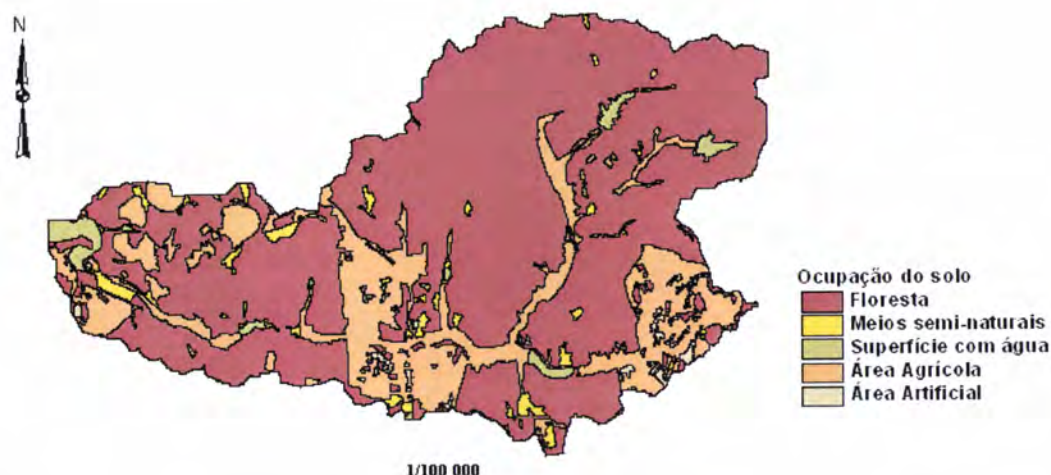


Figura 7 – Ocupação do solo da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos (adaptada de IGP).

Tabela 4 – Ocupação do solo da bacia hidrográfica da Barragem de Magos.

Ocupação de Solo	Área (%)
Floresta	73,3
Meios semi-naturais	2,7
Superfície com água	1,9
Área agrícola	20,9
Área artificial	1,2

3.5.5 Número de Escoamento

O número de escoamento (curve number) a considerar será calculado pela média ponderada com a área dos números de escoamento que representam os diferentes tipos e ocupação do solo (Lencastre e Franco, 2003).

O número de escoamento foi atribuído com base na classificação do SCS, (Tabela 1 do Anexo II) obtendo-se o número de escoamento para os diferentes grupos hidrológicos e diferentes ocupações do solo da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos, Tabela 5.

Tabela 5 – Número de escoamento na bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da Barragem de Magos.

Grupo Hidrológico	Ocupação do Solo	Número de Escoamento
A	Floresta	25
	Meios semi-naturais	68
	Superfície com água	62
	Área agrícola	57
	Área artificial	0
B	Floresta	55
	Meios semi-naturais	79
	Superfície com água	71
	Área agrícola	72
	Área artificial	0
D	Floresta	77
	Meios semi-naturais	89
	Superfície com água	81
	Área agrícola	86
	Área artificial	0

Na determinação do caudal de ponta de cheia para um período de retorno igual a 100 anos considera-se, geralmente o solo bem humedecido, e utiliza-se o valor de *CN* para situações antecedentes particularmente húmidas – *AMCIII*, Tabela 2 do Anexo II (Lencastre e Franco, 2003).

Determina-se que o número de escoamento em *AMCII* ponderado sobre a bacia hidrográfica em estudo é de 73, e o *CN* em situações de *AMCIII* é de 87 (Tabela 3 do Anexo II), indicando que existe moderada capacidade de produção de escoamento à superfície do terreno.

3.5.6 Rede de Drenagem

3.5.6.1 Ordem dos Cursos de Água

Segundo o critério de *Strahler*, a ordem dos cursos de água é uma classificação que reflecte o grau de ramificação ou bifurcação existente na bacia hidrográfica (Lencastre e Franco, 2003). Abrange todos os canais naturais existentes que correspondam a cursos de água perene, intermitente ou efémero.

Segundo o critério de *Strahler* a linha de água principal tem ordem 3, numa representação à escala 1:25 000, Figura 8.

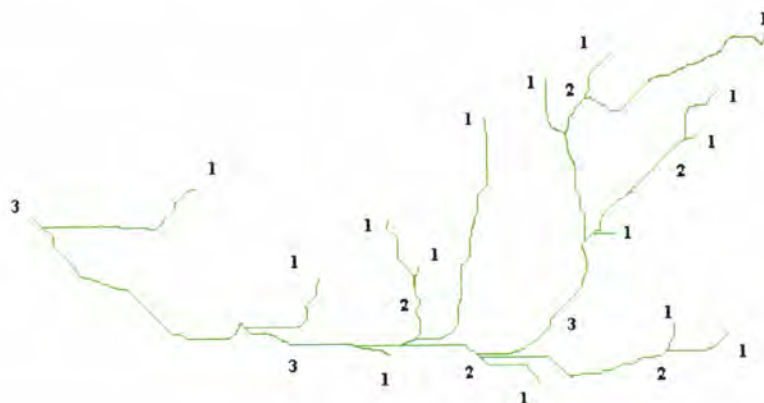


Figura 8 – Ordem de *Strahler* da rede hidrográfica da Ribeira de Magos até à secção da Barragem de Magos.

Conclui-se que a rede hidrográfica da Ribeira de Magos apresenta moderada tendência para o pico de onda de cheia, dada a ordem dos cursos de água da rede hidrográfica da Ribeira de Magos.

3.5.6.2 Linha de Água Principal

A linha de água principal apresenta um comprimento total de 26,9 km com um declive de 0,30 %, Figura 9.



Figura 9 – Rede hidrográfica a montante da Barragem de Magos, à escala 1/25 000.

3.5.6.3 Densidade de Drenagem

A densidade de drenagem constitui um índice da tendência para a ocorrência de cheias numa bacia hidrográfica. A densidade de drenagem varia directamente com a extensão do escoamento superficial, fornecendo uma indicação da eficiência da drenagem natural da bacia (Lencastre e Franco, 2003).

A Ribeira de Magos apresenta um índice $0,52 \text{ km/km}^2$, o que permite concluir que a bacia hidrográfica da Ribeira de Magos é uma bacia com drenagem regular, que em igualdade dos outros parâmetros apresenta moderada tendência para a ocorrência de cheias (Lencastre e Franco, 2003).

3.5.6.4 Tempo de Resposta da Bacia, t_{lag} ,

É um atributo característico das propriedades geomorfológicas da bacia hidrográfica, nomeadamente a extensão da bacia, a forma, a distribuição de relevo, a declividade, o comprimento do curso de água principal, a densidade de drenagem, o tipo e a ocupação do solo, entre outras.

Para o cálculo do tempo de resposta da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos da secção da Barragem de Magos, *basin lag*, aplicou-se a fórmula do *Soil Conservation Service (SCS)*:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 = \frac{25400}{87} - 254 = 37,95 \text{ mm} \quad (3.1)$$

$$t_{lag} = \frac{l^{0,8} \times (0,03937 \times S + 1)^{0,7}}{734,43 \times D^{0,5}} = \frac{26900^{0,8} \times (0,03937 \times 37,95 + 1)^{0,7}}{734,43 \times 3,30^{0,5}} = 4,97 \text{ h} \quad (3.2)$$

em que:

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

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

S - Perdas iniciais da precipitação (mm),

D - Declive médio da bacia hidrográfica (%),

CN - Número de escoamento (-).

Conclui-se que o tempo de resposta da bacia hidrográfica da Ribeira de Magos da secção da Barragem de Magos é de aproximadamente cinco horas.

3.5.6.5 Tempo de Concentração, t_c ,

O tempo de concentração da bacia hidrográfica é considerado, como uma característica constante da bacia hidrográfica, independentemente da característica da chuvada (Lencastre e Franco, 2003).

No presente trabalho admite-se que a duração da precipitação de chuvada com período de retorno de 100 anos é igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica – duração crítica – por forma a fazer intervir na análise a intensidade de precipitação que assegure a contribuição de toda a área da bacia para o escoamento na secção em estudo – precipitação crítica – e conseqüentemente, origine o mais elevado caudal de ponta de cheia para o período de retorno considerado.

No cálculo do tempo de concentração para a bacia hidrográfica da Ribeira de Magos da secção da Barragem de Magos, aplica-se a fórmula do *Soil Conservation Service (SCS)* (Lencastre e Franco, 2003).

$$t_c = 1,67 \times t_{lag} = 1,67 \times 4,97 = 8,30 \text{ h} \quad (3.3)$$

3.6 Relatório da Visita de Campo à Ribeira de Magos

Foi realizada uma visita à bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção da barragem de modo a verificar *in loco* a caracterização apresentada. Foi, ainda, feito o levantamento topográfico do troço da Ribeira de Magos a jusante da Barragem de Magos à escala 1/10 000.

Na visita ao local, realizada no dia 4 de Outubro de 2008, com o objectivo de proceder ao reconhecimento da Ribeira de Magos, constata-se que esta é delimitada desde a cabeceira até ao local da Barragem de Magos por zonas de ocupação esparsa que correspondem a edificações isoladas ou a núcleos de povoamento dispersos.

Observam-se áreas florestais e montados de Sobro, campos com áreas agrícolas: culturas anuais de sequeiro e de regadio. Junto às margens, encontram-se Eucaliptos, Pinheiros e Sobreiros, Figura 10 e 11. A fauna existente é rica e abundante, revelando que se está em presença de ambientes pantanosos através da existência de espécies como a Garça-branca, a Cegonha-branca, o Pato-real, a Lontra, o Milhafre-preto e a Rã-verde.

Verifica-se que a ocupação do solo da bacia hidrográfica da Barragem de Magos está de acordo com a representação da COS'90 e que a geomorfologia do troço a jusante do Reservatório de Magos.



Figura 10 – Reservatório de Magos.



Figura 11 – Galeria ripícola da Ribeira de Magos.

4. Estudo Hidrológico e Hidráulico da Ribeira de Magos num troço a jusante da Secção do Reservatório de Magos

4.1 Considerações Gerais

Neste capítulo estuda-se o comportamento hidráulico do troço a jusante da secção do Reservatório de Magos como resposta ao hidrograma de cheia na secção onde está implantada a barragem, para um cenário em que não existe barragem ou um cenário em que o reservatório está no seu nível de máxima cheia, pelo que é necessário descarregar o caudal afluente à secção como resposta do evento de precipitação extremo para um período de retorno de 100 anos.

Para definir as regras de operação do Reservatório de Magos para controlo de cheias, delimitou-se a zona inundável correspondente ao hidrograma de cheia afluente sem amortecimento. De seguida definiu-se a zona inundável máxima admissível, isto é, que não cause prejuízos gravosos de pessoas e bens e calculou-se o valor do caudal descarregado na barragem que inunda a zona inundável máxima admissível. Este caudal será considerado como o caudal máximo a descarregar, quando o nível de água no reservatório for inferior ao nível de máxima cheia.

4.2 Modelação Hidrológica

4.2.1 Introdução

Para o cálculo do hidrograma de cheia da Ribeira de Magos na secção em estudo é utilizado o modelo *HEC-HMS 3.1.0.* associado às extensões *Register and Transform*

Tool, Geoprocessing, 3D Analyst, Spatial Analyst e a extensão *HEC-GeoHMS 1.1.* do *ArcView GIS 3.2.*

Na preparação dos dados de entrada no modelo referido é necessário proceder a um conjunto de operações:

- Preparação do modelo digital do terreno (MDT) com base na sua altimetria;
- Transformação do modelo digital do terreno em modelo digital de elevação (MDE);
- Desenvolver cinco ficheiros de dados relativos às características da bacia hidrográfica (direcção de escoamento, acumulação de escoamento, definição da rede de drenagem, segmentação da rede de drenagem, delimitação da bacia hidrográfica);
- Desenvolver a rede hidrográfica e delimitação da bacia hidrográfica em formato vectorial.

O Modelo *HEC-HMS 3.1.0* é constituído por três componentes: (1) o Modelo de Bacia referente aos elementos hidrológicos da bacia e os parâmetros do escoamento (as sub-bacias, os troços do curso de água, as confluências, os reservatórios, as depressões, as fontes e as derivações); (2) o Modelo Meteorológico referente aos dados da precipitação e da evapotranspiração; e (3) as Especificações de Controlo que caracteriza o instante inicial, o instante final e o passo de cálculo da simulação do hidrograma de cheia afluente.

A caracterização das precipitações extremas na bacia hidrográfica da Ribeira de Magos é representada pelos registos no posto meteorológico de Portalegre, por ser o posto mais próximo.

Para um período de retorno igual a 100 anos (período de retorno utilizado no estudo de cheias), as constantes (características do local) da curva IDF são as apresentadas na Tabela 6. As curvas IDF são discretizadas, isto é, fragmentadas e simplificadas e são introduzidos pares de valores de duração da precipitação e correspondente intensidade de precipitação para transformar a precipitação em escoamento.

Tabela 6 – Constantes da curva IDF para o posto meteorológico de Portalegre e período de retorno de 100 anos (Fonte: Brandão et al, 2001).

Duração	A	B
05 mn - 30 mn	287,78	-0,4041
30 mn - 06 h	884,39	-0,7391
06 h - 48 h	392,58	-0,6030

4.2.2 Determinação do Caudal de Ponta de Cheia e do Hidrograma de Cheia

A aplicação do modelo HEC-HMS para os dados, nomeadamente a área, as perdas iniciais da precipitação, o número de escoamento, o tempo de resposta, a precipitação que caracteriza a bacia hidrográfica em estudo, permite obter os seguintes resultados: o valor do caudal de ponta de cheia, o instante de ocorrência, o volume total de escoamento, o valor da precipitação total, as perdas de precipitação e as perdas efectivas, apresentado na Tabela 7, e o hidrograma de cheia apresentado graficamente na Figura 12.

Tabela 7 – Resultados da modelação hidrológica aplicada à bacia hidrográfica do Reservatório de Magos – Características da ponta de cheia para o período de retorno de 100 anos.

Caudal de ponta de cheia (m^3/s)	84,9	Tempo para a ponta de cheia (h)	13,2
Precipitação total (mm)	84,1	Escoamento directo (mm)	25,3
Perdas totais (mm)	58,8	Escoamento de base (mm)	0,0
Precipitação útil (mm)	25,3	Escoamento total (m^3/s)	25,3

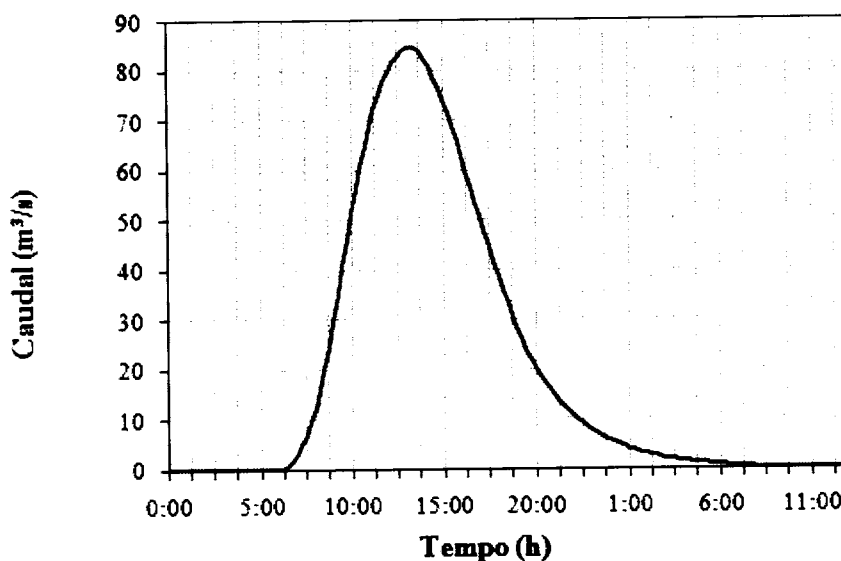


Figura 12 – Resultados da modelação hidrológica aplicada à bacia hidrográfica do Reservatório de Magos – Hidrograma de cheia para o período de retorno de 100 anos.

Na aplicação do modelo hidrológico *HEC-HMS 3.1.0* considerou-se na determinação do hidrograma de cheia o escoamento de base nulo, dado que o escoamento de base tem pouca expressão durante os períodos de precipitação intensa, (Lencastre e Franco, 2003).

Conclui-se da modelação hidrológica aplicada à bacia hidrográfica da Ribeira de Magos na secção do Reservatório de Magos que a uma precipitação total de 84,1 mm corresponde um escoamento total de 25,3 mm, originando um caudal de ponta de cheia afluente ao Reservatório de Magos de 84,9 m^3/s atingindo aproximadamente a ponta de cheia ao fim de 13 h.

4.3. Modelação Hidráulica

4.3.1 Introdução

Neste estudo, aplica-se o modelo hidráulico *HEC-RAS 3.1.3* para calcular a superfície inundada no troço que se desenvolve a jusante do Reservatório de Magos para o evento de precipitação intensa que deu origem ao hidrograma de cheia afluyente determinado. Como dados de saída destaca-se a representação do perfil longitudinal, a representação do perfil da superfície livre e a correspondente delimitação de zona inundável.

O modelo hidráulico *HEC-RAS 3.1.3* permite importar ficheiros com dados provenientes do modelo hidrológico *HEC-HMS 3.1.0*.

O modelo hidráulico *HEC-RAS 3.1.3* é aplicado no mapeamento e delimitação das zonas inundáveis associadas a diferentes períodos de retorno com base na determinação da superfície livre da água, permitindo realizar estudos no âmbito dos danos causados pela inundação, da restauração dos ecossistemas, e da prevenção e resposta atempada a eventos de cheia (Brunner, 2002).

4.3.2 Caracterização Geomorfológica do Troço da Ribeira de Magos a Jusante da Barragem de Magos

O troço em estudo com comprimento de 2 200 m tem início na Barragem de Magos e termina aproximadamente a 100 m a montante da confluência com a Ribeira do Vale do Zebro, troço com comprimento suficiente para conhecer a resposta ao hidrograma de cheia afluyente ao Reservatório de Magos.

No modelo hidráulico *HEC-RAS 3.1.3* os dados geomorfológicos do troço em estudo são obtidos com base no modelo digital do terreno obtido com base no levantamento topográfico à escala 1/10000. Foram identificadas e levantadas topograficamente sessante e sete secções transversais distanciadas entre si de aproximadamente, 150 m e que caracterizam as singularidades (declive, forma, rugosidade) do troço de jusante da Ribeira de Magos (Figura 13).

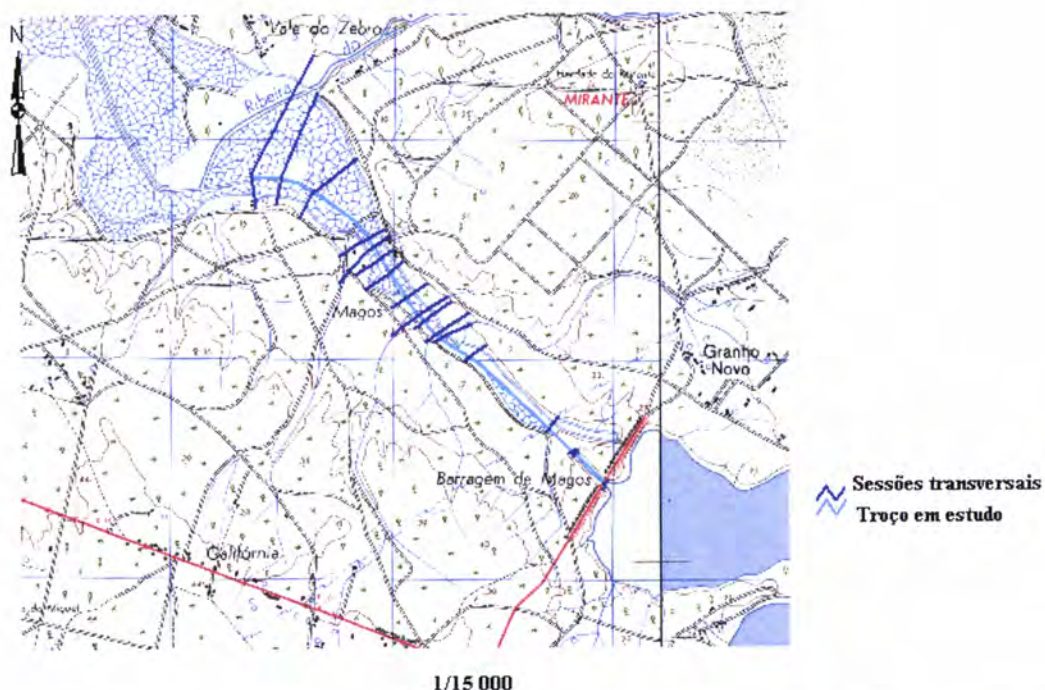


Figura 13 – Identificação das secções transversais do troço em estudo da Ribeira de Magos traçadas à escala 1/10 000 no modelo ArcView 3.2.

Para determinar o perfil longitudinal e perfil da superfície livre do troço de jusante aplica-se o modelo hidráulico *HEC-RAS 3.1.3*, no qual se introduziu as características físicas das secções transversais, o valor do caudal de ponta de cheia igual a $84,9 \text{ m}^3/\text{s}$ para o período de retorno de 100 anos obtido através do hidrograma de cheia afluyente realizado na modelação hidrológica, os valores do coeficiente de *Manning* (Anexo III) e

admitiu-se a altura uniforme na secção a jusante do troço em estudo como condição de fronteira.

Na Figura 14 é apresentado o perfil longitudinal do troço em estudo, obtido no modelo hidráulico *HEC-RAS 3.1.3*.

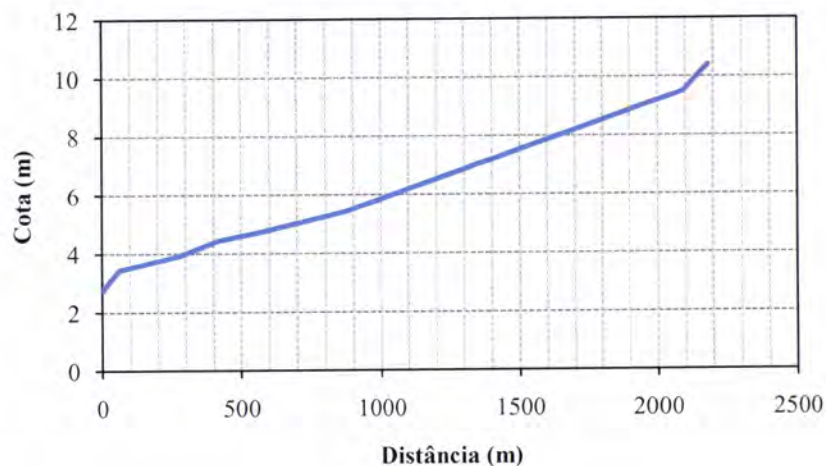


Figura 14 – Perfil longitudinal do troço da Ribeira de Magos em estudo, traçado com base na cartografia à escala 1/10 000.

4.3.3 Delimitação das Zonas Inundáveis

Após a obtenção do perfil da superfície livre ao longo do troço de jusante em estudo da Ribeira de Magos para o período de retorno igual a 100 anos é desenvolvido um ficheiro com a superfície livre do escoamento em formato *Triangular Irregular Network* (TIN) considerando que o caudal de ponta de cheia é o caudal afluente na secção de barragem.

A delimitação da zona inundável é assim obtida pela intercepção entre o modelo digital do terreno e a superfície livre do escoamento. Na Figura 15 representa-se a zona inundável, com uma área total de 0,07 km², sobre a carta militar.

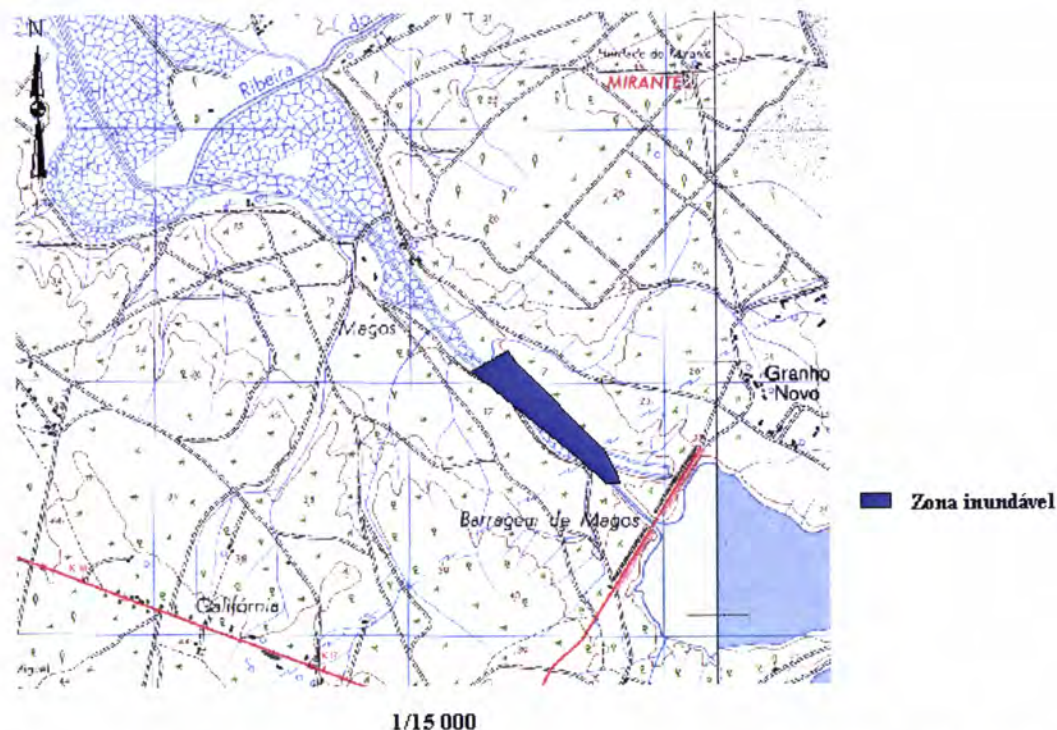


Figura 15 – Planta de identificação da zona inundável para o período de retorno de 100 anos no troço de jusante da Barragem de Magos com base na cartografia à escala 1/10 000.

Pode concluir-se que se caso não existisse o Reservatório de Magos ou se se verificasse a situação de não existir capacidade de amortecimento da cheia, a probabilidade de ocorrência da inundação de 7 ha no troço de jusante da Ribeira de Magos seria de 99% correspondente a um período de retorno de 100 anos, inundando os terrenos adjacentes (Figura 15).

4.4. Defini o das Regras de Opera o do Reservatório de Magos

Uma das regras de opera o mais importante inclui a divisão do armazenamento para amortecimento de cheia em diferentes zonas que possuem regras de opera o específicas que podem ou não variar ao longo do tempo. (Wurbs, 1993). Estas regras são designadas de curvas guia e são usadas para indicar níveis de armazenamento.

As regras de operação do Reservatório de Magos são definidas com base em restrições relativamente ao caudal descarregado que depende do volume de água armazenado no reservatório.

O caudal de ponta de cheia para um período de retorno de 100 anos é de 84,9 m³/s na Ribeira de Magos e na secção do Reservatório de Magos, no entanto caso seja descarregado esse valor provoca a inundação de terrenos a jusante do Reservatório de Magos que deve ser evitado.

Foi definida a zona inundável máxima admissível com base na análise do uso do solo das zonas inundáveis a jusante do Reservatório de Magos e assim, definida a zona inundável máxima admissível. Com base no modelo hidráulico foi calculado o caudal que dá origem à ocupação da água da zona inundável máxima admissível tendo-se obtido o caudal de 5 m³/s com uma zona inundada de 0,004 km², Figura 16.

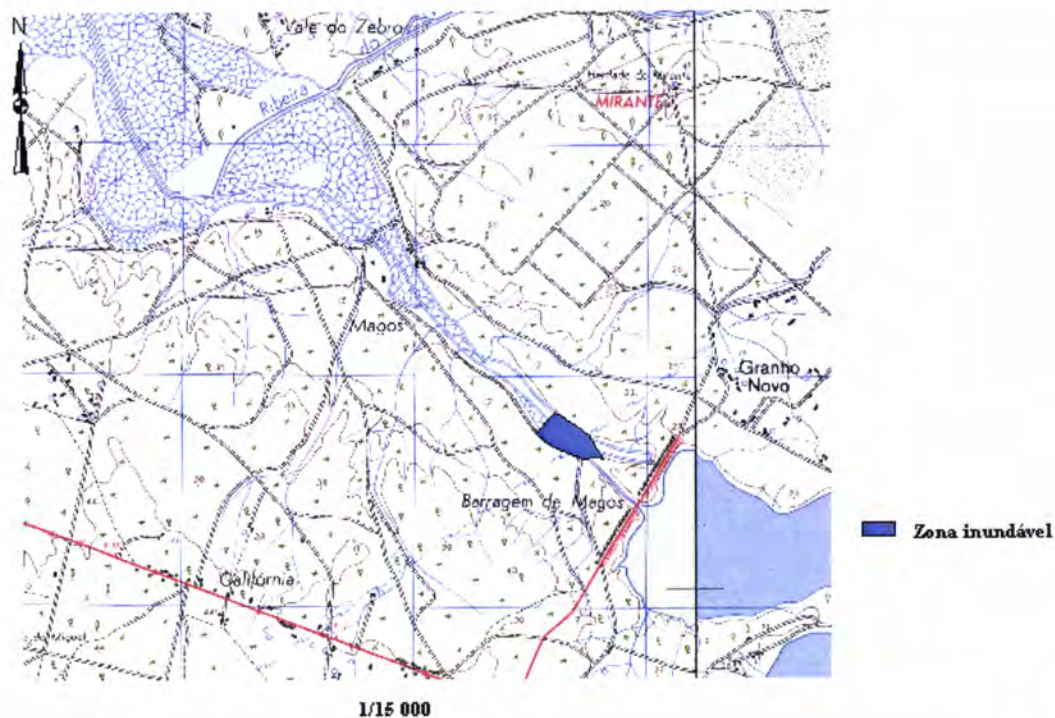


Figura 16 – Planta de identificação da zona inundável para o caudal máximo a descarregar com base na cartografia à escala 1/10 000.

Admite-se, assim, as seguintes condições para a regra de operação proposta para controlo de cheias no Reservatório de Magos:

- Se o caudal afluente for inferior ou igual a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e o nível no reservatório é igual ao NPA deve ser descarregado o caudal afluente;
- Se o caudal afluente for inferior ou igual a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e o nível no reservatório é superior ao NPA e inferior ao NMC deve ser descarregado $5 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Se o caudal afluente for superior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e o nível no reservatório é superior ao NPA e inferior ao NMC deve ser descarregado $5 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Se o caudal afluente for superior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e o nível no reservatório é igual ao NMC deve ser descarregado o caudal afluente com sistema de alerta e aviso dos interessados nos terrenos a jusante da barragem.

Conclui-se, assim, que as restrições do caudal descarregado variam entre 0 m³/s e 5 m³/s. Sempre que seja necessário descarregar um valor superior deve existir um sistema de alerta e aviso aos interessados nas áreas a jusante do Reservatório.

5 Simulação do Reservatório de Magos para Controlo de Cheias

5.1 Introdução

Neste capítulo será simulado o balanço de água no Reservatório de Magos para a regra de operação para controlo de cheias no troço de jusante apresentada no capítulo anterior, através da aplicação do modelo de simulação *HEC-ResSim 3.0*, Figura 17.

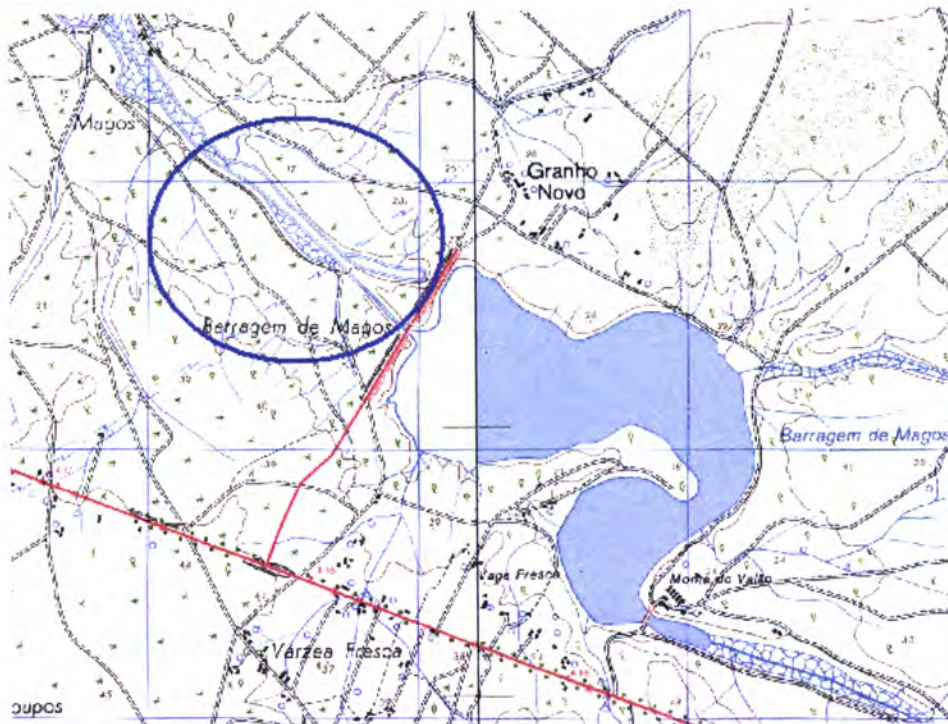


Figura 17 – Planta do Reservatório de Magos e troço a jusante onde se pretende controlar a inundação de terrenos e vias de comunicação.

As regras de operação representam o objectivo e a restrição na descarga, neste caso prático, o objectivo é para controlo de cheia no troço a jusante do Reservatório de Magos.

5.2 Simulação do Balanço de Água no Reservatório de Magos

Apresenta-se a aplicação do modelo *HEC-ResSim 3.0* para a simulação do balanço da água com a regra de operação do Reservatório de Magos para controlo de cheias no troço de jusante, nomeadamente o caudal afluyente for inferior ou igual a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e o nível no reservatório é igual ao NPA deve ser descarregado o caudal afluyente; o caudal afluyente for inferior ou igual a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e o nível no reservatório é superior ao NPA e inferior ao NMC deve ser descarregado $5 \text{ m}^3/\text{s}$; caudal afluyente superior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e nível no Reservatório de Magos entre o NPA e o NMC, implica caudal descarregado de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e caudal afluyente superior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e nível no Reservatório de Magos igual ao NMC, implica descarregar todo o caudal afluyente.

5.2.1 Módulo Bacia Hidrográfica

Para iniciar-se a simulação no modelo é necessário representar/identificar a bacia de Magos, através do comando *New Watershed* do menu *File* da janela principal do *HEC-ResSim 3.0* no módulo *Watershed Setup* que aparece automaticamente por defeito quando se corre o modelo.

De seguida, adiciona-se a imagem de fundo com a rede hidrográfica da Ribeira de Magos para que seja possível traçar e representar os elementos constituintes da bacia hidrográfica, nomeadamente a Ribeira de Magos e os órgãos hidráulicos, nomeadamente reservatório de Magos. A imagem pode ser em formato *ArcView® shapefile*, *AutoCad® Digital Exchange Format*, *USGS Digital Elevation Model*, *Raster Image*, *ArcInfo* e *ASCII Net Tin*, através do comando *Add Map Layer* do menu *Maps*.

O próximo passo é traçar o curso de água a estudar, nomeadamente a Ribeira de Magos, através do comando *Stream Alignment Element* na janela principal do *HEC-ResSim 3.0*. Antes de implantar (localizar) o Reservatório de Magos, desenvolve-se uma Configuração, ou seja, é a identificação de um conjunto de projectos (estruturas hidráulicas) que se quer simular na bacia hidrográfica, através do comando *Configuration Editor* do menu *Watershed*.

Após a configuração, procede-se à implantação do reservatório (albufeira e barragem), sempre de montante para jusante na Ribeira de Magos a partir da imagem anteriormente adicionada. Quando se adiciona um reservatório, pontos de controlo são desenvolvidos automaticamente a montante e a jusante. Esta operação é realizada, através do comando *Reservoir Tool* da janela principal do *HEC-ResSim 3.0*, no qual resulta a configuração do módulo da Bacia, Figura 18.

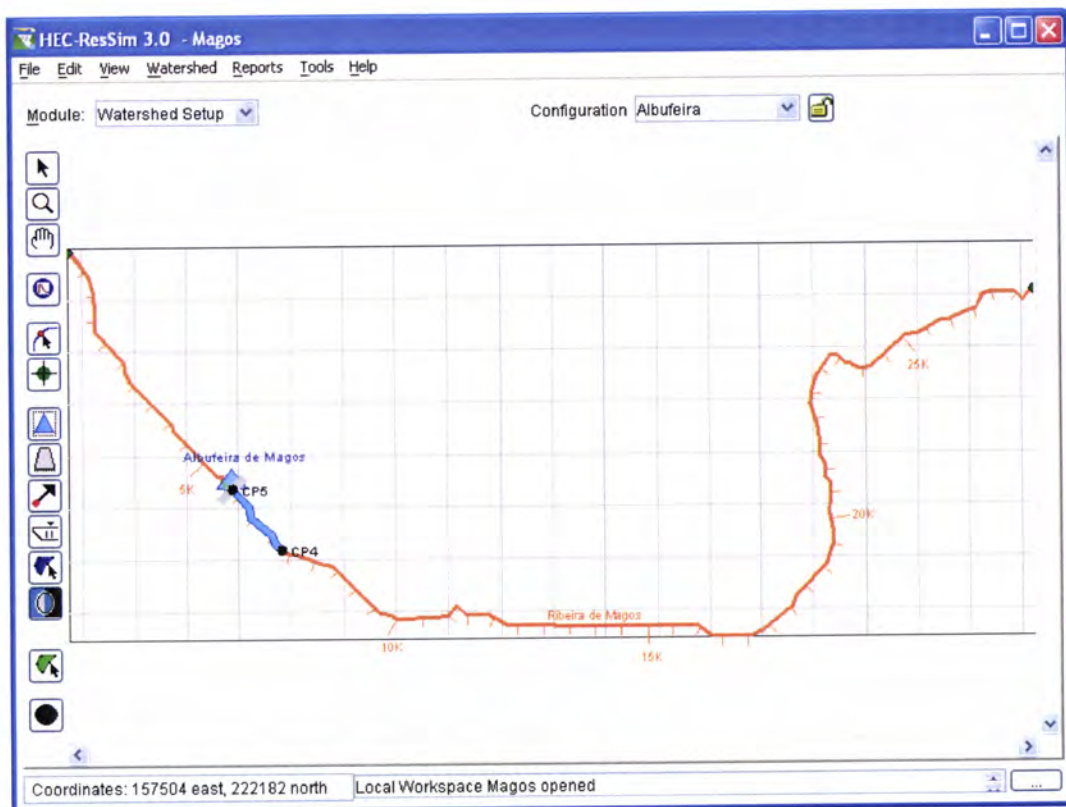


Figura 18 – Módulo Bacia Hidrográfica.

5.2.2 Módulo Reservatório

Com o curso de água definido e as estruturas hidráulicas implantadas procedeu-se à conectividade dos elementos traçados.

Para tal, seleccionou-se primeiro a opção *Reservoir Network* do menu *Module List* da janela principal do *HEC-ResSim 3.0*, Figura 19.



Figura 19 – Opção *Reservoir Network* da janela principal do *HEC-ResSim 3.0*.

De seguida, para desenvolver o módulo do Reservatório é necessário criar a rede de conectividade do Reservatório de Magos, através do comando *New* do menu *Network* da janela principal do *HEC-ResSim 3.0*, aparecendo automaticamente na janela principal do *HEC-ResSim 3.0* os elementos desenvolvidos no módulo Bacia Hidrográfica, Figura 20.



Figura 20 – Módulo Reservatório do modelo *HEC-ResSim 3.0*, baseado na Configuração existente.

Com o esquema completo da rede do Reservatório de Magos começou-se a editar os elementos do módulo.

Para dar início à edição dos elementos é necessário adicionar o curso de água que se quer estudar, neste caso, é o troço imediatamente a jusante do Reservatório de Magos, através do comando *Reach Tool* da janela principal do *HEC-ResSim 3.0*.

Começa-se por editar os pontos de controlo, nos quais se indica que a afluência é de 100%, através do comando *Junction Editor* do menu *Edit Junction* da janela principal do *HEC-ResSim 3.0*.

Após a edição dos pontos de controlo, caracterizou-se o troço a jusante em estudo seleccionando-se o método de propagação do hidrograma de cheia tendo sido escolhido – *Null Routing* (modelo cinemático), através do comando *Method list* do menu *Edit Reach* da janela principal do *HEC-ResSim 3.0*. Existem vários modelos de propagação de cheia que podem ser aplicados com mais ou menos hipóteses simplificativas, Figura 21.

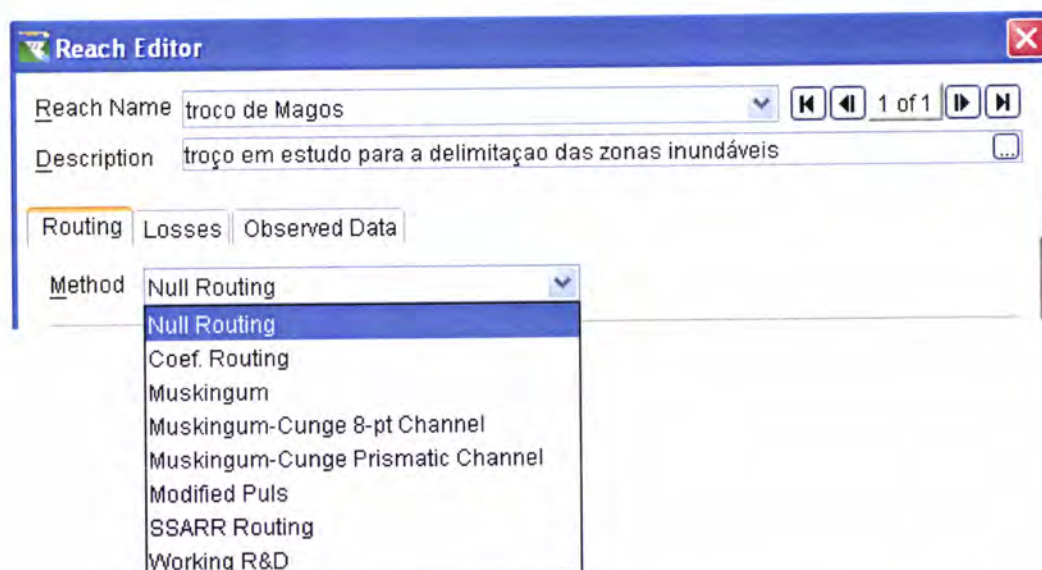


Figura 21 – Selecção do método de propagação de cheias do comando *Reach Editor*.

De seguida, editou-se as propriedades do elemento reservatório, introduziu-se as características físicas da albufeira (curva de volumes armazenados que traduz a capacidade de armazenamento do Reservatório de Magos em função da cota da superfície livre da água), da barragem (com cota de coroamento de 23 m e com

comprimento de coroamento de 400 m) e do descarregador de encosta (admitiu-se 1 comporta plana para cálculo computacional, a cota da crista da soleira de 16,18 m e a curva de vazão), através do comando *Reservoir Editor* do menu *Edit Reservoirs* da janela principal do *HEC-ResSim 3.0*, Figura 22, 23 e 24.

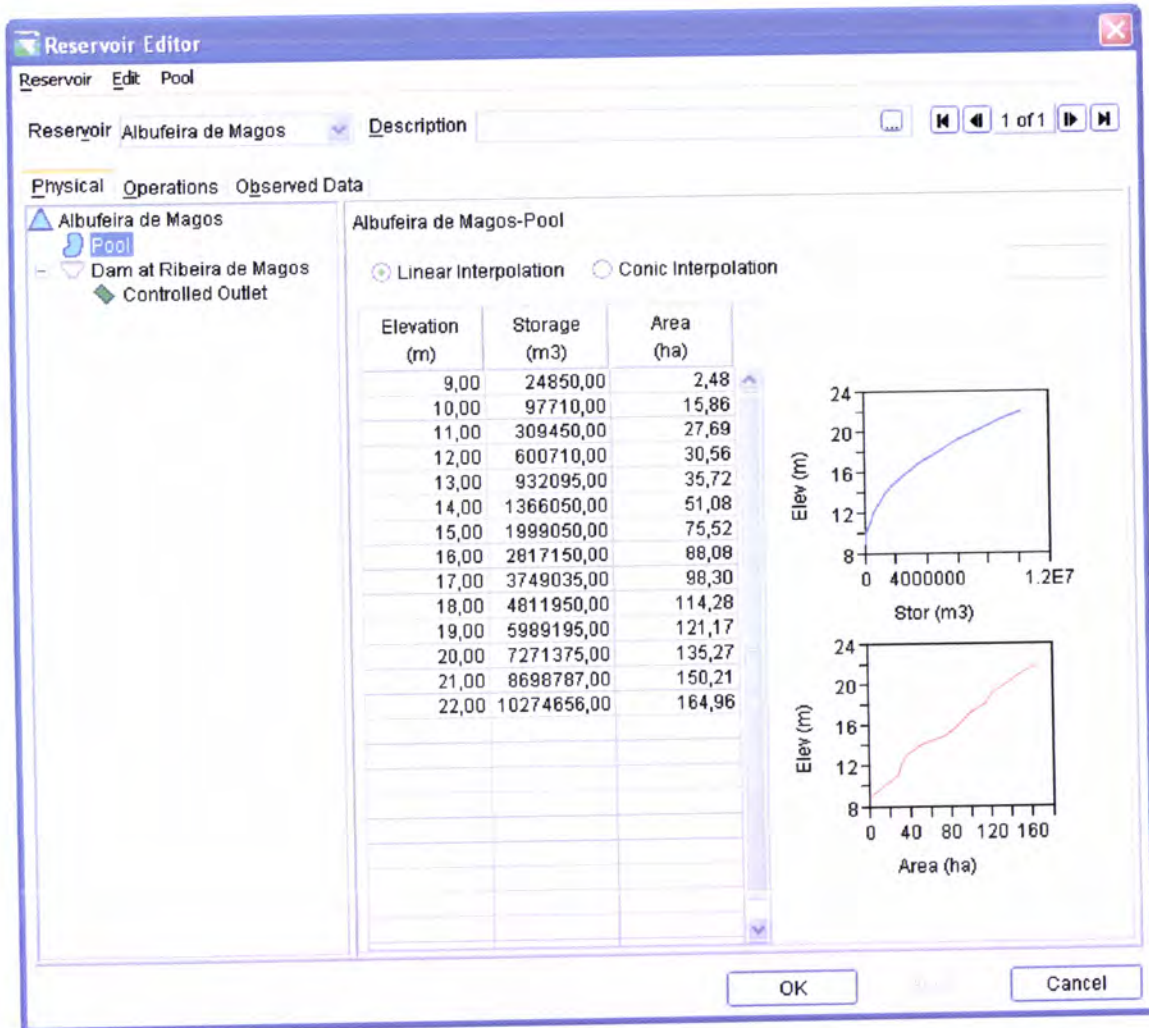


Figura 22 – Curva de armazenamento do Reservatório de Magos - Comando *Reservoir Editor*.

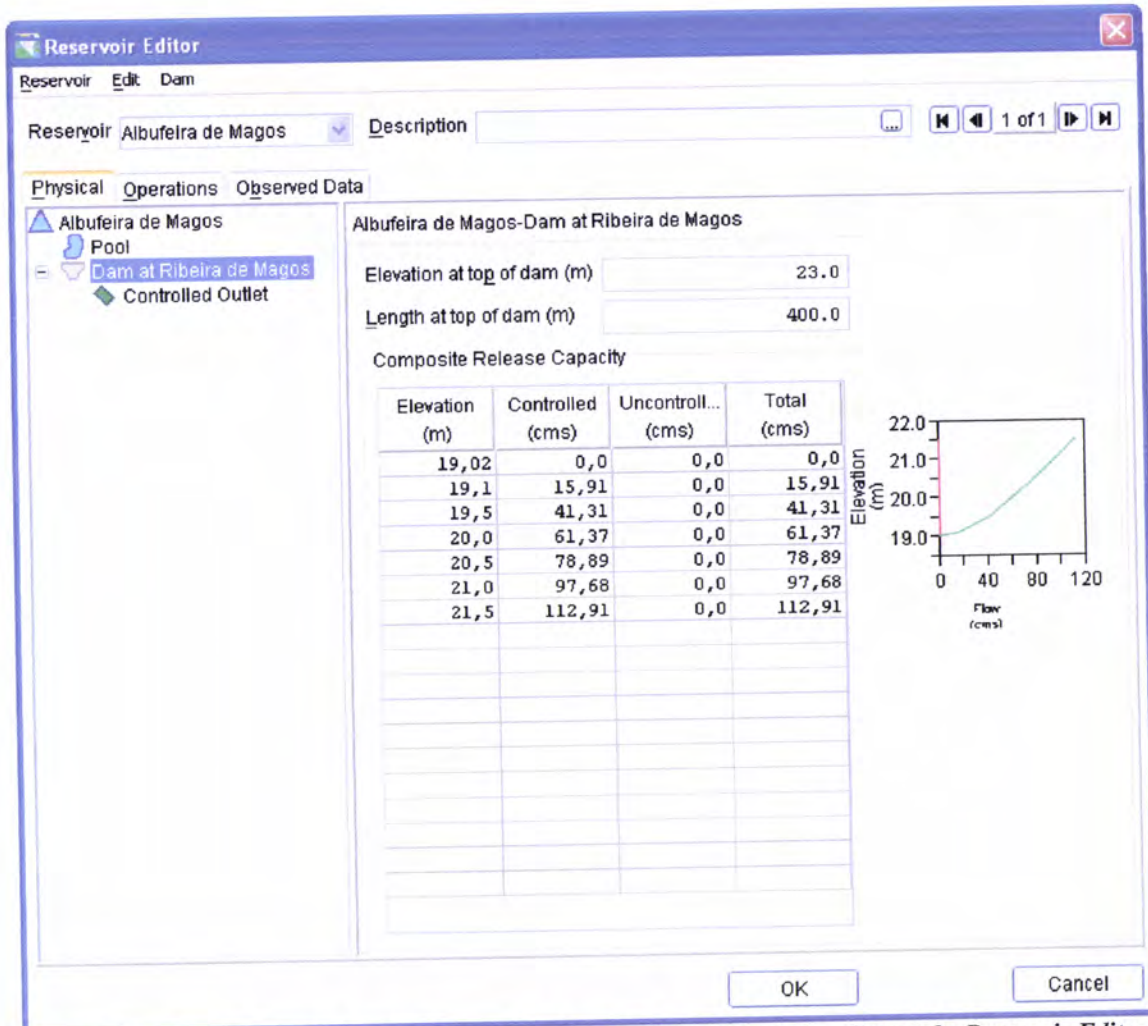


Figura 23 – Curva de vazão do descarregador de superfície controlada - Comando Reservoir Editor.

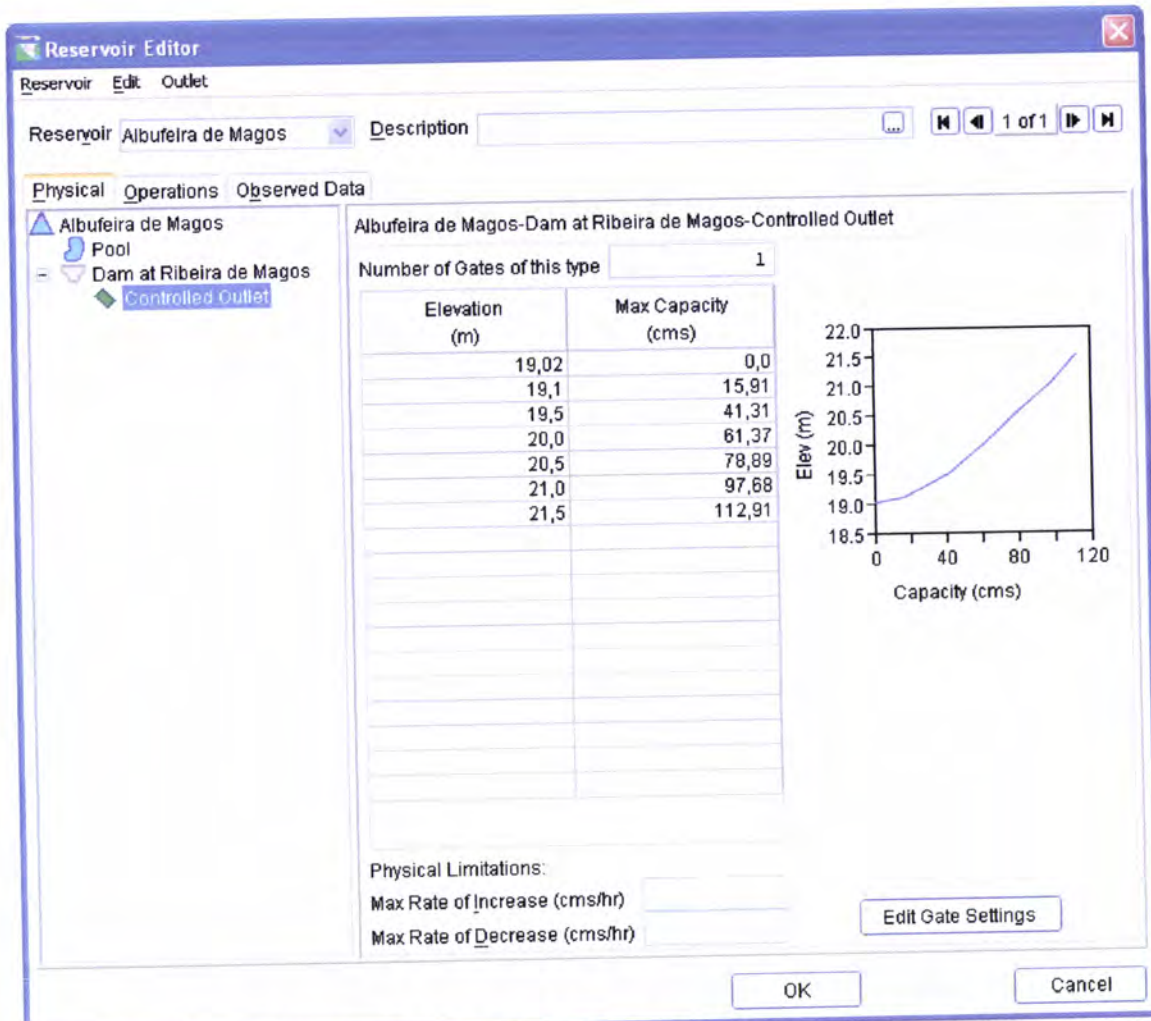


Figura 24 – Número de comportas e capacidade máxima do descarregador de superfície controlada - Comando *Reservoir Editor*.

Após, a introdução das características físicas do reservatório, define-se um conjunto de regras de operação do Reservatório de Magos para controlo de cheias, através do comando *New* do menu *Operations*, do menu *Edit Reservoirs*.

Identifica-se as duas zonas de armazenamento características do Reservatório de Magos, nomeadamente a zona de volume útil e de volume de controlo de cheia, através da introdução das cotas do nível de pleno armazenamento de 19,02 m e do nível de máxima cheia de 21,50 m respectivamente.

Estas cotas permitem simular o balanço de água no Reservatório de Magos para controlo de cheias, através do comando *Reservoir Editor* do menu *Edit Reservoirs* e selecciona-se a opção *Operations* da janela do *Reservoir Editor*, Figura 25.

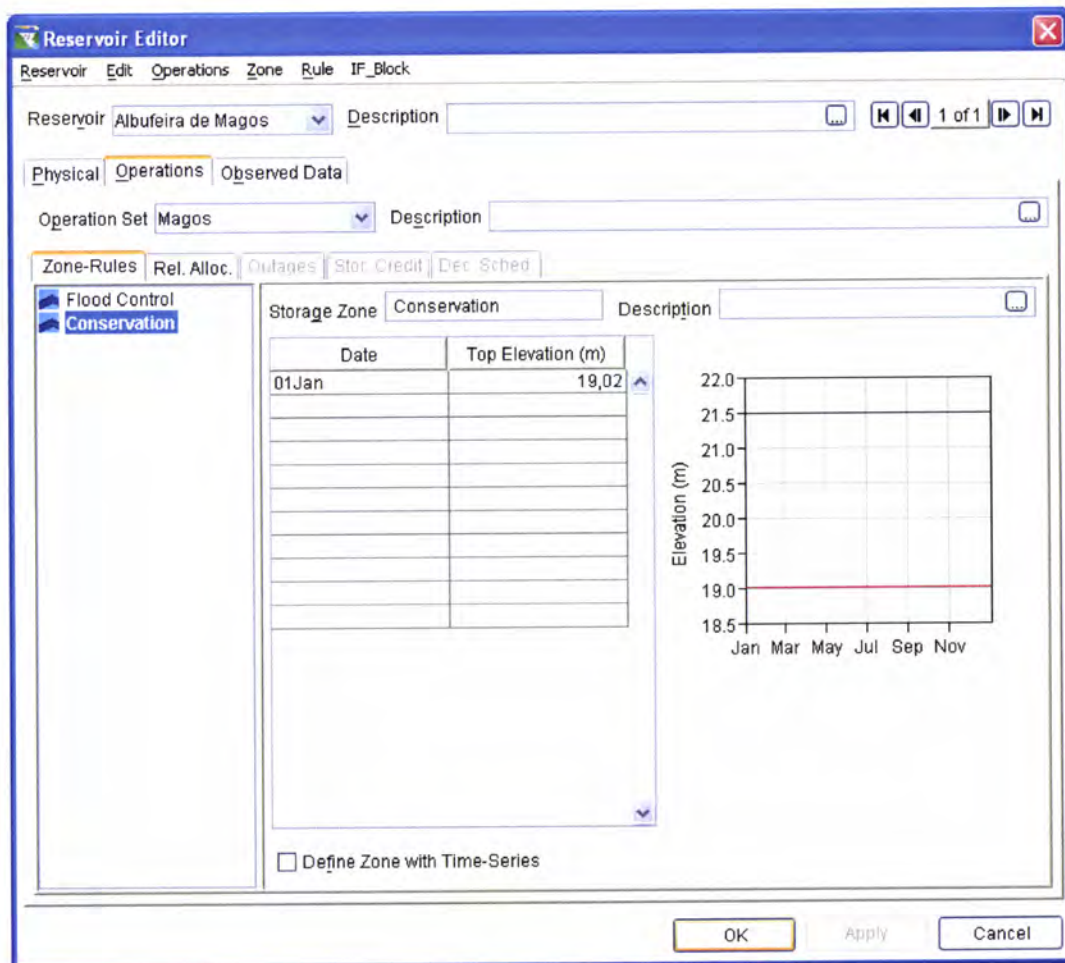


Figura 25 – Cota do NMC, NPA - Opção *Operations* do comando *Reservoirs Editor*.

Após, estabelecer as características físicas do Reservatório de Magos, selecciona-se a rede do Reservatório de Magos, o conjunto de regras de operação e o hidrograma de cheia afluente ao Reservatório de Magos.

Para introduzir o hidrograma de cheia afluente ao Reservatório de Magos no *HEC-ResSIM 3.0* é necessário, importar os dados do hidrograma de cheia afluente do modelo

hidrológico *HEC-HMS* através da opção *Time-Series*, do comando *Alternative New* do menu *Alternative Edit* da janela principal do *HEC-ResSim 3.0*.

5.2.3 Módulo Simulação

Após a introdução de todos os dados necessários no módulo Bacia Hidrográfica e Reservatório e selecionada a Alternativa a estudar, pode realizar-se a simulação do balanço de água no Reservatório de Magos com a regra de operação definida para controlo de cheias, através da opção *Simulation* do menu *Module List* da janela principal do *HEC-ResSim 3.0*, Figura 26.

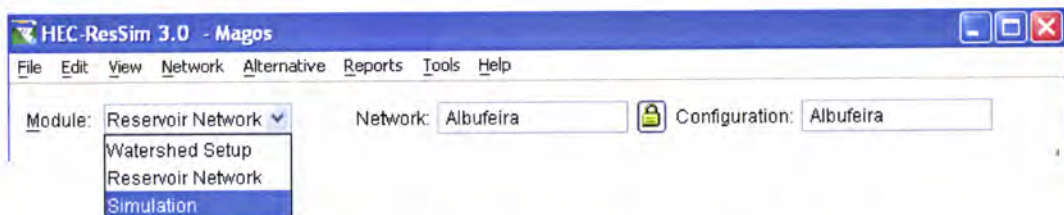


Figura 26 – Opção *Simulation* da janela principal do *HEC-ResSim 3.0*.

De seguida, especifica-se o instante de início e duração da simulação, o passo de cálculo e a alternativa que se pretende estudar, através do comando *Simulation Editor* do menu *Simulation New*, no qual resulta a definição do módulo Simulação, Figura 27.

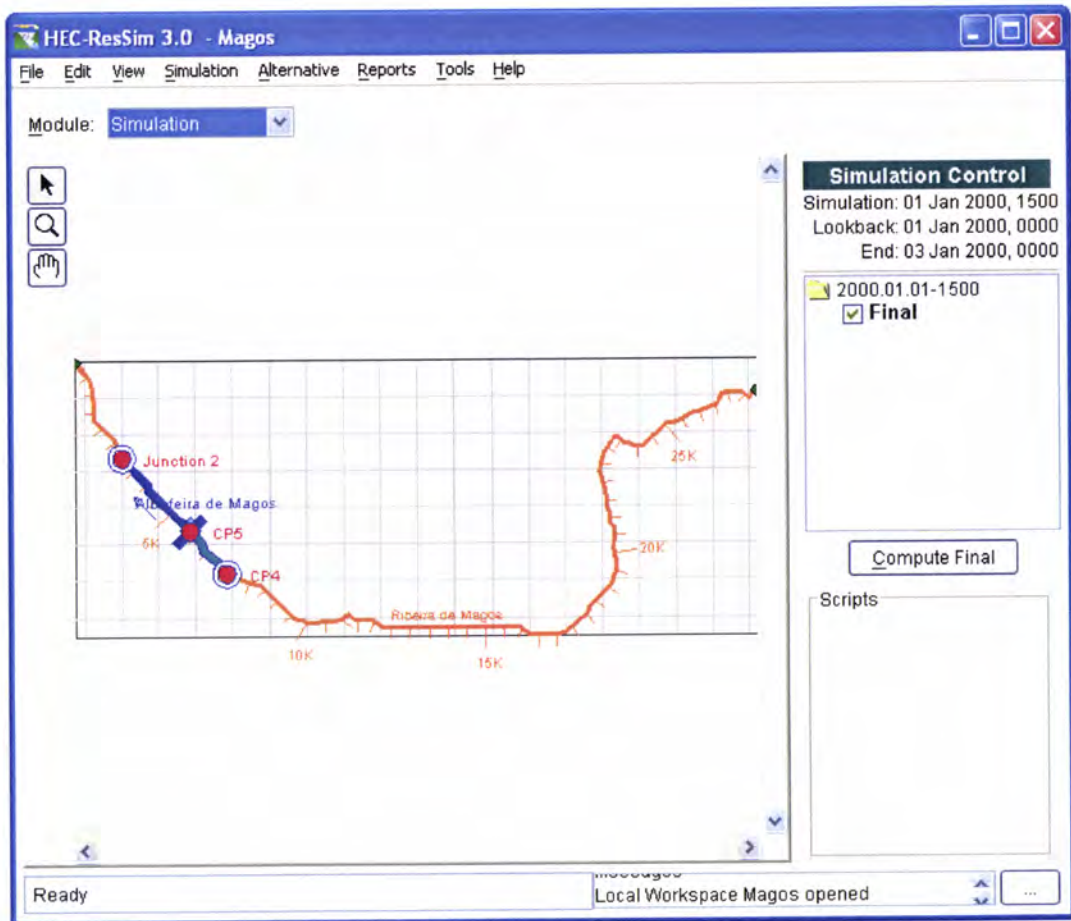


Figura 27 – Módulo Simulação.

5.3 Resultados

O modelo cria tabelas e gráficos com os dados referentes aos elementos inseridos no modelo, permitindo a verificação da introdução dados: o volume armazenado, a cota da superfície livre, o caudal descarregado associado a uma descarga controlada, o caudal afluente, o caudal efluente e o caudal acumulado que podem ser visualizados em conjunto ou em separado, através do comando *Reports Reservoir Summary...* da janela principal do *HEC-ResSim 3.0*.

A simulação do balanço de água no Reservatório de Magos, admitindo a condição inicial do reservatório estar à cota do pleno armazenamento e considerando as seguintes condições para a regra de operação definida para controlo de cheias:

- 1) Se o caudal afluyente for inferior ou igual a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e o nível no reservatório é igual ao NPA deve ser descarregado o caudal afluyente;
- 2) Se o caudal afluyente for inferior ou igual a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e o nível no reservatório é superior ao NPA e inferior ao NMC deve ser descarregado $5 \text{ m}^3/\text{s}$;
- 3) Se o caudal afluyente for superior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e o nível no reservatório está entre NPA e NMC deve ser descarregado $5 \text{ m}^3/\text{s}$;
- 4) Se o caudal afluyente for superior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e o nível no reservatório é igual ao NMC deve ser descarregado o caudal afluyente com aviso dos interessados nos terrenos a jusante da barragem.

Obteve-se para a regra de operação aplicada ao Reservatório de Magos o volume de armazenamento de 8387 dam^3 à cota de 20,73 m, Figura 28.

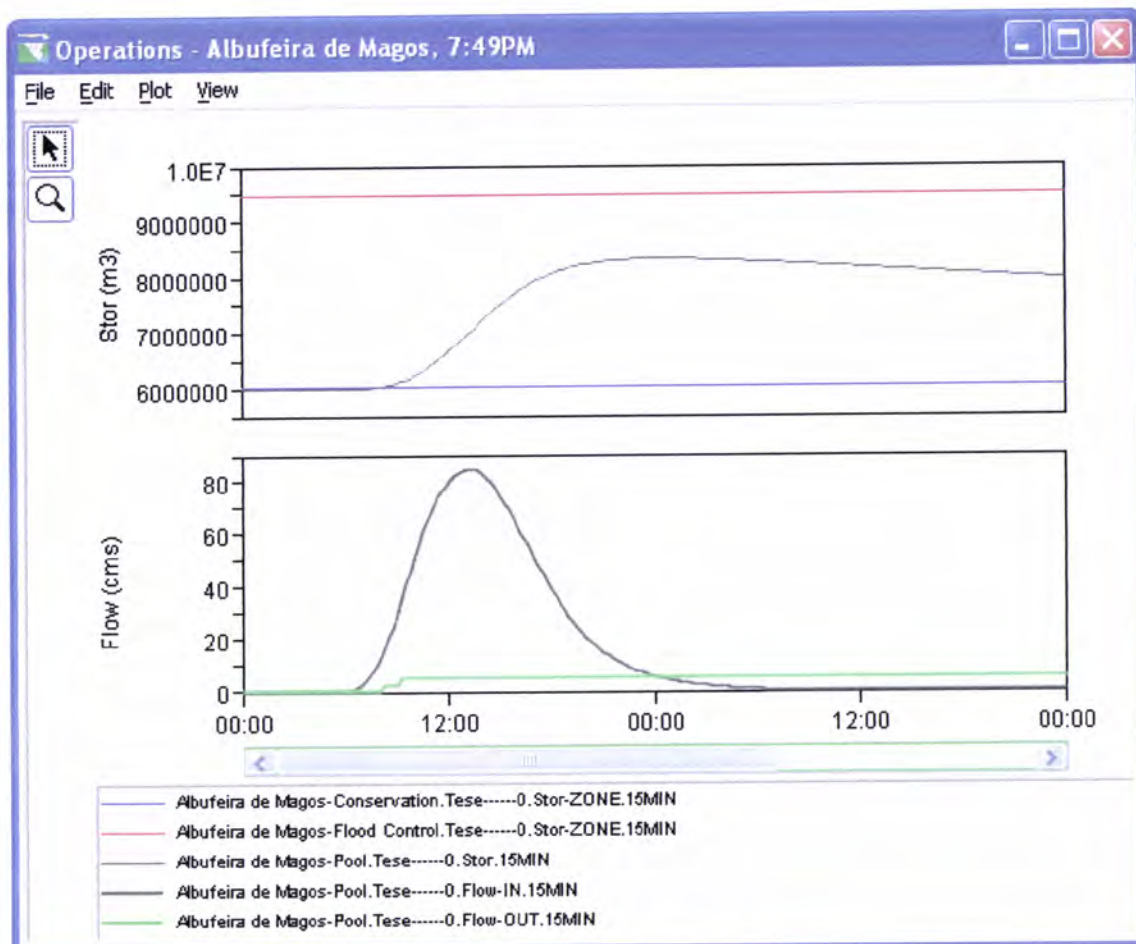


Figura 28 – Gráfico com o comportamento do Reservatório de Magos para controlo de cheias para a regra de operação estudada.

Conclui-se para as quatro condições como uma regra de operação, satisfazendo-se cada uma conforme o caso, e assumindo o Reservatório de Magos com o nível igual ao NPA, verifica-se para o Reservatório de Magos, que no início do hidrograma de cheia o caudal é menor que $5 \text{ m}^3/\text{s}$, e o nível de água é igual ao NPA, descarrega o que está a chegar. Quando o caudal afluente é superior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$, descarrega $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e guarda o restante aumentando o nível no Reservatório de Magos, sem nunca atingir o NMC.

Verifica-se que quando o hidrograma de cheia afluente está no troço descendente com caudal inferior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$, descarrega $5 \text{ m}^3/\text{s}$ para o nível voltar ao NPA, e assim, permitir receber outro evento de cheia.

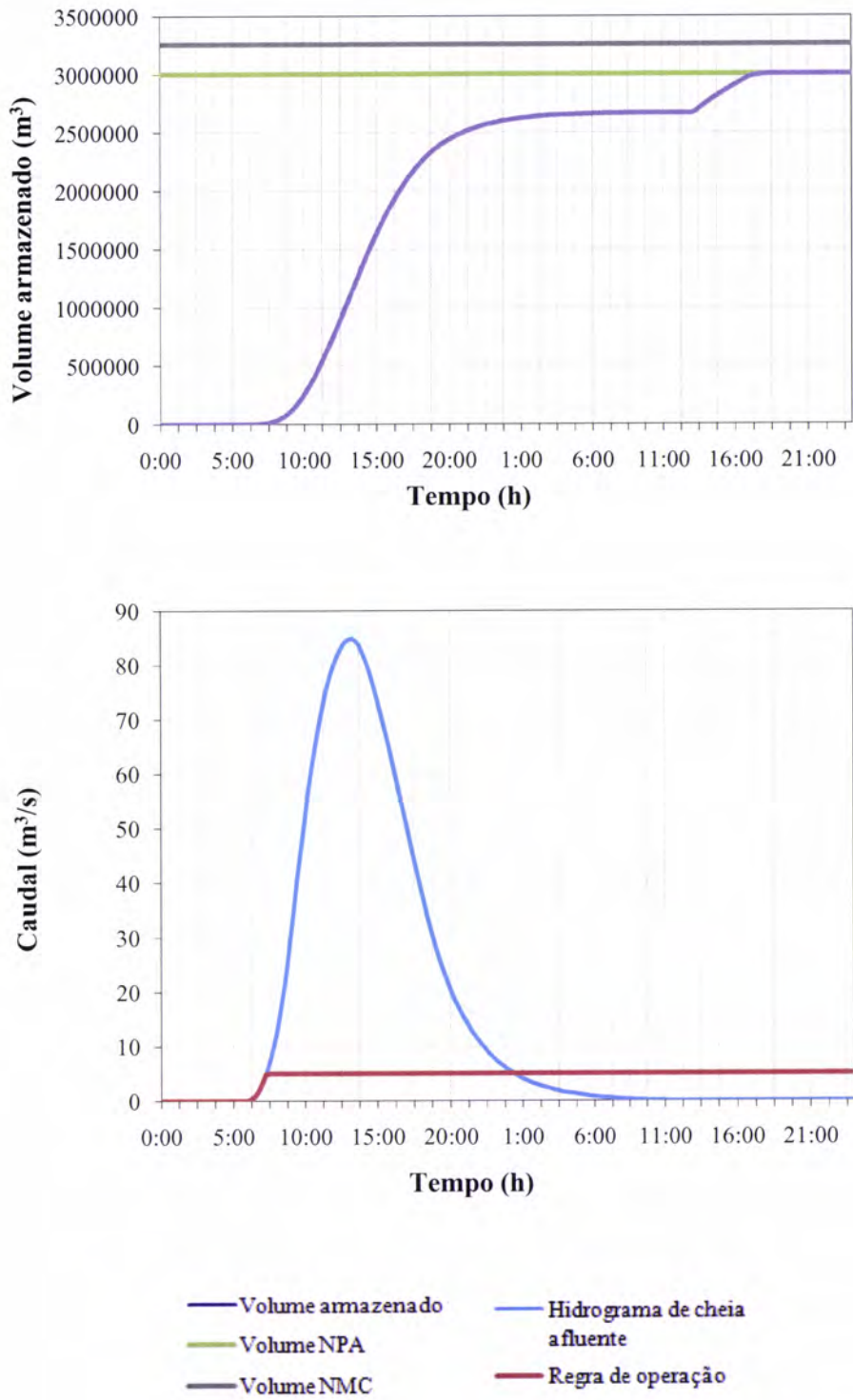


Figura 28 – Gráfico com o comportamento do Reservatório de Magos para controlo de cheias para a regra de operação estudada.

Conclui-se para as quatro condições como uma regra de operação, satisfazendo-se cada uma conforme o caso, e assumindo o Reservatório de Magos com o nível igual ao NPA, verifica-se para o Reservatório de Magos, que no início do hidrograma de cheia o caudal é menor que $5 \text{ m}^3/\text{s}$, e o nível de água é igual ao NPA, descarrega o que está a chegar. Quando o caudal afluente é superior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$, descarrega $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e guarda o restante aumentando o nível no Reservatório de Magos, sem nunca atingir o NMC.

Verifica-se que quando o hidrograma de cheia afluente está no troço descendente com caudal inferior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$, descarrega $5 \text{ m}^3/\text{s}$ para o nível voltar ao NPA e assim, permitir receber outro evento de cheia.

Caso ocorra um episódio de cheia para o período de retorno de 100 anos, o Reservatório de Magos apresenta capacidade para controlo de cheias no troço a jusante do Reservatório de Magos, dado que existe a probabilidade de ocorrer uma redução bastante significativa da zona inundável, passando de 7 ha para uma zona inundável máxima admissível de 0,4 ha, minimizando assim, os danos causados nos terrenos adjacentes.

Após, a simulação do balanço de água com a regra de operação no Reservatório de Magos para controlo de cheias para o período de retorno de 100 anos, verifica-se que a regra de operação estudada permite volume de encaixe, permitindo na totalidade, o amortecimento da cheia e por conseguinte, minimizar a zona inundável no troço a jusante do Reservatório de Magos.

6. Conclusões

6.1 Síntese do Trabalho Realizado e Conclusões Gerais

As características fisiográficas da bacia hidrográfica determinam a forma do hidrograma de cheia afluente ao Reservatório de Magos, e as características físicas condicionam os processos de retenção de água na bacia e no solo, por último as características geométricas e físicas da secção transversal do troço de jusante da Ribeira de Magos e o impacte do transporte sólido na linha de água determinam a velocidade de escoamento e o nível da superfície livre.

Foi aplicado o modelo hidrológico *HEC-HMS 3.1.0* para o cálculo do hidrograma de cheia afluente ao Reservatório de Magos referente a um período de retorno igual a 100 anos.

No modelo hidrológico *HEC-HMS 3.1.0* foram aplicados as curvas IDF obtidas para o Posto Udográfico de Portalegre por ser o posto, entre a informação disponível, que melhor representa as precipitações intensas sobre a bacia hidrográfica da Ribeira de Magos.

Para a determinação das zonas inundáveis no troço de jusante da Ribeira de Magos na secção onde está implantado o Reservatório de Magos em estudo, foi aplicado o modelo hidráulico *HEC-RAS 3.1.3*. Foram identificadas dezassete secções transversais com informação topográfica, os valores dos coeficientes de *Manning*, o caudal de ponta de cheia e o caudal a descarregar para o período de retorno de 100 anos. Após a introdução dos dados de entrada no modelo *HEC-RAS 3.1.3*, foi obtida a superfície livre da veia

líquida no troço em estudo para o caudal de ponta de cheia e para o caudal a descarregar, do Reservatório de Magos.

Para o caudal de ponta de cheia de $84,90 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondente ao período de retorno igual a 100 anos, conclui-se que é delimitada uma zona inundável num troço de jusante da Ribeira de Magos com 7 ha, partindo do princípio que o escoamento ocorre quando o volume de controlo de cheia está no máximo, situação para o caso de não haver Reservatório de Magos.

Para a simulação do balanço de água no Reservatório de Magos com a regra de operação para controlo de cheias deduzida do modelo hidráulico, aplica-se o modelo de simulação *HEC-ResSim 3.0*.

Após a introdução das características físicas da albufeira, da barragem e do descarregador, bem como das zonas de armazenamento definidas, através da cota do nível pleno armazenamento e do nível máximo de cheia do Reservatório de Magos, do hidrograma de cheias afluente para o período de retorno igual a 100 anos e seleccionada a regra de operação foi obtido o comportamento do Reservatório de Magos para controlo de cheias no troço a jusante.

Conclui-se para a regra de operação estudada que para o caudal afluente superior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$, e o nível de água no Reservatório de Magos é inferior ao nível de máxima cheia, o caudal descarregado é de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, o que permite armazenar 3002 dam^3 até à cota de 19,02 m no Reservatório de Magos. O Reservatório começa a descarregar à cota 16,18 m (cota da crista da soleira) quando o nível da superfície livre atinge a cota de 19,02 m, havendo

o total encaixe da onda de cheia, ficando com volume para encaixar outro evento de cheia.

Verifica-se que o Reservatório de Magos tem capacidade de armazenamento, permitindo reduzir a zona inundável de 7 ha para 0,4 ha.

Após a simulação da regra de operação para controlo de cheias no troço de jusante do Reservatório de Magos, assumindo o Reservatório de Magos com o nível igual ao nível de pleno armazenamento, conclui-se que no início do hidrograma de cheia o caudal é menor que $5 \text{ m}^3/\text{s}$, e quando o nível de água é igual ao nível de pleno armazenamento, descarrega o que está a chegar, quando o caudal afluente é superior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$, descarrega $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e guarda o restante aumentando o nível no Reservatório de Magos, verifica-se que o volume de encaixe nunca fica ocupado, permitindo sempre evitar zona inundável a jusante. Verifica-se que quando o hidrograma de cheia afluente está no troço descendente com caudal inferior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$, descarrega $5 \text{ m}^3/\text{s}$ para o nível voltar ao nível de pleno armazenamento e assim, permitir receber outro evento de cheia.

Acrescenta-se, que o Reservatório de Magos apresenta uma mais-valia para controlo de cheias na bacia hidrográfica do rio Tejo, dada a sua capacidade total de amortecimento de cheia para o período de retorno de 100 anos.

6.2 Estudos Futuros

O estudo do impacte dos cenários de alterações climáticas no cálculo do hidrograma de cheia, delimitação das zonas inundáveis e gestão do reservatório pode ser considerado,

através do estudo das séries de precipitação e temperaturas geradas com base em modelos climáticos.

Bibliografia

- Ackerman, C. T., 2002. *HEC-GeoRAS, An extension for support of HEC-RAS using ArcView GIS*. Version 3.1, Hydrologic Engineering Center, October, USA.
- Almeida, A.B. *et al*, 2003. *Dam Break Flood Risk Management in Portugal*, LNEC, Lisboa, Portugal.
- Almeida, A.B. *et al*, 2008. *A Estimação de Escoamentos Fluviais e o Dimensionamento de Albufeiras*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Antunes do Carmo, J. S., 2004. *Modelação em Hidráulica Fluvial e Ambiente*. Imprensa da Universidade, Coimbra, Portugal.
- Braga, B., Barbosa, P.S.F., 2001. *Multiobjective real-time reservoir operation with a network flow algorithm*. Journal of the American Water Resources Association 37 (4), 837-852.
- Brandão, C., Rodrigues, R., Costa, J., 2001. *Análise de Fenómenos Extremos Precipitações Intensas em Portugal Continental*. Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, Lisboa, Portugal.
- Brunner, G. W., 2002. *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic User's Manual*. Version 3.1, Hydrologic Engineering Center, November, USA.
- Calçada, M.; Portela, M.M.; Matos, J., 2004. *Análise de Cheias e Delimitação de Zonas Inundáveis em Timor-leste. Abordagem por Modelação Geográfica*. CD VII Congresso da Água, APRH, Lisboa, Portugal.
- Cardoso, A. H., 1998. *Hidráulica Fluvial*. Serviço de Educação, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.
- Cardoso, J. C., 1965. *Os Solos de Portugal. Sua Classificação e Génese*, Secretaria de Estado da Agricultura, Direcção Geral dos Serviços Agrícolas, Lisboa, Portugal.

- Chadwick, A., Morfett, J., 1998. *Hidráulica em Engenharia Civil e Ambiental*. Ciência Técnica, Instituto Piaget, Lisboa, Portugal.
- Chow, V.T.; Maidment, D.; Mays, L., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, Book Company, New York, USA.
- Chow, V.T., 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, Book Company, New York, USA.
- Costa, J. B., 1999. *Caracterização e Constituição do Solo*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.
- Costa, T.; Lança, R., 2001. *Capítulo I. Hidrologia de Superfície*, Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Algarve, Faro, Portugal.
- Direcção-Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos., 1986 *Monografias Hidrológicas dos Cursos de Água de Portugal Continental*. Divisão de Hidrometria, Lisboa, Portugal.
- ESRI, 1996. *ArcView GIS, The Geographic Information System for Everyone*. USA.
- Feldman, A. D; Editor, 2000. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual*. March, USA.
- Klipsch, J.D., Hurst, M.B., 2007. *HEC-ResSim. Reservoir System Simulation Quick Start Guide*. Version 3, Hydrologic Engineering Center, California, April, USA.
- Klipsch, J.D., Hurst, M.B., 2007. *HEC-ResSim. Reservoir System Simulation User's Manual*. Version 3, Hydrologic Engineering Center, California, April, USA.
- Lencastre, Armando., 1996. *Hidráulica Geral*. Fundação Armando Lencastre, Lisboa, Portugal.
- Lencastre, A; Franco, F. M., 2003. *Lições de Hidrologia*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, Portugal.

- Labaide, J. W. (2004). *Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review*. J. Water Resour. Plan Manage, 130(2), 93-111.
- Lima, H. V. C., Lanna, A. E. L. (2005). *Modelos para Operação de Sistemas de Reservatórios: Atualização do Estado da Arte*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.10, n. 3, p.5-22.
- McMahon, T.A., Mein, R.G., 1978. *Reservoir Capacity and Yield*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Netherlands.
- Manzanas, A. A., 1979. *Hidráulica Geral I. Fundamentos Teóricos*. Técnica, AESIST, Lisboa, Portugal.
- Manzanas, A. A., 1980. *Hidráulica Geral II. Escoamentos Líquidos*. Técnica, AESIST, Lisboa, Portugal.
- Mockus, V., 1965. *National Engineering Handbook*. Section 4, Hydrology, USDA.
- Novais-Barbosa, J., 1986. *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral*. Volume 1 e Volume 2, Porto Editora, Porto, Portugal.
- Quintela, A. C., 1998. *Hidráulica*. Serviço de Educação, Fundação Calouste Gulbenkian, 6ª Edição, Lisboa, Portugal.
- Santos, E. G., 1992. *Dimensionamento de Albufeira*, IST, Lisboa, Portugal.
- Scharffenberg, W. A; Fleming, M. J., 2006. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual*. Hydrologic Engineering Center, California, November, USA.
- Silva, D.S., 2003. *Risco de Cheia: vias para a sua mitigação*. LNEC, Lisboa, Portugal.
- Simonovic, S. P. (1992). *Reservoir system analysis: closing gap between theory and practice*. Journal of Water Resources Planning and Management, New York. Vol. 118, nº 3, pp. 262 – 280.
- Soil Survey Staff, 1951. *Soil Survey Manual. Agricultural Handbook, nº 18*. Soil Conservation Service U.S. Department of Agriculture, Washington.

- Soil Survey Staff, 1960. *Soil Classification. A comprehensive system. 7th Approximation*. Soil Conservation Service U.S. Department of Agriculture Washington.
- Ponce, V. M., 1989. *Engineering Hydrology. Principles and Practices*. Prentice Hall.
- Varela, J. A., 1987. *Tribunal Policia de Lisboa, Parecer n.º 452/86 de 10/05/1987*, Lisboa, Portugal.
- Viessman, W.; Lewis, G. L., 2003. *Introduction to Hydrology*. 5th edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Viseu, T., 2008. *Segurança dos Vales a Jusante de Barragens. Metodologias de apoio à gestão do risco*. LNEC, Lisboa, Portugal.
- Wei, C.- C., Hsu, N.-S., 2007. *Multireservoir real-time operations for flood control using balanced water level index method*. Journal of Environmental Management.
- Wurbs, R. A., Tibbets, M.N., Cabezas, L.M. and Roy, L.C. (1985). *State-of-the-Art Review and Annotated Bibliography of Systems Analysis Techniques Applied to Reservoir Operation*, Technical Report 136, Texas Water Resources Institute, College Station, Texas.
- Wurbs, R. A. (1993). *Reservoir - System Simulation and Optimization Models*. Journal of Water Resources Planning and Management, V. 119, n. 4, p.455- 472.
- Wurbs, R. A. (2005). *Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models*. Technical Report n. 282. Texas Water Resources Institute, Texas.
- USACE., 2003. *Geospatial Hydrologic Modeling Extension HEC-GeoHMS, User's Manual*. Version 1.1, Hydrologic Engineering Center, December, USA.

Yang, J; Townsend, R.D; Daneshfar B., 2006. *Applying the HEC-RAS model and GIS techniques in river network floodplain delineation*. Department of Civil Engineering, University of Ottawa.

Yeh, W. (1985). *Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review*. *Water Resource Research*, 21(12), pp. 1797- 1818.

Legislação Consultada

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

Decreto-Lei n.º 93/90. DR 65/90 SÉRIE I de 1990-03-19. Ministério do Planeamento e da Administração do Território, Lisboa.

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

Decreto-Lei n.º 344/2007. DR n.º198 SÉRIE I de 2007-10-15. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Lisboa.

Decreto Regulamentar n.º 2/88. DR 16/88 SÉRIE I de 1988-01-20. Ministério do Planeamento e da Administração do Território, Lisboa.

Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2000, que estabelece um quadro de acção comunitária no domínio da política da água, Lisboa.

Directiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2007 relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações, Lisboa.

Lei n.º 58/2005. Diário da República 249 Série I-A de 2005-12-19, Assembleia da República, Lisboa.

Resolução do Conselho de Ministros nº 135/2001, de 2 de Agosto. Presidência do Conselho de Ministros, Lisboa.

Resolução do Conselho de Ministros nº 169/2008. Diário da República, 1.ª série — N.º 227 — 21 de Novembro de 2008. Presidência do Conselho de Ministros, Lisboa.

Sites Consultados

Jornal Oficial da União Europeia – EUR-lex (2007). Acedido em 2007 em: <http://eur-lex.europa.eu>.

Direcção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural – DGADR (2008). Acedido em 2008, em: <http://www.dgadr.pt>.

Hydrologic Engineering Center – HEC (2008). Acedido em 2008 em: <http://www.hec.usace.army.mil>.

Instituto Geográfico do Exército (2008). *Cartas Militar de Portugal Série M888*. Acedido em 2008, em: <http://www.igeoe.pt>.

Instituto Geográfico Português (2008). *Carta de Ocupação do Solo*. Acedido em 2008, em: <http://www.igeo.pt>.

Agência Portuguesa do Ambiente (2009). Acedido em 2009, em: <http://www.iambiente.pt>.

Jornal Oficial da União Europeia – EUR-lex (2009). *LIVRO BRANCO. Adaptação às alterações climáticas: para um quadro de acção europeu*, Bruxelas, Bélgica Acedido em 2009 em: <http://eur-lex.europa.eu>.

Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens (2010). Acedido em 2010, em: <http://cnpgb.inag.pt>.

Diário da República Electrónico (2010). Acedido em 2010, em: <http://www.dre.pt>.

Europa (2010) EDEC – *Esquema de Desenvolvimento Comunitário*. Acedido em 2010, em: <http://europa.eu>.

European Commission Environment (2010). Acedido em 2010 em: http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk.

Global Monitoring for Environment and Security (2010). Acedido em 2010, em: <http://www.gmes.info>.

Instituto da Água (2010). Acedido em 2010, em: <http://www.inag.pt>.

Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território – MAOT (2010). Acedido em 2010, em: <http://www.maotdr.gov.pt>.

Portal da Justiça (2010). Acedido em 2010, em: <http://www.mj.gov.pt>.

Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos – SNIRH (2010). Acedido em 2010 em: <http://snirh.pt>.

ANEXOS

ANEXO I

Tabela 1 – Parâmetros das curvas de IDF válidos para a duração entre 5 a 30 minutos (Brandão *et al*, 2001).

Cidades	Períodos de retorno (anos)															
	2			5			10			50			1000			
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
Peço de Realice	300.70	-0.037	407.77	-0.024	537.07	0.020	742.73	-0.052	916.23	-0.046	920.73	-0.043	1061.60	-0.041		
Casa Escoteira																
Vila da Ponta																
BRUNTA																
MARQUES DO COMOP	149.70	-0.032	179.44	-0.033	212.44	0.046	264.50	-0.041	276.94	-0.041	340.76	-0.049	381.19	-0.045		
Vila Real																
08/002																
08/001	149.96	-0.026	217.29	-0.026	267.63	0.013	367.90	-0.015	403.91	-0.017	500.94	-0.019	542.74	-0.019		
08/001																
08/001																
08/002																
09/001	202.19	0.026	266.64	0.012	303.32	0.020	366.21	0.012	417.19	0.010	467.36	0.017	500.03	0.016		
07/001																
10/001	105.74	-0.029	213.70	-0.030	263.44	-0.031	300.86	-0.031	336.53	-0.031	400.43	-0.032	427.90	-0.032		
10/001																
10/001	142.94	-0.057	179.09	-0.046	223.13	-0.036	266.06	-0.031	278.60	-0.028	330.37	-0.026	362.87	-0.023		
11/001	178.17	-0.030	272.05	-0.028	333.99	-0.028	370.30	-0.029	428.26	-0.030	461.80	-0.030	519.22	-0.031		
11/005	163.11	-0.014	242.78	-0.018	295.51	-0.020	311.56	-0.021	352.71	-0.022	373.97	-0.022	422.71	-0.023		
12/001	159.10	-0.037	215.00	-0.040	251.05	-0.030	303.69	-0.024	328.22	-0.022	403.04	-0.021	462.36	-0.022		
12/001																
13/001	219.66	-0.030	262.71	-0.014	324.65	0.013	371.70	-0.008	466.36	-0.008	546.97	-0.010	606.94	-0.010		
13/002																
21/006	176.16	-0.029	214.52	-0.030	239.93	-0.027	284.96	-0.021	319.85	-0.021	375.21	-0.021	413.04	-0.021		
21/001	167.70	-0.016	264.46	-0.028	305.93	-0.028	324.01	-0.022	351.31	-0.026	420.48	-0.028	461.30	-0.028		
20/001	184.63	-0.015	236.96	-0.021	281.64	-0.026	306.37	-0.026	333.53	-0.026	400.70	-0.022	473.96	-0.023		
22/001																
18/001																
18/001	185.34	-0.028	266.27	-0.035	313.03	-0.021	366.25	-0.011	427.78	-0.012	480.63	-0.012	561.88	-0.018		
20/001																
20/001	165.95	-0.032	234.17	-0.023	284.64	-0.026	317.46	-0.022	368.36	-0.022	408.64	-0.026	461.40	-0.027		
22/002	187.78	-0.024	228.45	-0.024	250.56	-0.020	300.28	-0.012	322.13	-0.010	372.70	-0.010	384.60	-0.010		
25/001	165.40	-0.011	190.75	-0.020	232.23	-0.024	270.64	-0.024	302.07	-0.024	326.92	-0.027	379.12	-0.024		
25/001																
26/001	160.86	0.026	239.04	0.026	274.92	0.023	327.77	0.026	368.19	0.026	406.39	0.021	436.16	0.022		
27/001	167.92	-0.023	218.66	-0.013	240.09	-0.019	310.11	-0.017	340.39	-0.018	400.97	-0.019	438.96	-0.019		
30/002																
31/001																
30/001	143.24	-0.016	209.66	-0.014	251.03	-0.013	307.69	-0.011	362.85	-0.011	400.26	-0.012	420.28	-0.012		
30/001	221.97	-0.019	274.53	-0.020	305.73	-0.020	328.11	-0.021	376.57	-0.021	400.32	-0.021	513.81	-0.021		
32/001	189.46	-0.041	248.46	-0.030	270.65	-0.046	301.44	-0.043	362.69	-0.042	404.89	-0.040	466.23	-0.040		
31/002	163.82	-0.019	204.99	-0.012	232.63	-0.011	283.72	-0.011	319.65	-0.011	373.75	-0.010	406.61	-0.010		
30/002																

Tabela 2 – Parâmetros das curvas de IDF válidos para a duração entre 30 a 6 horas (Brandão et al, 2001).

	Parâmetros de retorno (anos)											
	2		5		10		20		50		100	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Povoado de Graças	208.29	-0.53	347.51	-0.58	445.85	-0.50	541.43	-0.61	686.26	-0.53	766.64	-0.64
Cajal Sotelo												
Vila do Porto												
Beja	243.23	-0.68	467.22	0.76	630.14	0.79	793.34	0.81	1011.70	0.83	1574.50	0.86
Miranda do Alentejo												
Vila Real												
Chaves	211.65	-0.69	390.39	0.75	530.77	0.79	661.62	0.76	827.78	0.81	1063.14	0.83
Amarante												
Carejo												
Escariz												
Vila do Castelo	261.35	-0.62	545.43	0.74	742.60	0.76	912.90	0.75	1215.30	0.78	1428.20	0.80
Ponte Santa do Eléu												
Aveiro (Universidade)	250.70	-0.66	461.63	-0.68	435.95	-0.59	506.26	-0.77	624.26	-0.71	577.67	-0.75
Vila												
Laramão	118.17	-0.46	189.42	0.46	235.34	0.49	284.34	0.57	351.1	0.53	400.79	0.63
São Carlos do	241.72	0.61	378.45	0.63	470.60	0.55	569.43	0.67	675.4	0.68	762.16	0.63
Ponte Loureiras	143.09	-0.49	237.31	-0.53	319.76	-0.51	399.81	-0.61	501.88	-0.62	619.70	-0.70
Covilhã	138.14	-0.49	194.25	0.51	251.27	0.53	320.74	0.54	395.62	0.55	443.41	0.57
Castro Verde	220.67	-0.66	374.39	-0.61	446.65	-0.51	546.43	-0.61	647.17	-0.68	766.63	-0.69
Castelo	220.22	0.66	361.34	0.64	453.73	0.53	544.86	0.63	647.17	0.66	723.16	0.69
Alagoa (Vila)	251.02	-0.62	445.27	-0.64	471.15	-0.51	548.92	-0.65	644.07	-0.61	718.45	-0.64
Alagoa (Porto)	359.15	-0.71	471.24	-0.62	471.24	-0.51	506.26	-0.63	567.65	-0.63	511.24	-0.61
S. Martinho do	205.89	-0.59	380.70	-0.54	465.17	-0.55	524.01	-0.51	622.90	-0.50	663.34	-0.62
Sotelo												
Barragem de Castelo de Bode												
Barragem de	229.15	-0.62	309.15	-0.64	354.10	-0.59	427.67	-0.71	507.03	-0.73	504.35	-0.75
Barragem de Magos												
Pavia	237.25	-0.66	306.77	-0.67	353.20	-0.54	387.69	-0.63	492.50	-0.63	489.43	-0.63
Encra Camêlo	366.51	-0.73	571.42	-0.75	709.63	-0.74	943.71	-0.75	1077.10	-0.75	1427.90	-0.76
Boja	303.65	-0.69	468.63	-0.77	581.61	-0.74	682.32	-0.75	837.37	-0.76	947.16	-0.78
Palácio Alto												
Sines	318.67	-0.75	416.63	-0.71	453.30	-0.71	546.97	-0.75	629.39	-0.70	591.15	-0.70
Ribeiras	286.02	-0.66	484.95	-0.68	619.29	-0.61	748.30	-0.67	917.30	-0.70	1043.80	-0.70
Castelo												
S. Brás de Alportel*												
Figueirais*												
Porto de Rêde	364.91	-0.68	365.61	0.70	441.25	0.76	513.84	0.71	602.46	0.71	677.76	0.71
Montique	246.74	-0.66	312.01	-0.68	361.22	-0.61	403.65	-0.67	473.87	-0.68	522.31	-0.65
Sages												
Faro	312.50	-0.65	475.42	-0.66	563.37	-0.68	666.94	-0.68	821.02	-0.69	921.51	-0.69
Vila Real de São João	342.63	-0.66	463.64	-0.64	577.01	-0.66	666.52	-0.67	781.29	-0.68	869.17	-0.69



Tabela 3 – Parâmetros das curvas de IDF válidos para a duração entre 6 a 48 horas (Brandão et al, 2001).

Códigos	Períodos de retorno (anos)															
	2		5		10		20		50		100		500		1000	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
	Parâmetros (mm)=(D _{max}) ^b															
	IDF (milímetros das 6 às 48 h)															
02G09	292.29	-0.989	287.00	-0.545	293.03	-0.527	302.25	-0.513	317.15	-0.499	329.73	-0.491	361.60	-0.477	376.10	-0.472
03J05																
08G01																
05I701	255.40	-0.701	269.27	-0.689	283.98	-0.656	299.23	-0.646	321.19	-0.636	338.48	-0.630	360.08	-0.620	368.44	-0.617
06K07																
08M01	171.16	-0.664	189.58	-0.636	203.14	-0.627	216.72	-0.621	234.84	-0.614	248.70	-0.610	281.34	-0.603	296.54	-0.601
06I01																
06P01																
08P02																
08E03	325.76	-0.662	317.36	-0.616	320.06	-0.599	325.96	-0.586	336.65	-0.574	346.17	-0.566	371.29	-0.552	383.00	-0.547
07F01																
10F01	278.52	-0.659	360.93	-0.677	415.45	-0.681	467.72	-0.684	535.37	-0.687	586.04	-0.689	703.13	-0.693	753.46	-0.694
10J01																
10H01	208.61	-0.604	295.18	-0.496	293.03	-0.492	270.27	-0.488	262.72	-0.485	309.62	-0.482	348.84	-0.478	366.76	-0.477
11J01	239.96	-0.639	347.36	-0.661	419.30	-0.656	498.63	-0.660	578.72	-0.663	646.41	-0.666	803.21	-0.669	870.74	-0.671
11L05	223.11	-0.559	246.16	-0.542	262.86	-0.534	279.48	-0.528	301.63	-0.522	318.54	-0.518	348.34	-0.511	375.66	-0.508
12L03	153.40	-0.505	168.42	-0.488	179.26	-0.480	190.07	-0.473	204.45	-0.467	215.44	-0.463	241.30	-0.455	252.57	-0.453
12G01	271.67	-0.663	485.15	-0.695	639.06	-0.712	792.84	-0.725	938.29	-0.738	1165.70	-0.745	1527.60	-0.758	1899.90	-0.762
13L02	201.11	-0.5287	213.87	-0.5023	224.77	-0.4901	236.26	-0.4809	262.11	-0.4715	264.47	-0.4628	294.1	-0.4566	307.14	-0.4521
21C06	362.78	-0.698	545.98	-0.721	670.81	-0.732	792.97	-0.739	923.23	-0.741	1074.90	-0.752	1357.90	-0.760	1479.00	-0.762
21C02	474.64	-0.756	763.29	-0.764	956.11	-0.767	1136.40	-0.769	1378.10	-0.771	1567.10	-0.772	1970.90	-0.773	2148.90	-0.774
20C01	381.00	-0.705	612.46	-0.753	1122.70	-0.770	1430.30	-0.781	1837.50	-0.792	2147.20	-0.797	2872.40	-0.807	3186.90	-0.810
22D01																
18H01																
18M01	252.46	-0.639	287.90	-0.624	312.66	-0.617	336.72	-0.612	368.50	-0.606	392.58	-0.603	448.78	-0.597	473.11	-0.596
20E01																
20J01	262.93	-0.680	396.64	-0.689	483.66	-0.692	588.61	-0.695	678.44	-0.697	760.81	-0.698	961.27	-0.700	1033.20	-0.701
22J02	364.04	-0.712	532.50	-0.732	654.02	-0.741	772.17	-0.747	926.70	-0.753	1043.40	-0.757	1314.90	-0.764	1432.20	-0.766
25J02	368.82	-0.725	511.80	-0.742	608.92	-0.750	703.36	-0.756	826.97	-0.762	920.38	-0.766	1138.10	-0.773	1232.00	-0.776
29G01																
26D01	293.69	-0.709	465.06	-0.733	566.36	-0.744	675.25	-0.752	818.37	-0.759	926.60	-0.764	1180.00	-0.772	1269.60	-0.775
27G01	489.17	-0.750	839.99	-0.778	1082.00	-0.790	1318.40	-0.797	1628.20	-0.805	1862.50	-0.809	2408.20	-0.816	2644.10	-0.819
30J02																
31J01																
30M01																
31F01	420.21	-0.773	481.99	-0.749	527.23	-0.739	572.27	-0.732	632.04	-0.725	677.55	-0.721	784.16	-0.714	890.42	-0.711
30F01	693.69	-0.710	1637.20	-0.786	2342.80	-0.810	3107.90	-0.825	4136.30	-0.840	4923.70	-0.848	6783.60	-0.860	7694.20	-0.864
32D01																
31J02	405.67	-0.726	594.84	-0.724	720.14	-0.724	840.34	-0.723	986.95	-0.723	1112.60	-0.723	1382.10	-0.722	1497.90	-0.722
30M02	432.64	-0.735	535.23	-0.718	606.53	-0.711	674.11	-0.706	763.99	-0.701	831.45	-0.699	968.98	-0.694	1056.30	-0.693

* Digitalização não sistemática (DNE)

Tabela 3 – Posto Udográfico de Portalegre 18M/01 período de retorno igual a 100 anos.

a	b	t(min)	I(mm/h)	P(mm)	Hora
287,78	-0,4041	15	96,339	24,085	15
884,39	-0,7391	60	42,896	42,896	1
		120	25,699	51,399	2
		180	19,045	57,134	3
		360	11,410	68,459	6
2147,2	-0,7974	720	11,309	135,712	12
		1440	6,507	156,173	24
		2880	3,744	179,719	48

ANEXO II

Tabela 1 – Números de Escoamento CN para diversas utilizações do solo segundo SCS (Lencastre e Franco, 2003).

Utilização ou cobertura do solo	Grupo hidrológico do solo			
	A	B	C	D
Terras lavadas 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	81
densas	25	55	70	77
Espaços abertos, telhados, campos de golfe, cemitérios, etc.				
-- em boas condições cobertura com 75% ou mais de relva	39	61	74	80
-- boas 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				
Tamanho das lotes (média) Impervios (média)				
(m ²) (%)				
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
Luvas de parques pavimentados, telhados, passeios, etc.	98	98	98	98
Ruas, estradas				
-- pavimentadas, com sarjetas e coletores	98	98	98	98
-- empedradas	76	85	89	91
-- terra batida	72	87	87	89

Tabela 2 – Definição das condições de antecedentes de humidade (Correia, 1984b).

Condição antecedente de humidade	Definição
AMCI	Situação em que os solos estão secos, mas acima do ponto de emurchecimento. A consideração deste caso é pouco recomendável para o estudo de caudais de cheia.
AMCII	Situação média que, segundo Morel-Seytoux e Verdin (1980), deve corresponder aproximadamente à capacidade do campo. Esta situação corresponde provavelmente às condições de humidade antecedentes de cheias de pequena dimensão.
AMCIII	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.

Tabela 3 – Correspondência entre os Números de Escoamento CN para diferentes condições de humedecimento do solo (Lencastre e Franco, 2003).

	AMC ¹			AMC ²			AMC ³			AMC ⁴		
	II	I	III	II	I	III	II	I	III	II	I	III
100	100	100	100	80	63	91	60	40	78	40	22	60
99	97	100		79	62	91	59	39	77	19	21	59
98	94	99		78	60	90	58	38	76	18	21	58
97	91	99		77	59	89	57	37	75	17	20	57
96	89	99		76	58	89	56	36	75	16	19	56
95	87	98		75	57	88	55	35	74	15	18	55
94	85	98		74	55	88	54	34	73	14	18	54
93	83	98		73	54	87	53	33	72	13	17	53
92	81	97		72	53	86	52	32	71	12	16	52
91	80	97		71	52	86	51	31	70	11	16	51
90	78	96		70	51	85	50	31	70	10	15	50
89	75	95		69	50	84	49	30	69	9	12	49
88	75	95		68	48	84	48	29	68	7	1	37
87	73	95		67	47	83	47	29	67	5	6	37
86	72	94		65	46	82	46	27	66	10	4	22
85	70	94		65	45	82	45	26	65	5	2	13
84	68	93		64	44	81	44	25	64	0	0	0
83	67	93		63	43	80	43	25	63			
82	66	92		62	42	79	42	24	62			
81	64	92		61	41	78	41	23	61			

ANEXO III

Tabela 1 – Valores do coeficiente de atrito de Manning (Brunner, 2002).

Type of Channel and Description		Minimum	Normal	Maximum
<i>A. Natural Streams</i>				
1. Main Channels				
a.	Clean, straight, full, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b.	Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c.	Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d.	Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e.	Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f.	Same as "d" but more stones	0.045	0.050	0.060
g.	Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h.	Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150
2. Flood Plains				
a.	Pasture no brush	0.025	0.030	0.035
1.	Short grass	0.030	0.035	0.050
2.	High grass			
b.	Cultivated areas			
1.	No crop	0.020	0.030	0.040
2.	Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3.	Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c.	Brush			
1.	Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2.	Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3.	Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4.	Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5.	Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d.	Trees			
1.	Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
2.	Same as above, but heavy sprouts	0.050	0.060	0.080
3.	Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.080	0.100	0.120
4.	Same as above, but with flow into branches	0.100	0.120	0.160
5.	Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200