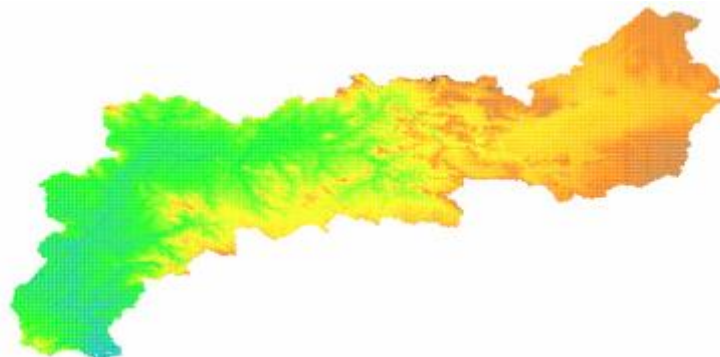




## **Modelação hidrológica da bacia internacional do Guadiana**

**Nelson Luís Nogueira Canuto**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia do Ambiente**

### **Júri**

|               |                                                                |
|---------------|----------------------------------------------------------------|
| Presidente:   | Professor Doutor Luís Filipe Tavares Ribeiro                   |
| Orientador:   | Professor Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves                 |
| Coorientador: | Doutor Tiago Cunha Brito Ramos                                 |
| Vogal:        | Professor Doutor Rodrigo De Almada Cardoso Proença de Oliveira |

**Maio de 2019**

# Agradecimentos

Para a realização deste trabalho foi imprescindível o apoio e a ajuda que diversas pessoas deram-me ao longo destes meses, e aqui deixo o meu enorme agradecimento.

Ao meu Orientador, professor Ramiro Neves, agradeço a possibilidade de realizar a dissertação junto ao grupo de investigação MARETEC, o que permitiu obter as ferramentas básicas no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também o tempo disponibilizado no esclarecimento das minhas dúvidas e as sugestões fornecidas, tendo em consideração a sua agenda bastante ocupada.

Agradeço ao coorientador Tiago Ramos, à Ana Oliveira e ao Lucian Simionesei pela sugestão do tema de dissertação, pela sua incansável paciência e disponibilidade para me ensinar o funcionamento do modelo matemático utilizado, na ajuda de recolha de informação e pelas sugestões e ajuda prestada nos momentos que algo inesperado acontecia.

Agradeço ao Carlos Amilton Santos pelo entusiasmo demonstrado no desenvolvimento do meu trabalho e pela ajuda fornecida.

Agradeço aos restantes membros do grupo MARETEC, em particular o Jorge Palma e o João Sobrinho pela ajuda e disponibilidade nos problemas informáticos que foram aparecendo.

Por fim agradeço aos amigos e familiares, em especial, ao Gerson, ao Tiago, a Raquel, ao Filipe e ao Luís que demonstraram interesse em compreender o desenvolvimento deste trabalho.

## Resumo

A bacia hidrográfica do Guadiana, situada na península Ibérica, apresenta em quase toda a sua extensão um clima temperado seco, com elevado risco de escassez de água em anos secos, sendo necessário que os planos de gestão dos recursos hídricos tenham em consideração as necessidades de água da população, da agricultura, da indústria e as necessidades ecológicas dos rios nos períodos de maior escassez. Com o aumento da frequência dos fenómenos climáticos extremos, um planeamento cuidadoso é imprescindível. A modelação ambiental é uma ferramenta fundamental para as entidades gestoras, uma vez que a análise de diversos cenários com diferentes tendências climáticas e de consumos permite identificar as zonas de menor resiliência.

Neste trabalho tem-se como principal objetivo simular a dinâmica da água na bacia hidrográfica do Guadiana com o modelo MOHID-Land. A dinâmica dos recursos hídricos na bacia hidrográfica foi simulada durante o período de 1979 a 2014, nomeadamente, o escoamento de água superficial, a taxa de evapotranspiração, as quantidades de água armazenada no solo, nos aquíferos aluviais e em barragens de capacidade superior a 10 hm<sup>3</sup>. A calibração e a validação do modelo foram efetuadas para diferentes períodos, de 1985 a 1995 e de 1995 a 2014 respetivamente, através do uso de diversos parâmetros estatísticos que comparam os caudais obtidos na simulação com os caudais medidos nas diversas estações hidrométricas existentes na bacia.

A partir dos resultados da calibração e validação do modelo verifica-se que existem diferenças significativas entre as estações hidrométricas com e sem influência de albufeiras, bem como entre as estações localizadas em território espanhol e em território português, com as estações hidrométricas do território espanhol apresentarem áreas de drenagem superiores.

**Palavras-Chave:** MOHID-Land, Guadiana, Modelação hidrológica, Bacia hidrográfica, Balanço de água.

# Abstract

The Guadiana hydrographic basin is located in the Iberia peninsula presenting a dry temperate climate in almost all its extension with high risk of water scarcity in dry years. It is necessary for the management of the water resources to be aware of the needs that population, agriculture, industry and river ecology have when there is less water available. With an increasing frequency of extreme climate phenomena, it becomes necessary for water management to be carefully planned. The environmental modelling is an indispensable tool for the water managers since it allows different climate trends and water consumptions to be analyzed in order to identify less resilient locations.

The main objective of this work is to simulate the water dynamics by applying the MOHID-Land mathematical model in the Guadiana hydrological basin. The basin modelling allowed to understand the evolution of water resources between 1979 and 2014, by simulating the main processes of the water cycle that occur in the basin, such as the surface runoff, the evapotranspiration, the water stored in the soil, in aquifer, and in reservoirs with capacity higher than 10 hm<sup>3</sup>. The calibration and validation of the model were done by analyzing several statistical parameters that compare the flows obtained in the simulation and the flows recorded in the hydrometric stations present along the basin.

From the results of the calibration and validation of the model there were noticed differences between the hydrometric stations with and without reservoirs influence as well as a difference in the results obtained in the Portuguese and Spanish stations, with last one having higher drainage areas.

**Key words:** MOHID-Land, Guadiana, Hydrologic modeling, Hydrographic basin, Water balance.

## Lista de notações e siglas

|             |                                                                            |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------|
| AGUAMOD     | Projeto Europeu de gestão de bacias hidrográficas no sudoeste europeu.     |
| ANN         | Artificial Neural Network                                                  |
| ANSI FORTAN | Linguagem de Programação                                                   |
| APA         | Agência Portuguesa do Ambiente                                             |
| BSk         | Clima seco de estepe fria                                                  |
| Csa         | Clima temperado com verão seco                                             |
| CHG         | Confederación Hidrográfica del Guadiana                                    |
| CADC        | Comissão para a Aplicação e Desenvolvimento da Convenção de Albufeira      |
| DTM         | Digital Terrain Model                                                      |
| GLC 2000    | Global land cover 2000                                                     |
| HBV         | Hydrologiska Byrans Vattenavdelning                                        |
| HDF         | Hierarchical Data Format                                                   |
| IST         | Instituto Superior Técnico                                                 |
| MARETEC     | Marine and Environmental Technology Research Center                        |
| PGRH        | Planos de Gestão de Região Hidrográfica                                    |
| SWAT        | Soil and Water Assessment Tool                                             |
| SAFRAN      | Système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige |

## Lista de símbolos

|            |                                             |                |
|------------|---------------------------------------------|----------------|
| $\alpha$   | Inverso da pressão de entrada de ar no solo | $[m^{-1}]$     |
| $\beta$    | Propriedade exemplo                         | $[-]$          |
| $\rho$     | Densidade                                   | $[kg.m^{-3}]$  |
| $\rho_a$   | Densidade do ar                             | $[kg.m^{-3}]$  |
| $\theta$   | Humidade                                    | $[m^3.m^{-3}]$ |
| $\theta_r$ | Teor de água residual no solo               | $[m^3.m^{-3}]$ |
| $\theta_s$ | Teor de água no solo na saturação           | $[m^3.m^{-3}]$ |
| $\Phi$     | Difusividade                                | $[m.s^{-1}]$   |

|               |                                            |                                          |
|---------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|
| $\phi_{H_2O}$ | Escoamento de água no solo                 | [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]       |
| $\Delta$      | Declive da curva de pressão do vapor       | [kPa.°C <sup>-1</sup> ]                  |
| $\gamma$      | Constante psicrométrica                    | [kPa.°C <sup>-1</sup> ]                  |
| $\mu$         | Resistência de atrito                      | [-]                                      |
| $e_a$         | Pressão atual do vapor de água             | [kPa]                                    |
| $e_s$         | Pressão do vapor de saturação              | [kPa]                                    |
| $A$           | Área da secção de corte                    | [m <sup>2</sup> ]                        |
| $CN$          | Número de escoamento                       | [-]                                      |
| $E_{hvb}$     | Evaporação diária                          | [mm.dia <sup>-1</sup> ]                  |
| $ET$          | Evapotranspiração                          | [mm]                                     |
| $ET_o$        | Evapotranspiração de referência            | [MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> ] |
| $ETP$         | Evapotranspiração potencial                | [MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> ] |
| $EP$          | Evaporação potencial                       | [MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> ] |
| $g$           | Aceleração da gravidade                    | [m.s <sup>-2</sup> ]                     |
| $G$           | Fluxo de calor do Solo                     | [MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> ] |
| $h$           | Pressão efetiva                            | [m]                                      |
| $h_{flow}$    | Altura da coluna de água                   | [m]                                      |
| $h_{full}$    | Altura máxima da coluna de água            | [m]                                      |
| $H$           | Carga hidráulica                           | [m]                                      |
| $I_a$         | Infiltração e retenção de água superficial | [mm]                                     |
| $K$           | Condutividade hidráulica                   | [m.s <sup>-1</sup> ]                     |
| $K_c$         | Coeficiente cultural                       | [-]                                      |
| $K_s$         | Condutividade hidráulica de saturação      | [m.s <sup>-1</sup> ]                     |
| $Kh$          | Factor de condutividade horizontal         | [-]                                      |
| $L$           | Conetividade empírica entre poros          | [-]                                      |
| $LAI$         | Índice de área foliar                      | [-]                                      |
| $LK$          | Água acumulada em lagos                    | [mm]                                     |

|           |                                                               |                                          |
|-----------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| $LZ$      | Limite inferior de água subterrânea                           | [mm]                                     |
| $m$       | Massa de um corpo                                             | [kg]                                     |
| $m_n$     | Coeficiente no cálculo da condutividade                       | [-]                                      |
| $m_r$     | Coeficiente de rugosidade de Manning                          | [s.m <sup>-1/3</sup> ]                   |
| $\vec{n}$ | Normal exterior unitária                                      | [-]                                      |
| $n$       | Parâmetro empírico do declive das curvas $\theta(h)$ e $K(h)$ | [-]                                      |
| $P$       | Precipitação no cálculo do $CN$                               | [mm]                                     |
| $P_{hvb}$ | Precipitação diária                                           | [mm.dia <sup>-1</sup> ]                  |
| $PM$      | Precipitação mensal no mês mais quente do ano                 | [mm]                                     |
| $pM$      | Precipitação mensal no mês mais frio do ano                   | [mm]                                     |
| $Q$       | Escoamento no cálculo do $CN$                                 | [mm]                                     |
| $Q_{gw}$  | Escoamento de água subterrânea                                | [mm]                                     |
| $Q_{hvb}$ | Escoamento superficial diário                                 | [mm.dia <sup>-1</sup> ]                  |
| $Q_s$     | Escoamento superficial                                        | [mm]                                     |
| $r_a$     | Resistência aerodinâmica                                      | [s.m <sup>-1</sup> ]                     |
| $r_c$     | Resistência no corpo                                          | [s.m <sup>-1</sup> ]                     |
| $R_h$     | Raio hidráulico                                               | [m]                                      |
| $R_n$     | Radiação à superfície do solo                                 | [MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> ] |
| $R_t$     | Radiação no topo da atmosfera                                 | [MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> ] |
| $R_v$     | Precipitação                                                  | [mm]                                     |
| $S$       | Capacidade máxima de retenção de água no solo                 | [mm]                                     |
| $S_E$     | Saturação efectiva                                            | [-]                                      |
| $S_f$     | Declive da superfície de água                                 | [m.m <sup>-1</sup> ]                     |
| $SM$      | Humidade no solo                                              | [mm]                                     |
| $SP$      | Neve                                                          | [mm]                                     |
| $SW_0$    | Humidade no instante inicial $t_0$                            | [mm]                                     |
| $SW_t$    | Humidade no instante $t$                                      | [mm]                                     |

|            |                                             |                                          |
|------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|
| $t$        | Tempo                                       | [s]                                      |
| $T$        | Temperatura                                 | [°C]                                     |
| $T_a$      | Fração de radiação absorvida na atmosfera   | [-]                                      |
| $T_m$      | Transmitividade                             | [-]                                      |
| $TM$       | Temperatura média no mês mais quente do ano | [°C]                                     |
| $tM$       | Temperatura média no mês mais frio do ano   | [°C]                                     |
| $TP$       | Transpiração potencial                      | [MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> ] |
| $U_2$      | Velocidade do vento a 2 metros de altura    | [m.s <sup>-1</sup> ]                     |
| $UZ$       | Limite superior de água subterrânea         | [mm]                                     |
| $\vec{v}$  | Velocidade vetorial                         | [m.s <sup>-1</sup> ]                     |
| $Vol$      | Volume                                      | [m <sup>3</sup> ]                        |
| $V_T$      | Volume total da célula                      | [m <sup>3</sup> ]                        |
| $V_w$      | Volume de água na célula                    | [m <sup>3</sup> ]                        |
| $W_{flow}$ | Caudal na coluna de água                    | [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]       |
| $W_{full}$ | Caudal máximo da coluna de água             | [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]       |
| $W_{see}$  | Água na zona de aeração do solo             | [mm]                                     |

## Índice

.....i



|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| Agradecimentos.....                            | i   |
| Resumo .....                                   | ii  |
| Abstract.....                                  | iii |
| Lista de notações e siglas .....               | iv  |
| Lista de símbolos.....                         | iv  |
| 1 Introdução.....                              | 1   |
| 1.1 Objetivos.....                             | 1   |
| 1.2 Estrutura do Documento.....                | 1   |
| 1.3 Enquadramento geral .....                  | 2   |
| 2 Descrição da área de estudo.....             | 7   |
| 2.1 Localização.....                           | 7   |
| 2.2 Delimitações administrativas .....         | 7   |
| 2.3 População.....                             | 8   |
| 2.4 Morfologia.....                            | 8   |
| 2.4.1 Tipo de solo .....                       | 10  |
| 2.4.2 Uso do solo.....                         | 12  |
| 2.5 Clima.....                                 | 13  |
| 2.5.1 Temperatura .....                        | 14  |
| 2.5.2 Precipitação .....                       | 15  |
| 2.5.3 Humidade .....                           | 16  |
| 2.5.3 Radiação solar.....                      | 16  |
| 3 Metodologia .....                            | 18  |
| 3.1 Modelo MOHID .....                         | 18  |
| 3.1.1 MOHID Land.....                          | 18  |
| 3.1.2 Equações.....                            | 20  |
| 3.2 Implementação do modelo .....              | 25  |
| 3.3 Avaliação de resultados .....              | 33  |
| 4 Resultados.....                              | 37  |
| 4.1 Análise de sensibilidade.....              | 37  |
| 4.1.1 Rede de drenagem.....                    | 37  |
| 4.1.2 Número de Escoamento.....                | 38  |
| 4.1.3 Coeficiente de Manning.....              | 40  |
| 4.1.4 Coeficiente de cultura vegetal .....     | 42  |
| 4.1.5 Condutividade de saturação do solo ..... | 44  |
| 4.1.6 Condutividade horizontal do solo .....   | 46  |
| 4.2 Calibração .....                           | 49  |
| 4.3 Validação.....                             | 59  |
| 5 Discussão .....                              | 70  |
| 6 Conclusão.....                               | 77  |
| Referências Bibliográficas .....               | 78  |

## Tabela de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1- DELIMITAÇÃO DA BACIA DO GUADIANA .....                                                                                                                                                                  | 7  |
| FIGURA 2 – BACIA HIDROGRÁFICA DO GUADIANA E AS DELIMITAÇÕES REGIONAIS NUTS 3 (FONTE: EUROSTAT).....                                                                                                               | 8  |
| FIGURA 3 – DELIMITAÇÕES DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS NA ENVOLVENTE DO GUADIANA (FONTE: APA).....                                                                                                                      | 9  |
| FIGURA 4 – ZONAS MORFOLÓGICAS DO GUADIANA. ....                                                                                                                                                                   | 9  |
| FIGURA 5 – TIPOS DE SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO GUADIANA (FONTE (ESDAC, 2001)). ....                                                                                                                            | 10 |
| FIGURA 6 – USO DE SOLOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO GUADIANA A PARTIR DA CARTA GLC 2000 .....                                                                                                                        | 12 |
| FIGURA 7 – CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER NA PENÍNSULA IBÉRICA E ILHAS BALEARES. (FONTE: IPMA/AEMET NO PERÍODO ENTRE 1971 E 2000 - MODIFICADO) .....                                                    | 14 |
| FIGURA 8 – VALORES MÉDIOS E EXTREMOS MENSAIS DE TEMPERATURA DO AR (°C) REGISTRADOS EM ÉVORA (FONTE : (IPMA, 2015) NO PERÍODO 1971-2000) E EM CIUDAD REAL (FONTE: (AEMET, 2018) NO PERÍODO 1981-2010) .....        | 15 |
| FIGURA 9 – VALORES MÉDIOS DAS QUANTIDADES TOTAIS MENSAIS DE PRECIPITAÇÃO (MM) REGISTRADOS EM ÉVORA (FONTE : (IPMA, 2015) NO PERÍODO 1971-2000) E EM CIUDAD REAL (FONTE: (AEMET, 2018) NO PERÍODO 1981-2010) ..... | 15 |
| FIGURA 10 – VALORES DE HUMIDADE RELATIVA MÉDIOS (%) REGISTRADOS EM ÉVORA (FONTE : (IPMA, 2015) NO PERÍODO 1971-2000) E CIUDAD REAL (FONTE: (AEMET, 2018) NO PERÍODO 1981-2010) .....                              | 16 |
| FIGURA 11 - IRRADIÂNCIA GLOBAL MÉDIA (1983-2005) (FONTE: (AEMET, 2012)) .....                                                                                                                                     | 17 |
| FIGURA 12 – HIPSOMETRIA (M) IMPLEMENTADA NO MODELO. ....                                                                                                                                                          | 25 |
| FIGURA 13 – DELINEAÇÃO DA BACIA UTILIZADA PARA A MODELAÇÃO. ....                                                                                                                                                  | 26 |
| FIGURA 14 –REDE DE DRENAGEM IMPLEMENTADA NO MODELO. ....                                                                                                                                                          | 26 |
| FIGURA 15 – FORMATO DA SECÇÃO DE CORTE DA REDE DE DRENAGEM PARA OS DIFERENTES S IMPLEMENTADOS NA EQUAÇÃO (33) (FONTE: (NEAL, ET AL., 2015)).....                                                                  | 27 |
| FIGURA 16 – TIPOS DE SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO GUADIANA. ....                                                                                                                                                 | 29 |
| FIGURA 17 – USO DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO GUADIANA IMPLEMENTADO NO MODELO. ....                                                                                                                            | 31 |
| FIGURA 18 - LOCALIZAÇÃO DAS ALBUFEIRAS COM CAPACIDADE SUPERIOR A 10 HM <sup>3</sup> DE ÁGUA IMPLEMENTADOS NO INÍCIO E AO LONGO DA SIMULAÇÃO. ....                                                                 | 32 |
| FIGURA 19 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS EXISTENTES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO GUADIANA UTILIZADAS NO MODELO, COM E SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS.....                                                     | 34 |
| FIGURA 20 - CAUDAIS DIÁRIOS DE ESCOAMENTO PARA DIFERENTES NÚMEROS DE ESCOAMENTO NA ESTAÇÃO 4004. ....                                                                                                             | 38 |
| FIGURA 21 - CAUDAIS DIÁRIOS DE ESCOAMENTO PARA DIFERENTES NÚMEROS DE ESCOAMENTO NA ESTAÇÃO 4201.....                                                                                                              | 38 |
| FIGURA 22 - CAUDAIS DIÁRIOS DE ESCOAMENTO PARA DIFERENTES NÚMEROS DE ESCOAMENTO NA ESTAÇÃO 4224.....                                                                                                              | 39 |
| FIGURA 23- CAUDAIS HORÁRIOS DE ESCOAMENTO PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE MANNING NA ESTAÇÃO 4108 .....                                                                                                           | 40 |
| FIGURA 24- CAUDAIS HORÁRIOS DE ESCOAMENTO PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE MANNING NA ESTAÇÃO 4224. ....                                                                                                           | 41 |
| FIGURA 25 - CAUDAIS HORÁRIOS DE ESCOAMENTO PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE MANNING NA ESTAÇÃO 4201. ....                                                                                                          | 41 |
| FIGURA 26 - CAUDAIS DIÁRIOS DE ESCOAMENTO PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE VEGETAÇÃO ( $K_c$ ) NA ESTAÇÃO 4201. ....                                                                                               | 43 |
| FIGURA 27 - CAUDAIS DIÁRIOS DE ESCOAMENTO PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE VEGETAÇÃO ( $K_c$ ) NA ESTAÇÃO 4224. ....                                                                                               | 43 |
| FIGURA 28 - CAUDAIS DIÁRIOS DE ESCOAMENTO PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE VEGETAÇÃO ( $K_c$ ) NA ESTAÇÃO 4108. ....                                                                                               | 43 |
| FIGURA 29 -CAUDAIS MENSAIS DE ESCOAMENTO PARA DIFERENTES CONDUTIVIDADES SATURADAS ( $M.S^{-1}$ ) DO SOLO NA ESTAÇÃO 4224. ....                                                                                    | 44 |
| FIGURA 30 - CAUDAIS MENSAIS DE ESCOAMENTO PARA DIFERENTES CONDUTIVIDADES SATURADAS ( $M.S^{-1}$ ) DO SOLO NA ESTAÇÃO 4201. ....                                                                                   | 45 |
| FIGURA 31 – CAUDAIS DIÁRIOS DE ESCOAMENTO PARA DIFERENTES CONDUTIVIDADES SATURADAS ( $M.S^{-1}$ ) DO SOLO NA ESTAÇÃO 4004 .....                                                                                   | 46 |
| FIGURA 32 - CAUDAL DIÁRIO DE ESCOAMENTO NA REDE DE DRENAGEM PARA DIFERENTES FATORES DE CONDUTIVIDADE HORIZONTAL NA ESTAÇÃO 4004. ....                                                                             | 47 |
| FIGURA 33 - CAUDAL DIÁRIO DE ESCOAMENTO NA REDE DE DRENAGEM PARA DIFERENTES FATORES DE CONDUTIVIDADE HORIZONTAL NA ESTAÇÃO 4201. ....                                                                             | 47 |

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 34 - CAUDAL DIÁRIO DE ESCOAMENTO NA REDE DE DRENAGEM PARA DIFERENTES FATORES DE CONDUTIVIDADE HORIZONTAL NA ESTAÇÃO 4224. ....                                  | 48 |
| FIGURA 35 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA ENTRADAS NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS. ....         | 49 |
| FIGURA 36 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA 4255 NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....              | 50 |
| FIGURA 37 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA AMIEIRA NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS. ....          | 51 |
| FIGURA 38 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA 4212 NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....              | 52 |
| FIGURA 39 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA 4004 NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....              | 53 |
| FIGURA 40 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA MONTE DOS FORTES NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS. .... | 54 |
| FIGURA 41 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA 4214 NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO COM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....              | 55 |
| FIGURA 42 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA PULO DO LOBO NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO COM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS. ....     | 56 |
| FIGURA 43 - RESULTADOS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DAS DIFERENTES ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS PARA O PARÂMETRO NSE. ....                                                          | 57 |
| FIGURA 44 - RESULTADOS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DAS DIFERENTES ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS PARA O PARÂMETRO $R^2$ . ....                                                       | 57 |
| FIGURA 45 - RESULTADOS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DAS DIFERENTES ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS PARA O PARÂMETRO NRMSE. ....                                                        | 58 |
| FIGURA 46 - RESULTADOS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DAS DIFERENTES ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS PARA O PARÂMETRO PBIAS. ....                                                        | 58 |
| FIGURA 47 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA ENTRADAS NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS, EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS. ....         | 59 |
| FIGURA 48 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA 4255 NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO COM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....               | 60 |
| FIGURA 49 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA AMIEIRA NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO COM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS. ....           | 61 |
| FIGURA 50 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA 4212 NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS, EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....              | 62 |
| FIGURA 51 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA 4004 NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS, EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....              | 63 |
| FIGURA 52 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA MONTE DOS FORTES NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS, EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS. .... | 64 |
| FIGURA 53 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA 4214 NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO COM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....               | 65 |
| FIGURA 54 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO HIDROGRÁFICA PULO DO LOBO NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO COM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS. ....      | 66 |
| FIGURA 55 - RESULTADOS OBTIDOS NA VALIDAÇÃO DAS DIFERENTES ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS PARA O PARÂMETRO NSE. ....                                                           | 67 |
| FIGURA 56 - RESULTADOS OBTIDOS NA VALIDAÇÃO DAS DIFERENTES ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS PARA O PARÂMETRO $R^2$ . ....                                                        | 67 |
| FIGURA 57 -- RESULTADOS OBTIDOS NA VALIDAÇÃO DAS DIFERENTES ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS PARA O PARÂMETRO NRMSE. ....                                                        | 68 |
| FIGURA 58 -- RESULTADOS OBTIDOS NA VALIDAÇÃO DAS DIFERENTES ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS PARA O PARÂMETRO PBIAS. ....                                                        | 68 |
| FIGURA 59 - RESUMO DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA CADA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA, CONSIDERANDO TODOS OS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS. ....                                    | 70 |
| FIGURA 60 - RESUMO DOS RESULTADOS DA VALIDAÇÃO PARA CADA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA, CONSIDERANDO TODOS OS COEFICIENTES ESTATÍSTICOS. ....                                   | 71 |
| FIGURA 61 - CAUDAIS E VOLUMES SIMULADOS E REGISTRADOS NA ALBUFEIRA GARCIA DE SOLA NO PERÍODO DE 1 DE OUTUBRO DE 1985 A 1 DE OUTUBRO DE 1987. ....                      | 75 |
| FIGURA 62 - CAUDAL NA ESTAÇÃO 4108 REGISTRADO E SIMULADO NO PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE 5 DE NOVEMBRO E 20 DE DEZEMBRO DE 1995. ....                                    | 76 |

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1- PROPRIEDADES DEFINIDAS NO FICHEIRO DAS PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA BACIA .....                                                                | 25 |
| TABELA 2 - DIMENSÕES DE DIVERSAS SECÇÕES DE CORTE DA REDE DE DRENAGEM .....                                                                             | 28 |
| TABELA 3 – CAMADAS DO SOLO IMPLEMENTADAS NO MODELO.....                                                                                                 | 29 |
| TABELA 4 –DIVERSAS PROPRIEDADES PARA OS DIFERENTES TIPOS DE SOLO(FONTES: (USDA-SCS, 1972) E (J.H.M, LILLY, NEMES, & BAS, 1999) ). .....                 | 30 |
| TABELA 5 – PROPRIEDADES DO USO DE SOLOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO GUADIANA .....                                                                         | 31 |
| TABELA 6 – DIFERENÇAS ENTRE AS DIMENSÕES INICIAIS E FINAIS DA REDE DE DRENAGEM. ....                                                                    | 37 |
| TABELA 7 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO ENTRADAS NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS.....      | 49 |
| TABELA 8 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO 4255 NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....          | 50 |
| TABELA 9 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO AMIEIRA NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRA EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS. ....       | 51 |
| TABELA 10 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO 4212 NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....         | 52 |
| TABELA 11 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO 4004 NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....         | 53 |
| TABELA 12 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO PONTE ALGALÉ NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS..... | 54 |
| TABELA 13 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO 4214 NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO COM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....         | 55 |
| TABELA 14 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO PULO DO LOBO NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO. ESTAÇÃO COM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS..... | 56 |
| TABELA 15 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO ENTRADAS NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS, EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS.....     | 59 |
| TABELA 16 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO 4255 NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO COM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS, EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....         | 60 |
| TABELA 17 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO AMIEIRA NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO COM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS.....       | 61 |
| TABELA 18 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO 4212 NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS, EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....         | 62 |
| TABELA 19 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO 4004 NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS, EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....         | 63 |
| TABELA 20 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO PONTE ALGALÉ NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO SEM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS, EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS..... | 64 |
| TABELA 21 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO 4214 NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO COM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO ESPANHOL. ....          | 65 |
| TABELA 22 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NA ESTAÇÃO PULO DO LOBO NO PERÍODO DE VALIDAÇÃO. ESTAÇÃO COM INFLUÊNCIA DE ALBUFEIRAS EM TERRITÓRIO PORTUGUÊS.....  | 66 |
| TABELA 23 – ( $K_c$ ) DE DIFERENTES PLANTAÇÕES EM DIFERENTES FASES DE CRESCIMENTO E O TEMPO DE CRESCIMENTO EM DIAS (FONTE: (FAO, 1998) ).....           | 73 |
| TABELA 24 – MÉDIA DA PRECIPITAÇÃO MENSAL DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA (1967-2003) E DO SAFRAN (1979-2003) PARA TORRUBIA DEL CAMPO. ....                     | 73 |
| TABELA 25 – MÉDIA DA PRECIPITAÇÃO MENSAL DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA (1961-2003) E DO SAFRAN (1979-2003) PARA NAHARROS. ....                               | 74 |

# 1 Introdução

O planeamento e gestão dos recursos hídricos podem ser usados na regulação e proteção dos recursos hídricos, desde que em conformidade com a legislação, nomeadamente a Lei da Água e legislação complementar. O planeamento cuidadoso e ponderado na distribuição dos recursos hídricos para os vários usos de água, permite uma utilização eficiente e sustentável desses recursos tendo em consideração a sua importância económica e ecológica, ao conciliar as necessidades de água da sociedade com as necessidades ecológicas dos rios. A Diretiva-Quadro da Água (2000/60/CE) adverte para a necessidade de reavaliar os planos de gestão das bacias hidrográficas de modo a dar prioridade aos requisitos ambientais face às necessidades socioeconómicas. A gestão dos recursos hídricos deve considerar a proteção e requalificação do estado dos ecossistemas aquáticos e dos ecossistemas terrestres, bem como desenvolver práticas que aumentem a resiliência dos recursos hídricos explorados face aos fenómenos meteorológicos extremos, tais como inundações e secas. Para a reavaliação dos planos existentes na península Ibérica está a ser desenvolvida uma plataforma que pretende integrar diversos indicadores e ferramentas de apoio aos planos de gestão das bacias hidrográficas do sudoeste europeu, o projeto europeu AQUAMOD (AQUAMOD, 2018). Esta dissertação insere-se no contexto do projeto AGUAMOD e pretende simular a dinâmica da água na bacia hidrográfica do Guadiana, localizada na península Ibérica com o modelo numérico MOHID-Land.

## 1.1 Objetivos

Neste trabalho pretende-se desenvolver um modelo hidrológico para a bacia do Guadiana que permita simular a dinâmica da água na bacia. A calibração do modelo foi realizada para o período de 1985 a 1995, utilizando os registos dos caudais efluentes em albufeiras de capacidade superior a 10 hm<sup>3</sup> e os caudais médios diários registados em diversas estações hidrométricas. A posterior validação do modelo foi realizada para o período 1995- 2014.

## 1.2 Estrutura do Documento

No primeiro capítulo encontram-se delineados os objetivos deste, a estrutura do documento e descreve-se o enquadramento geral do tema escolhido, que inclui o porquê de ser necessário realizar um planeamento cuidadoso de bacias hidrográficas, bem como características de modelos matemáticos e alguns modelos existentes para simular diferentes problemas.

O segundo capítulo tem como propósito caracterizar a área de estudo, indicando a sua respetiva localização, bem como o clima, os solos, o coberto vegetal e a morfologia da região. Também indica quais são as entidades gestoras da bacia do Guadiana.

No terceiro capítulo, descreve-se o modelo matemático MOHID e explicam-se os principais módulos que o compõem, bem como as equações matemáticas utilizadas para modelar os diversos processos físicos que ocorrem na bacia. Neste capítulo também se descrevem os diversos passos realizados para implementar o modelo e quais os coeficientes estatísticos utilizados na calibração e validação.

O quarto capítulo, trata de resultados. Aqui apresentam-se a calibração e a validação do modelo. A calibração do modelo é realizada entre o período de 1985 a 1995, enquanto que o período de validação do modelo ocorre entre 1995 e 2014. Neste capítulo também se analisa a influência de alguns parâmetros nos resultados da simulação.

O quinto capítulo reserva-se à discussão dos resultados, com análise global da calibração e da validação, bem como das diferentes limitações do modelo para quantificar os processos simulados à escala da bacia.

Por fim, no sétimo capítulo apresentam-se as conclusões deste trabalho, bem como sugestões para o melhoramento do modelo em trabalhos de futuro.

### 1.3 Enquadramento geral

Para realizar uma gestão eficiente dos recursos hídricos, é necessário compreender o ciclo da água, ou ciclo hidrológico. O ciclo da água pode ser definido como o movimento da água num sistema fechado, neste caso o planeta Terra. O movimento no ciclo da água é influenciado por trocas de energia, o que permite a existência de água nos estados sólido, líquido e gasoso (USGS, 2016). A absorção de energia proveniente da radiação solar provoca a transição da água do estado líquido para o estado gasoso (evaporação) e do estado sólido para o estado gasoso (sublimação) quando se está na presença de gelo e/ou neve. A água em estado de vapor é transportada na atmosfera por correntes de ar, condensando quando a temperatura diminui, levando à formação de nuvens. A água existente na atmosfera movimenta-se ao longo do globo até que eventualmente precipita e chega à superfície num de dois estados, sólido ou líquido, dependendo da temperatura. A neve e gelo acumulados nas calotas polares e glaciares podem manter-se armazenados por milhares de anos. Nos locais com climas menos extremos, ocorre o degelo. A água na superfície terrestre escoar ou infiltra-se no solo por ação da gravidade, podendo acumular-se em lagos (naturais ou artificiais) ou em aquíferos durante um período de tempo considerável. Uma parte da água infiltrada no solo é captada pelas plantas que a retêm sendo posteriormente transpirada para a atmosfera, outra parte é evaporada das camadas superiores do solo para atmosfera, fenómenos em conjunto denominados de evapotranspiração. A água que não sofre evapotranspiração chega ao aquífero e movimenta-se lentamente no subsolo, vindo a ser libertada na superfície terrestre em nascentes, ou escoada até ao oceano. A água escoada à superfície que não sofre infiltração nem evaporação escoar para os rios, tendo como destino final o oceano. (USGS, 2016).

O desenvolvimento das primeiras sociedades humanas sedentárias ocorreu junto a locais com fácil acesso a água, que era utilizada na agricultura e para consumo humano e pecuário. O florescimento de algumas dessas sociedades implicou o desenvolvimento de técnicas e engenhos que permitissem o armazenamento de água para ser utilizada em períodos de escassez. Na região da atual Jordânia, encontra-se uma das primeiras construções humanas para armazenamento de água, datada de 3000 a.C., uma barragem gravítica contruída com uma parede de pedra de 9 metros de altura e 1 metro de espessura, ao longo de 50 metros (Jackson, 2017). Desde então a construção de infraestruturas para armazenamento de água tem evoluído, existindo atualmente barragens de grandes dimensões e

elevada capacidade de armazenamento. A construção de barragens apresenta vantagens e desvantagens para populações e ecossistemas que se situem na sua vizinhança. Entre as vantagens destaca-se o armazenamento de água que permite o acesso e consumo constante ao longo do ano para as diversas atividades humanas e naturais, diminuindo a dependência em relação ao comportamento do clima da região. Algumas barragens são usadas na produção de energia elétrica, considerada uma fonte de energia renovável e limpa, que não contribui diretamente para o efeito de estufa. Em situações de fenómenos de precipitação extrema, a capacidade de armazenamento de barragens permite evitar cheias, ou pelo menos, diminuir o seu efeito e intensidade a jusante. Entre as desvantagens das barragens encontram-se a modificação e destruição de *habitats* nos locais inundáveis, as alterações nos ciclos naturais de transporte de sedimentos e os riscos de eutrofização tanto na água armazenada, como no rio a jusante (McCully, 2001).

Apesar da quantidade de água existente no planeta ser bastante elevada (aproximadamente 1 386 000 000 km<sup>3</sup>) (Gleick, 1993), desta apenas uma ínfima parte é água doce (aproximadamente 35 100 500 km<sup>3</sup>) (Gleick, 1993). Grande parte da água doce existente encontra-se em locais de difícil extração para consumo, tais como as calotas polares e aquíferos (34 594 000 km<sup>3</sup>) (Gleick, 1993). Os recursos hídricos com maior facilidade de exploração, rios e lagos (2 120 km<sup>3</sup> e 91 000 km<sup>3</sup> respetivamente) (Gleick, 1993) necessitam de ser geridos de forma cuidada. Estima-se que até 2050 as necessidades de água para a sociedade aumentem na ordem dos 55%, relativamente ao presente, devido aos aumentos da produção energética, do consumo doméstico e do consumo industrial (UNWATER, 2015). Se os padrões atuais de consumo de água não forem alterados, prevê-se que até 2030 exista um *deficit* de 40% de água potável a nível global (WRG, 2009).

No planeta Terra, as mudanças climáticas ocorrem naturalmente desde a sua formação, mas desde a revolução industrial as atividades antropogénicas têm introduzido alterações a este processo, verificando-se e prevendo-se um aumento de fenómenos climáticos extremos (Ripple, et al., 2017). Com o aumento médio da temperatura global prevê-se que ocorra uma aceleração no ciclo da água (Oki & Kanae, 2006), levando à modificação da frequência e intensidade da precipitação (TRENBERTH, DAI, RASMUSSEN, & PARSONS, 2003). As alterações na temperatura média e na precipitação têm um elevado impacto no resto do ciclo terrestre da água, nomeadamente no escoamento superficial, na evapotranspiração, na água subterrânea e na humidade do solo (Milly, Dunne, & Vecchia), sendo que as regiões climáticas áridas, semiáridas e sub-húmidas secas apresentam uma elevada vulnerabilidade a alterações que aumentem o risco de desertificação (Tombolini, et al., 2016).

Uma ferramenta indispensável para o processo de decisão nos planos de gestão das bacias hidrográficas é a análise dos resultados obtidos através de modelos hidrológicos. Um modelo hidrológico é definido como uma representação simplificada do mundo real, sendo utilizado para compreender e prever o comportamento dos vários processos hidrológicos através dos vários parâmetros que o definem (Gayathri, Ganasri, & Dwarakish, 2015). Existem muitos modelos hidrológicos disponíveis, cada um com características específicas que permitem resolver diferentes tipos de problemas com diferentes complexidades. Alguns modelos hidrológicos permitem apenas prever a ocorrência de fenómenos extremos, tais como cheias e secas e os efeitos causados por esses

fenómenos na região analisada, sendo possível prever que alterações possam ser necessárias implementar para diminuir os impactos desses fenómenos, bem como o sucesso dessas alterações (Pechlivanidis, Jackson, McIntyre, & Wheeler, 2011). Um constrangimento à utilização de alguns modelos é a necessidade de extrapolação de dados pontuais como representativos de uma região (Pechlivanidis, Jackson, McIntyre, & Wheeler, 2011).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados de diversas formas, dependendo dos resultados obtidos pelo modelo e/ou pela forma como são estimados os parâmetros. Nos modelos determinísticos com um determinado conjunto de dados e parametrizações, o resultado obtido é sempre igual. Comparativamente, os modelos estocásticos podem apresentar uma variedade de resultados na forma de uma distribuição probabilística. (Gayathri, Ganasri, & Dwarakish, 2015). Os modelos que consideram a passagem do tempo na simulação são classificados como modelos dinâmicos, e em contrapartida os modelos estáticos excluem o efeito do tempo nas simulações. Os modelos também podem ser diferenciados pela sua capacidade de produzir resultados contínuos ou resultados em intervalos de tempo específicos (Gayathri, Ganasri, & Dwarakish, 2015). Independentemente das características dos modelos previamente descritas, estes podem ser classificados conforme a sua complexidade, nomeadamente, em empíricos, paramétricos e físicos.

Os modelos empíricos são modelos baseados nas observações, que analisam apenas os dados existentes sem considerar as características e os processos hidrológicos do sistema. Utilizam equações matemáticas derivadas de séries temporais de entrada e saída no modelo, sendo os resultados válidos apenas dentro dos limites do sistema (Gayathri, Ganasri, & Dwarakish, 2015). Um modelo de *Rainfall-Runoff* utilizando o método *Artificial Neural Network* (ANN) é um exemplo de modelo empírico. Este método é inspirado no funcionamento do cérebro e sistema nervoso, através do elevado número de interconexões e processamento paralelo. É desenvolvido com camadas múltiplas de processamento, onde todas as camadas apresentam vários nós. Na camada inicial, cada nó representa uma variável de entrada; no exemplo em causa, esta será dada pela variável precipitação. Na camada intermédia cada nó encontra-se interligado a todos os nós da camada inicial e a cada um dos nós existente na camada de saída. Todas as ligações existentes entre os nós na camada inicial e os nós da camada intermédia apresentam um peso de ligação específico, que através de uma função específica permite calcular o valor de cada nó da camada intermédia. O mesmo processo, mas utilizando uma diferente função com diferentes pesos específicos de ligação, permite obter os valores de saída. (Riad, Mania, Bouchaou, & Najjar, 2003). Mais uma vez, no exemplo em causa, a variável em causa será o escoamento produzido pelos eventos de precipitação.

Os modelos paramétricos ou conceptuais consistem na existência de um número de armazenamentos conceptuais interligados que representam fenómenos físicos na bacia que são preenchidos por água através da precipitação, infiltração e percolação, e vazados por evaporação, escoamento superficial, drenagem, entre outros. Descrevem todos os processos hidrológicos através do uso de equações semi-empíricas com base física. Os parâmetros do modelo são determinados e avaliados em função dos dados medidos e pela calibração, sendo necessário um grande número de registos meteorológicos e hidrológicos para calibrar este tipo de modelos (Gayathri, Ganasri, & Dwarakish, 2015). O modelo



*Hydrologiska Byrans Vattenavdelning* (HBV) (Gayathri, Ganasri, & Dwarakish, 2015) é um modelo conceptual semi-distribuído desenvolvido para calcular caudais nos rios. A bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias, com cada uma das sub-bacias dividida em função da altitude e vegetação. Utiliza os registos diários e mensais de precipitação, temperatura do ar e evaporação. Este método relaciona a precipitação ( $P_{hvb}$ ), a evaporação ( $E_{hvb}$ ), o escoamento superficial ( $Q_{hvb}$ ), a neve ( $SP$ ), a humidade no solo ( $SM$ ), volume de água nos lagos ( $LK$ ), os limites superior ( $UZ$ ) e inferior ( $LZ$ ) da água subterrânea através da seguinte equação:

$$P_{hvb} - E_{hvb} - Q_{hvb} = \frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + LK) \quad (1)$$

Existem diferentes versões deste modelo para serem aplicadas em diferentes condições climáticas. (Gayathri, Ganasri, & Dwarakish, 2015)

Os modelos físicos descrevem os fenómenos reais através de equações matemáticas. A caracterização da bacia é modelada por uma malha de células, que no seu conjunto, tem a si associada uma grande quantidade de dados, como a humidade no solo, o nível freático, as dimensões da rede de drenagem, a morfologia, entre outros. As variáveis de estado utilizadas no modelo são mensuráveis e dependem tanto do tempo como do espaço. O movimento da água nos processos hidrológicos é representado por equações de diferenças finitas. Para calibrar um modelo físico não é necessário fornecer grandes quantidades de dados hidrológicos e meteorológicos, mas é necessário validar um largo número de parâmetros que descrevem as características físicas da bacia. O uso de parâmetros com interpretações físicas permite a este tipo de modelos ser aplicado num maior número de situações assim como torna possível correr a simulação fora dos limites do domínio do modelo (Gayathri, Ganasri, & Dwarakish, 2015). O SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Neitsch, 2011) é um modelo físico desenvolvido para testar e prever a dinâmica da água, dos sedimentos e dos nutrientes em bacias hidrográficas. O modelo divide a bacia em sub-bacias, que são por sua vez divididas em unidades de resposta hidrológica, com o uso do solo, vegetação e características do solo comuns. Este modelo utiliza dados diários de precipitação, temperatura mínima e máxima, radiação solar, humidade relativa no ar e a velocidade do vento como dados de entrada. O ciclo hidrológico é simulado através da circulação de água na área da bacia através da seguinte equação de balanço de água:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (Rv - Qs - W_{see} - ET - Qgw) \quad (2)$$

O parâmetro ( $t$ ) representa o número de dias da simulação, ( $SW_t$ ) corresponde à quantidade de água no solo, ( $SW_0$ ) é a humidade inicial no solo, ( $Rv$ ) é a quantidade de precipitação, ( $Qs$ ) é o escoamento superficial, ( $ET$ ) é a evapotranspiração, ( $W_{see}$ ) é a quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo e ( $Qgw$ ) é o escoamento de água subterrânea.

O modelo utilizado na realização deste trabalho, o modelo MOHID-Land, é um modelo físico espacialmente distribuído desenvolvido para modelar bacias hidrográficas e aquíferos. Este modelo simula o superficial da água através da equação de Saint Venant, uma equação em 2D. Nas zonas

saturada e não saturada do solo é resolvido o movimento de água através da equação de Richards (MARETEC, 2018). O escoamento na rede de drenagem ocorre em 1D e pode ser calculado através da resolução de uma de três equações, equação da onda cinemática, equação da onda difusa ou equação de onda dinâmica. O modelo calcula a evapotranspiração através do método de Penman-Monteith (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998) e considera o crescimento de plantas. Os diversos escoamentos são interdependentes, não sendo necessária a formulação de hipóteses para as zonas de fronteira entre os diferentes processos, com as iterações calculadas dinamicamente através de gradientes hidráulicos. Apesar de ser considerado um modelo físico, não é possível aplicar totalmente equações matemáticas que expliquem todos os fenômenos considerados no modelo, pelo que existe uma pequena percentagem de equações empíricas aplicadas no modelo, sendo um exemplo a equação utilizada no cálculo para a infiltração de água no solo através do número de escoamento (CN).

## 2 Descrição da área de estudo

Neste capítulo é feita uma descrição da área de estudo, a bacia hidrográfica do Guadiana, nomeadamente a sua localização, os seus limites administrativos, a densidade populacional e a caracterização do clima, solos e restante morfologia.

### 2.1 Localização

A bacia hidrográfica do Guadiana situa-se na península Ibérica, Figura 1, sendo, portanto, considerada uma bacia hidrográfica internacional. Apresenta uma área total de 67 133 km<sup>2</sup>, dos quais 55 513 km<sup>2</sup> pertencem ao território Espanhol e os restantes 11 620 km<sup>2</sup> ao território Português (CADC, 2014). O seu principal rio, o rio Guadiana, tem a sua nascente localizada nas Lagoas de Ruidera em Espanha a uma altitude de 868 metros. Percorre uma distância de aproximadamente 860 km até à foz, que se situa entre as cidades de Vila Real de Santo António (Portugal) e a cidade de Ayamonte (Espanha), desaguando no Oceano Atlântico.



*Figura 1- Delimitação da bacia do Guadiana*

### 2.2 Delimitações administrativas

De acordo com os limites administrativos NUTS III implementados em 2015 para todos os estados membros da União Europeia, as regiões que englobam a bacia hidrográfica do Guadiana em território português são o Algarve, Alto Alentejo, Baixo Alentejo e Alentejo Central. No território espanhol as regiões contempladas são Albacete, Badajoz, Cáceres, Ciudad Real, Córdoba, Cuenca, Huelva e Toledo (Eurostat, 2016), como se pode observar na Figura 2.

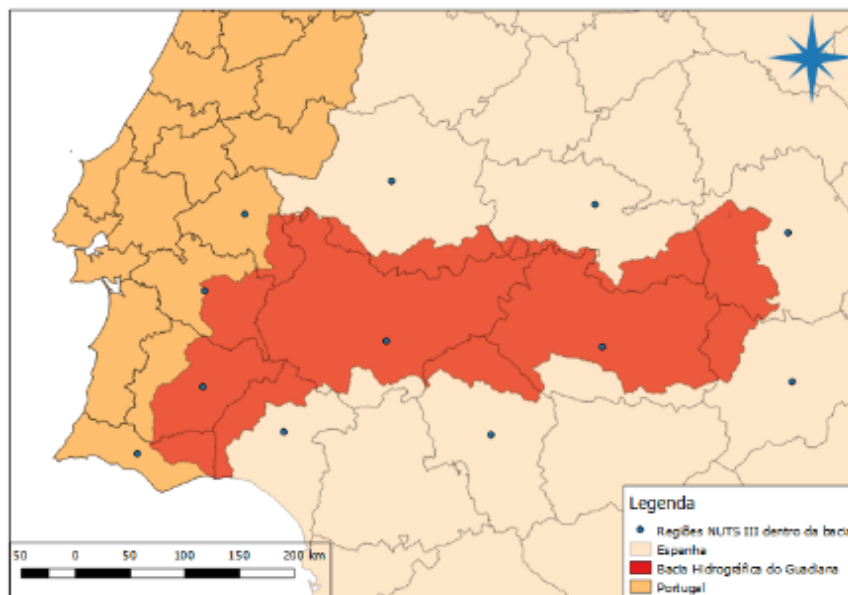


Figura 2 – Bacia Hidrográfica do Guadiana e as delimitações regionais NUTS 3 (fonte: Eurostat)

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) é a autoridade responsável pela gestão dos recursos hídricos portugueses, tendo dividido a gestão da bacia hidrográfica do território português por regiões, estando a bacia do Guadiana incluída na região hidrográfica 7 (APA, 2018). Em território espanhol, as bacias hidrográficas encontram-se divididas por entidades responsáveis pela gestão dos recursos, sendo a bacia hidrográfica do Guadiana gerida pela Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHG) (CHG, 2018). A Diretiva 2000/60/CE no ponto 2 do Artigo 13º estabelece que é necessário assegurar uma coordenação dos planos de gestão de região hidrográfica nas regiões hidrográficas internacionais, tendo sido criada a Comissão para a Aplicação e Desenvolvimento da Convenção de Albufeira (CADC) (APA, 2018).

## 2.3 População

A população total residente no interior da bacia ascende aos 1.9 milhões de habitantes, dos quais 230 mil residem em Portugal. A densidade populacional média dentro dos limites da bacia é de 28 hab/km<sup>2</sup> (CADC, 2014), valor bastante inferior a média de Espanha (93 hab/km<sup>2</sup>) e de Portugal (114 hab/km<sup>2</sup>) (Eurostat, 2016).

## 2.4 Morfologia

A bacia do Guadiana têm uma estrutura geométrica estreita e comprida, com a direção principal Este-Oeste em território espanhol e a direção Nordeste-Sudoeste em território português (Figura 3). Em termos de delimitação por enquadramento com outras bacias verifica-se que na fronteira Norte da bacia do Guadiana encontra-se a bacia do Tejo, a Oeste a fronteira é delimitada pelas bacias do Sado, de Mira e de Arade, a Sul é feita fronteira com a bacia do Guadalquivir e a bacia Tinto-Odiel Piedra e na extremidade Este da bacia encontra-se a bacia do Jucar.

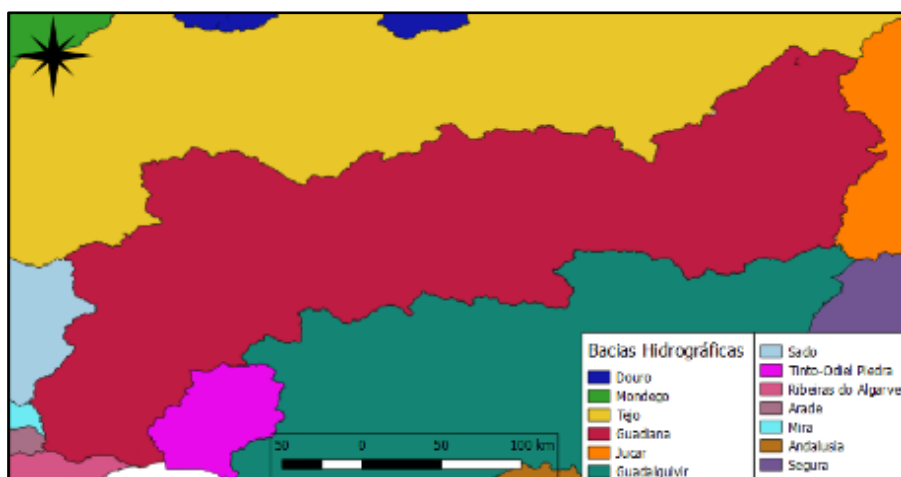


Figura 3 – Delimitações das Bacias Hidrográficas na envolvente do Guadiana (fonte: APA)

Sob o ponto de vista morfológico, a bacia pode ser dividida em 3 zonas: Alto, Médio e Baixo Guadiana, (Figura 4). O alto Guadiana é constituído por um planalto rodeado por uma zona montanhosa. O planalto é formado por depósitos calcários, de elevada permeabilidade, constituindo importantes aquíferos que interagem significativamente com o escoamento superficial (APA, 2016). A zona do médio Guadiana encontra-se na zona da Meseta Ibérica sobre o soco hercínico. Esta é constituída por formações metamórficas muito antigas (xistos, gneisses, migmatitos) e é geralmente impermeável. O baixo guadiana apresenta solos essencialmente derivados de xisto, geralmente pesados, e que apresentam problemas de drenagem. (APA, 2016).

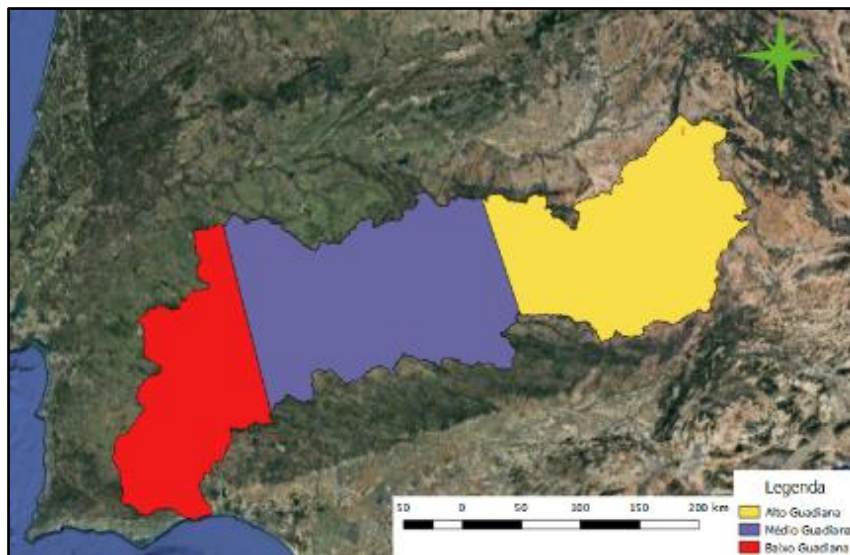


Figura 4 – Zonas morfológicas do Guadiana.

### 2.4.1 Tipo de solo

Na Bacia hidrográfica do Guadiana podem ser encontrados diferentes tipos de solo, representados na Figura 5 (ESDAC, 2001).

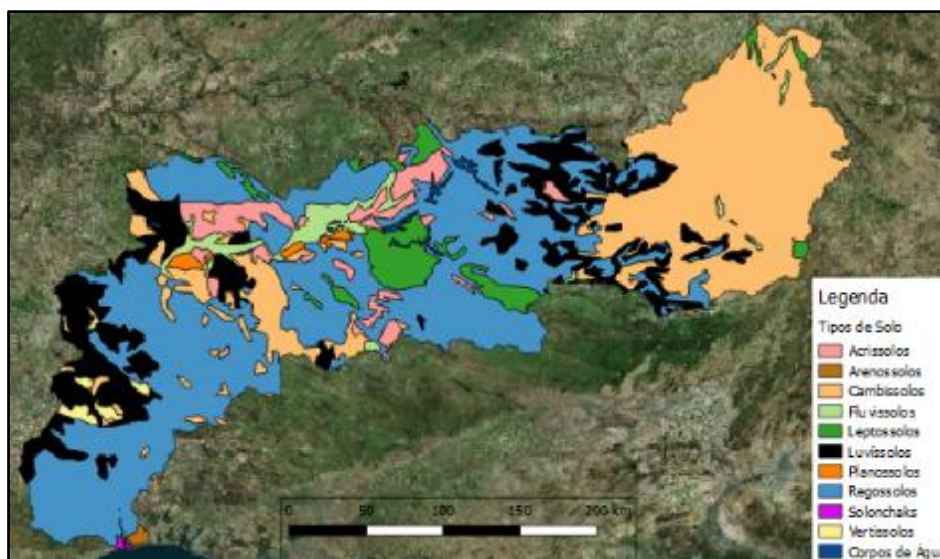


Figura 5 - Tipos de solo na bacia hidrográfica do Guadiana (fonte (ESDAC, 2001)).

O tipo de solo mais comum na bacia do Guadiana é o regossolo. Este é caracterizado por ser um solo mineral pouco desenvolvido em material pouco consolidado e com pouca quantidade de matéria orgânica. Encontra-se principalmente em zonas áridas e semi-áridas, bem como em terreno montanhoso (FAO, 2015).

O tipo de solo com a segunda maior representatividade, cambissolo, encontram-se maioritariamente na zona montante da bacia. São solos pouco a moderadamente desenvolvidos, com pelo menos o início de um horizonte com diferenciação do subsolo, com evidentes mudanças de cor, quantidade de argila ou carbonatos em relação à rocha-mãe, sendo possível encontrar este tipo de solo desde zonas planas até terrenos montanhosos, podendo encontrar-se uma grande variedade de vegetação sobre este tipo de solo. (FAO, 2015).

Luvissolos, são solos com uma quantidade de argila superior nos horizontes inferiores comparativamente com os horizontes superficiais e com uma zona bastante saturada, usualmente entre os 50 e os 100 cm de profundidade. É comum ser encontrado em zonas planas ou com baixos declives em regiões de clima temperado ou em climas quentes com estações secas e húmidas distintas (FAO, 2015).

Os leptosolos são solos pouco espessos que podem em alguns locais ter menos de 10 cm de espessura, sendo possível em alguns casos encontrar fragmentos da rocha-mãe. Encontram-se em todas as zonas climáticas, em particular em locais de elevada erosão ou locais com a rocha-mãe muito resistente a transformações. Este solo não permite o desenvolvimento de espécies vegetais com elevado crescimento de raízes. (FAO, 2015).

Os acrissolos, representados a rosa, apresentam tal como os luvissolos, uma quantidade de argila superior nos horizontes inferiores relativamente aos superficiais, mas com a zona entre os 50 e os 100 cm pouco saturada. São solos geralmente com pH ácido, e encontram-se principalmente em zonas com colinas ou topografia ondulante. O tipo de vegetação característico do acrissolo é a floresta (FAO, 2015).

Os fluvisolos, a verde claro, são solos normalmente associados a depósitos de sedimentos de rio, de lago, ou marinhos. Encontram-se normalmente junto a rios, vales, e depressões de lagos em todas as zonas climáticas. Os seus horizontes são estratificados, mas com baixa diferenciação, podendo em alguns casos apresentar um horizonte de topo bem distinto. (FAO, 2015)

O tipo de solo designado por planossolo, encontra-se na Figura 5 a laranja. São solos em que à superfície apresentam uma textura grosseira, seguido de um horizonte com uma textura fina pouco permeável. Derivam de depósitos aluviais. Encontram-se em zonas que periodicamente sofrem inundações e encontra-se associada a este tipo de solo uma vegetação dispersa (FAO, 2015).

Os vertissolos existentes na bacia encontram-se praticamente apenas na zona portuguesa da bacia do Guadiana, na região de Beja. São solos argilosos onde ocorrem fendas verticais quando se encontram secos. Encontram-se normalmente em depressões e em zonas ondulatórias principalmente em climas tropicais e subtropicais, mas também em zonas que vão de semi-áridas a sub-húmidas, desde que ocorra uma alteração distinta entre a estação seca e a estação húmida. São solos com elevado potencial para a agricultura, por apresentarem boas condições químicas para o crescimento de plantas. (FAO, 2015)

Os arenossolos, como o nome indica, são solos profundos formados maioritariamente por areia e muito pouco desenvolvidos. São solos muito permeáveis e com baixa capacidade de armazenamento de água e minerais. Na bacia encontram-se junto à foz do Guadiana. São ricos em sedimentos de quartzo. Encontram-se desde zonas áridas a zonas húmidas, bem como desde climas extremamente frios a climas extremamente quentes. Em termos de vegetação, esta pode encontrar-se dispersa e com características de deserto até floresta pouco densa (FAO, 2015).

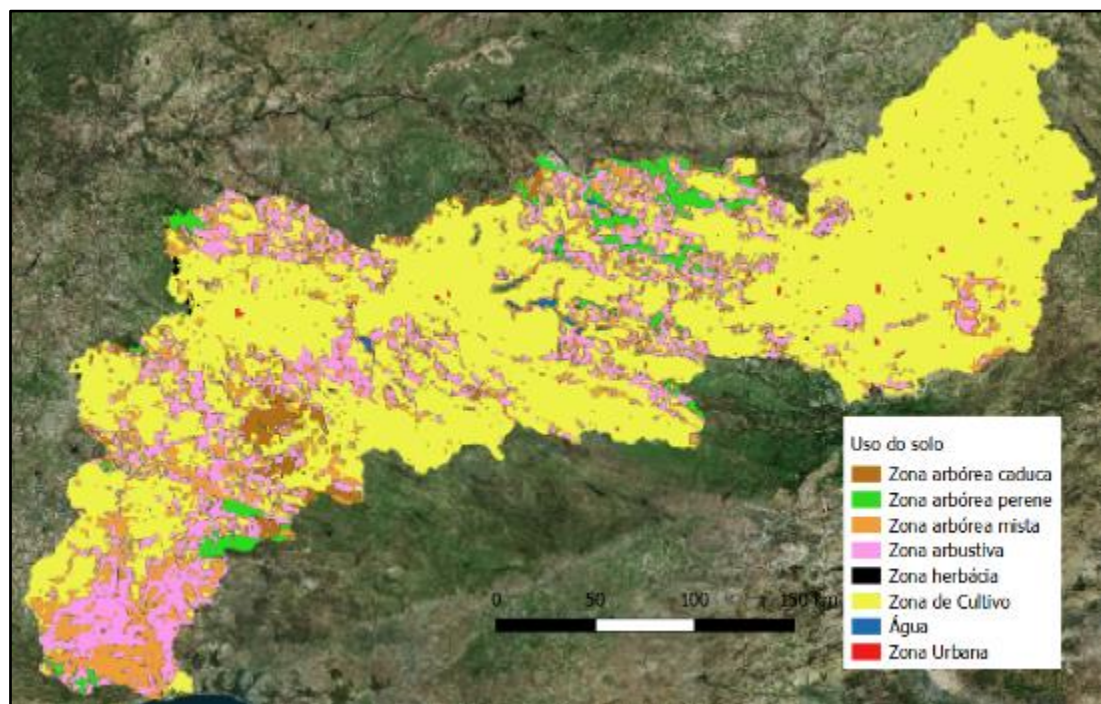
Os solonchaks estão representados na figura com a coloração violeta. Estes solos encontram-se principalmente em zonas de clima árido e semiárido onde a água subterrânea alcança as camadas superiores do solo ou em zonas costeiras. Estes solos apresentam normalmente uma concentração elevada de sais solúveis em determinados períodos do ano. Os solos que se apresentam cobertos de água têm uma concentração de sais superior nas camadas superficiais do solo e os solos onde a água subterrânea não alcança as camadas superiores do solo têm a maior concentração de sais nas camadas não superficiais (FAO, 2015).

A azul escuro estão representados os corpos de água. São locais que se encontram permanentemente cobertos de água, não apresentando nenhum solo associado. São considerados corpos de água quando a profundidade da coluna de água é superior a 2 metros.



## 2.4.2 Uso do solo

Na Figura 6, encontram-se os usos de solo existentes na bacia hidrográfica do Guadiana segundo a carta Corine Land Cover 2000 (JOINT RESEARCH CENTRE, 2018).



*Figura 6 – Uso de solos na bacia hidrográfica do Guadiana a partir da carta GLC 2000*

Os usos de solo com maior representatividade na bacia hidrográfica do Guadiana são a zona de cultivo, a amarelo e encontra-se predominantemente em território espanhol. Este uso de solo corresponde a áreas onde a vegetação natural foi removida ou modificada e substituída por diversos cobertos vegetais de origem antropogénica. Este tipo de coberto vegetal necessita de atividades humanas para sobreviver por longos períodos de tempo (FAO, 2000).

A castanho, a verde e a cor de laranja estão representadas as zonas arbóreas. Esta classificação corresponde a plantas com caule lenhoso bem definido (tronco) com uma copa afastada do solo bem definida e com uma altura superior a 3 metros (FAO, 2000). Dividiram-se as zonas arbóreas de acordo com as características da copa. A castanho encontram-se as árvores com folhas caducas, que no outono e até ao início da primavera (hemisfério norte) perdem as folhas existentes nas copas diminuindo a sua atividade metabólica. A verde estão representadas as árvores que mantêm as folhas nas copas o ano inteiro. Com a coloração laranja, encontram-se as zonas que apresentam uma misturas de árvores com ambos os tipos de folha.

A zona arbustiva, representada a cor de rosa na figura, é composta por plantas que têm um caule lenhoso e com dimensões inferiores a 3 metros. Muitas destas espécies não apresentam uma haste principal definida e o seu crescimento pode não ser vertical como acontece com as plantas arbóreas (FAO, 2000).



A zona herbácea é constituída por plantas com caule não lenhoso ou semi-lenhoso. Em muitos casos brotam do chão sem uma estrutura firme bem definida e geralmente no apogeu do seu crescimento não ultrapassam os 2 metros de altura (FAO, 2000) e a azul encontram-se os locais cobertos permanentemente por água ao longo do ano.

A zona urbana corresponde a locais que sofreram modificações antropogénicas para exercerem um propósito específico à atividade humana. Esta categoria é constituída por objetos com diferentes dimensões, tais como edifícios habitacionais, complexos industriais, estradas, jazigos minerais, aterros sanitários, entre outros. Estes locais normalmente têm a superfície pouco permeável, com forte influência no escoamento superficial em períodos de cheia.

## 2.5 Clima

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, na área de estudo foram identificados dois tipos de climas, o clima temperado de verão seco (Csa) e o clima seco de estepe fria (BSk), (Figura 7). O clima com maior representatividade na bacia do Guadiana é o Csa, equação 3, que é caracterizado por apresentar no mês mais quente uma temperatura média superior a 22°C ( $TM$ ), estando a temperatura do mês mais frio compreendida entre os 0°C e os 18°C ( $tM$ ) e com precipitação no mês de verão mais seco inferior ( $PM$ ) a 40 mm e inferior a 1/3 da precipitação do mês de inverno com maior pluviosidade ( $pM$ ) (Peel, Finlayson, & McMahon, 2007).

$$Csa \left\{ \begin{array}{l} TM > 22^{\circ}C \\ 0^{\circ}C < tM < 18^{\circ}C \\ PM < 40 \text{ mm} \wedge < \frac{1}{3}pM \end{array} \right. \quad (3)$$

O clima BSk é definido através da fórmula (4), onde ( $\bar{T}$ ) corresponde à temperatura média anual e ( $\bar{P}$ ) corresponde à precipitação média anual em locais em que ocorre precipitação distribuída ao longo do ano (Peel, Finlayson, & McMahon, 2007).

$$(10 \times \bar{T} + 70) \leq \bar{P} \leq 2 \times (10 \times \bar{T} + 70) \quad (4)$$

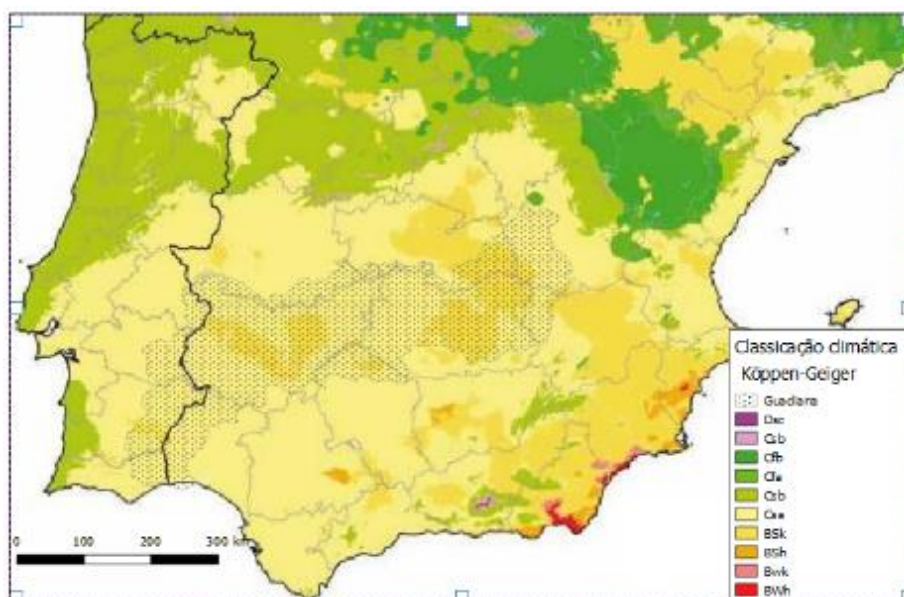


Figura 7 – Classificação climática de Köppen-Geiger na Península Ibérica e Ilhas Baleares. (fonte: IPMA/AEMET no período entre 1971 e 2000 - modificado)

Foram selecionadas 2 localizações representativas de cada um dos 2 tipos de clima, Évora (IPMA, 2015) com clima Csa e Ciudad Real (AEMET, 2018) com clima BSk que se encontram em zonas distintas da bacia para a análise da temperatura, precipitação e humidade.

### 2.5.1 Temperatura

A temperatura média anual na bacia hidrográfica do Guadiana é de 16°C. No mês de janeiro, o mês mais frio, a temperatura média do ar na bacia ronda os 9°C e nos meses mais quentes, julho e agosto, a temperatura média do ar na bacia ronda os 26°C (CADC, 2014). Na Figura 8 encontram-se os valores médios e extremos mensais de temperatura do ar na zona de Évora e na zona de Ciudad Real.

Na análise da Figura 8 verifica-se que ao longo de um ano hidrológico o comportamento da temperatura do ar é o mesmo em ambos os locais, com a diminuição das temperaturas no outono e a atingirem valores mínimos em janeiro. A temperatura do ar começa a subir gradualmente até ao mês de julho, mantendo-se estável no mês de agosto e recomeçando a diminuir no mês de setembro. De notar que na zona de Ciudad Real os invernos são mais rigorosos, com as temperaturas extremas mínima e máxima de 1,1°C e de 10,9°C, comparativamente com a zona de Évora, com valores de 4,6°C e de 12,1°C respetivamente. No período de verão, Ciudad Real apresenta uma temperatura extrema mínima e máxima de 18,9°C e de 34,5 °C, que são mais elevadas que na zona de Évora, com valores de 17°C e de 31,6°C, respetivamente.

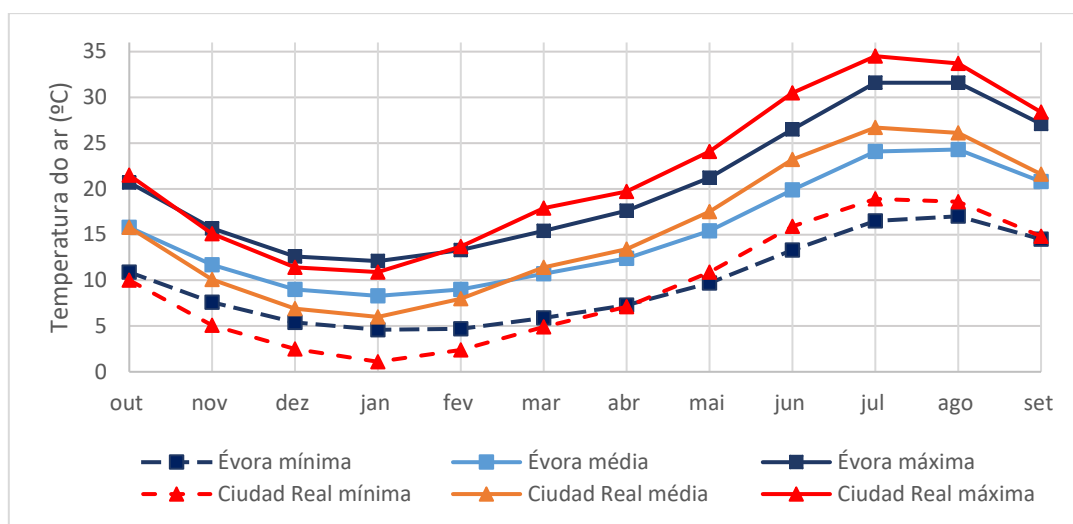


Figura 8 – Valores médios e extremos mensais de temperatura do ar (°C) registados em Évora (fonte : (IPMA, 2015) no período 1971-2000) e em Ciudad Real (fonte: (AEMET, 2018) no período 1981-2010)

## 2.5.2 Precipitação

A precipitação média anual ao longo da bacia não é distribuída homogeneamente, apresentando uma precipitação média ponderada de 550 mm. (CADC, 2014). Existe uma grande variação de precipitação média ao longo da bacia, com um mínimo de 350 mm na zona central da planície da Mancha e um máximo ligeiramente superior a 1000 mm nas cabeceiras do Ardila, do Odeleite e do Caia. Em termos globais a distribuição da precipitação anual média é bastante uniforme, estando normalmente compreendida entre 500 e 600 mm. A distribuição anual da precipitação é também extremamente irregular, descendo a valores compreendidos entre 386 mm e 422 mm em anos secos e aumentando para valores entre 722 mm e 766 mm em anos húmidos (CADC, 2018). Os dados relativos à precipitação média mensal nas zonas de Évora e Ciudad Real encontram-se na Figura 9.

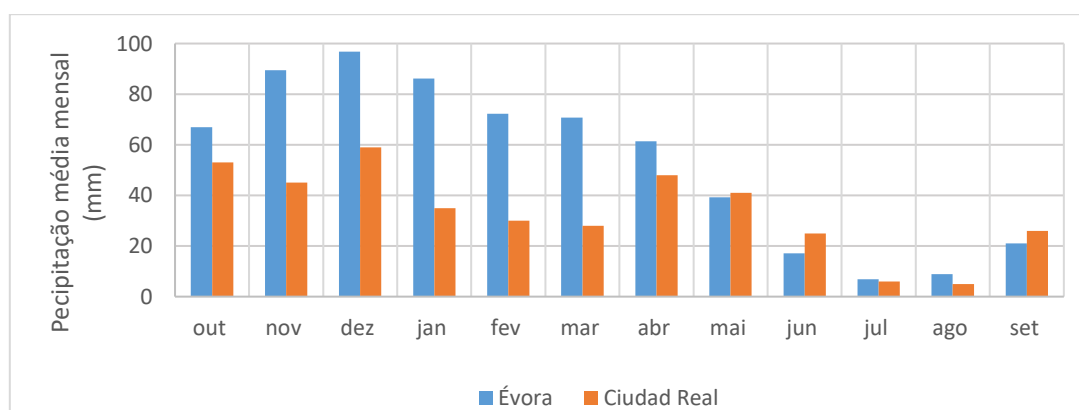


Figura 9 – Valores médios das quantidades totais mensais de precipitação (mm) registados em Évora (fonte : (IPMA, 2015) no período 1971-2000) e em Ciudad Real (fonte: (AEMET, 2018) no período 1981-2010)

Ao analisar a Figura 9 verifica-se que no período compreendido entre outubro e abril, a precipitação média mensal na zona de Évora é superior à da zona de Ciudad Real, particularmente no período de novembro a março. No intervalo de tempo compreendido entre maio e setembro as precipitações

médias são bastante semelhantes, existindo alguns meses, nomeadamente maio, junho e setembro onde a precipitação média na zona de Ciudad Real é superior à da zona de Évora.

### 2.5.3 Humidade

Na Figura 10 apresenta-se o padrão médio mensal da humidade relativa para as zonas de Évora e Ciudad Real.

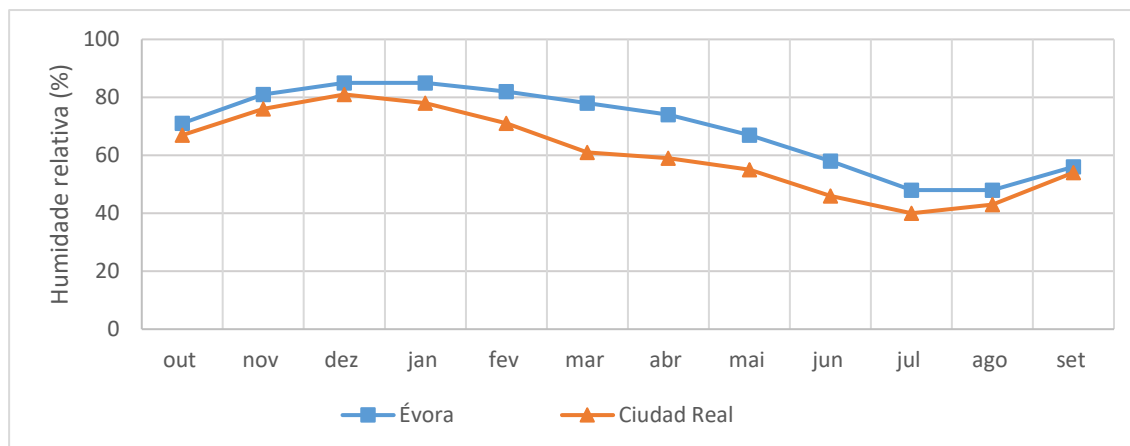


Figura 10 – Valores de humidade relativa médios (%) registados em Évora (fonte : (IPMA, 2015) no período 1971-2000) e Ciudad Real (fonte: (AEMET, 2018) no período 1981-2010)

Por observação da Figura 10 verifica-se que a humidade relativa na zona de Évora (Csa) é sempre superior à humidade relativa para Ciudad Real (BSk) ao longo dos vários períodos do ano, com maior discrepância nos meses de primavera.

### 2.5.3 Radiação solar

Como se pode observar na Figura 11, a irradiância média diária ao nível do solo na bacia hidrográfica do Guadiana varia entre os 4.68 Kwh.dia.m<sup>-2</sup> e os 5.20 Kwh.dia.m<sup>-2</sup>.

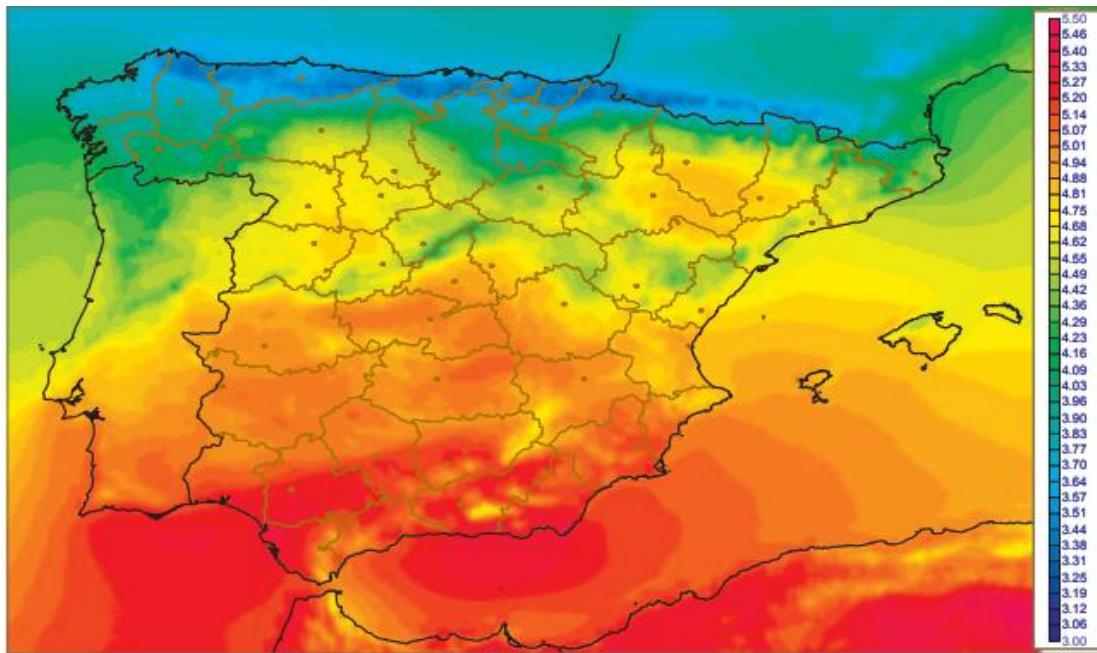


Figura 11 - Irradiância Global média (1983-2005) (fonte: (AEmet, 2012))

## 3 Metodologia

Neste capítulo é descrito o modelo matemático MOHID-Land, bem como as equações nas quais este se baseia. Abordam-se de igual forma os diferentes passos realizados na implementação do modelo para simular a área de estudo e os métodos utilizados na sua calibração e validação.

### 3.1 Modelo MOHID

O modelo matemático utilizado neste estudo, MOHID, foi desenvolvido no centro de investigação MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center), associado ao Instituto Superior Técnico (IST). Foi programado em linguagem ANSI FORTAN 95 e foi elaborado para simular os diversos processos físicos e bioquímicos que ocorrem em zonas costeiras e oceânicas, em estuários, bacias hidrográficas e aquíferos (MARETEC, 2018). O modelo MOHID foi criado em 1985 e desenvolvido num sistema bidimensional que permitiu o estudo de estuários e áreas costeiras utilizando o método matemático de diferenças finitas. Ao longo do tempo foram realizados melhoramentos, tais como simulações em 1-D e 3-D, e adicionadas novas ferramentas ao modelo com a criação do MOHID Land, MOHID Water, MOHID Soil e MOHID Rivers. A programação orientada por objetos utilizada no MOHID permite a integração de diversos processos físicos e bioquímicos, a utilização de diferentes escalas e a conjugação de diversos sistemas (por exemplo uma zona de estuário e uma bacia), permitindo a resolução de problemas mais complexos (MARETEC, 2018).

#### 3.1.1 MOHID Land

O modelo MOHID-Land é a versão do MOHID utilizada para simular o ciclo de água na bacia hidrográfica do Guadiana, contendo diferentes módulos necessários ao estudo da dinâmica da água no escoamento superficial, nas zonas não saturada e saturada do solo e na rede de drenagem utilizando o método matemático de volumes finitos. O MOHID-Land encontra-se dividido em diversos módulos, sendo que cada módulo foi desenvolvido para resolver um determinado número de equações relativas a diversos processos (físicos e/ou químicos e/ou biológicos).

O módulo *Basin* permite configurar quais os módulos que se encontram ativos na simulação, sendo apenas necessário fornecer ao modelo informações que sejam relevantes para a simulação. É definido neste módulo se o cálculo da evapotranspiração ocorre através do método de Penman-Monteith ou se a evapotranspiração é fornecida, bem como se os processos são influenciados pela existência ou não de vegetação.

O módulo *Drainage Network* tem como função controlar os parâmetros relacionados com o escoamento da água na rede de drenagem, tais como o coeficiente de Manning, a profundidade mínima da coluna de água, o declive mínimo, entre outros. Neste módulo é definido qual a aproximação hidrodinâmica a ser utilizada durante a simulação, nomeadamente, a onda cinemática, onda de difusão ou onda dinâmica. Também é definido qual o método utilizado no cálculo do escoamento na fronteira da bacia, a jusante da rede de drenagem. O cálculo pode ser definido recorrendo a diferentes métodos: onda cinemática, coluna de água com uma altura mínima, coluna de água com uma dada altitude, velocidade

de escoamento, e transporte para albufeira. Caso seja necessário simular sedimentos e partículas dissolvidas na água, é neste módulo que vão ser definidos.

O módulo *Porous Media* é responsável pelo escoamento de água que ocorre no solo, tanto em zona saturada como em zona não saturada, que é calculado através da equação de *Richards*. Também neste módulo se definem os diferentes tipos de solo que existem na área de estudo bem como as suas propriedades. Entre as várias propriedades do solo, encontra-se a condutividade hidráulica, que se assumir valores diferentes em células adjacentes, torna necessário atribuir um valor na zona de fronteira. O MOHID permite o cálculo da condutividade hidráulica na fronteira entre as células através de um de 5 métodos. O primeiro método define que a condutividade hidráulica na fronteira das células é a média das 2 condutividades. No segundo método utiliza-se a condutividade menor. No terceiro método é selecionada a condutividade superior. O quarto método utiliza a média ponderada e o quinto método utiliza a média geométrica. Considera-se que a fronteira definida entre a última camada de solo e o fundo do solo é impermeável à passagem de água. O escoamento horizontal de água nas células do solo utiliza as mesmas equações que o escoamento vertical, mas as velocidades de escoamento são diferentes, sendo utilizado um fator de multiplicação no seu cálculo ( $Kh$ ).

O módulo *Geometry* permite definir a geometria vertical de cada um dos diferentes domínios que podem existir no modelo. Cada domínio pode ser dividido em diferentes camadas, e ser definido em diferentes sistemas de coordenadas. São utilizadas as coordenadas cartesianas quando o fluxo ocorre horizontalmente em condições baroclínicas, as coordenadas *sigma* são utilizadas quando o gradiente de pressão é barotrópico e utilizam-se as coordenadas *fixspacing* quando se estuda o movimento dos fluidos junto ao fundo do domínio.

O módulo *Reservoir* controla as condições iniciais das albufeiras no início da simulação e o balanço de água dentro dos mesmos durante o período de simulação. Neste módulo define-se se existe troca de fluxos à superfície da albufeira e/ou no fundo da albufeira. O caudal de saída pode ser calculado através de uma série temporal de descarga ou através de uma curva de operação. A curva de operação pode ser definida por um de 5 métodos que estabelece uma relação entre uma propriedade da albufeira associada ao volume de água armazenado e o caudal de saída. No primeiro e segundo métodos relaciona-se a elevação (altura da coluna de água relativamente ao nível médio das águas do mar) com o caudal de saída e nos restantes métodos relaciona-se uma percentagem do volume da albufeira com o caudal de saída. No primeiro e terceiro métodos o caudal de saída é definido pelo utilizador em valores absolutos. No segundo e quarto métodos o caudal de saída é definido como uma percentagem do caudal de entrada na albufeira. No quinto método o caudal de saída utilizado é uma percentagem do caudal máximo de saída que a albufeira pode ter.

O módulo *Run off* calcula o escoamento superficial no solo a partir de um de 3 métodos possíveis. O escoamento de onda dinâmica modelado pela equação de Venant em 2D, o escoamento de onda difusa modelado pela equação de Manning com gradiente de água superficial e o escoamento de onda cinemática modelado através da equação de Manning com gradiente de fundo. Também é definida uma altura mínima para a coluna de água, bem como a aproximação utilizada para definir o atrito representado pelo coeficiente de *Manning*, se é um valor constante utilizado em toda a área de estudo

ou um ficheiro de entrada com os valores definidos para cada célula. Também é definida a altura da coluna de água no instante inicial.

O módulo *Vegetation* permite simular o coberto vegetal e a sua interação com o solo e a atmosfera. Na simulação do coberto vegetal a luz solar é interceptada pelas plantas e convertida em biomassa. O crescimento do coberto vegetal vai depender de diferentes propriedades, tais como a profundidade da raiz e o LAI (Índice de Área Foliar). O cálculo do coberto vegetal pode ser efetuado através de 2 métodos. No primeiro método, são fornecidas diversas propriedades ao longo do tempo e o módulo vai simular a absorção de água pelo coberto vegetal. O segundo método utiliza um modelo de crescimento vegetal baseado no SWAT, e o módulo durante a simulação vai determinar o LAI, a quantidade e a absorção de nutrientes.

Os dados atmosféricos utilizados na simulação são definidos no módulo *Atmosphere*. É estipulada a localização do ficheiro com os valores de precipitação, vento, radiação solar temperatura do ar, humidade relativa e coberto de nuvens no caso de estes serem fornecidos, ou pode ser atribuído um valor constante a cada uma destas propriedades atmosféricas.

Em todos os módulos pode ser definida uma série temporal, que regista todos os resultados que podem ser obtidos num período predefinido ao longo da simulação.

### 3.1.2 Equações

O modelo utiliza equações para explicar os diferentes fenómenos físicos e ou químicos existentes na área de estudo. Todas as equações utilizadas no MOHID Land respeitam o princípio da conservação de massa, onde dado um sistema com uma determinada propriedade num volume definido, a única forma de ocorrer uma variação de massa da propriedade é se existirem entradas e/ou saídas nas superfícies do volume, ou a existência de fontes e/ou sumidouros dentro desse volume, como se traduz pela equação genérica da conservação de massa (5).

$$\frac{d}{dt} \iiint (\beta) dvol = - \underbrace{\iint (\beta(\vec{v} \cdot \vec{n})) dA}_{\text{Fluxo Advectivo}} + \underbrace{\iint (\Phi(\vec{\nabla} \beta \cdot \vec{n})) dA}_{\text{Fluxo difusivo}} + [Fontes - Sumidouros] \quad (5)$$

A variação de uma determinada propriedade ( $\beta$ ) num volume de controlo vai depender dos fluxos que atravessam a superfície do volume ( $A$ ) e das fontes e sumidouros existentes dentro do volume de controlo. O fluxo que atravessa as faces do volume de controlo pode ser do tipo advectivo ou do tipo difusivo, sendo que o fluxo advectivo corresponde ao movimento da propriedade entre volumes com uma determinada velocidade. O fluxo difusivo corresponde ao gradiente de difusão existente dentro do volume de controlo e entre os diferentes volumes.

O fluxo de água existente na bacia do Guadiana ocorre em diferentes domínios. O fluxo de água existente na atmosfera não é calculado pelo modelo, e apenas é utilizado como condição de fronteira da atmosfera, ao fornecer ao modelo a precipitação, a radiação solar, o vento, e a humidade do ar.



O movimento de água no solo ocorre através dos espaços intersticiais que existem entre as partículas de solo, que podem ser ocupados por líquidos e gases. O escoamento vertical de água é explicado pela equação de Darcy-Buckingham (6) (LaL & Shukla, 2004). Esta equação indica que o escoamento de água numa célula ( $\phi_{H_2O}$ ) depende da condutividade hidráulica do solo ( $K$ ) e da carga Hidráulica ( $H$ ).

$$\phi_{H_2O} = -K \left( \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

Derivando o escoamento de água numa célula ( $\phi_{H_2O}$ ) em ordem ao espaço, obtém-se a variação temporal da humidade no solo. Esta equação (7) é conhecida como equação de *Richards* (Gilding, 1991).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\phi_{H_2O}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( -K \left( \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) \right) \quad (7)$$

Para realizar o cálculo da equação de Richards, é necessário obter o gradiente hidráulico e a condutividade do solo na célula. A carga hidráulica ( $H$ ) é dada pela soma da pressão hidrostática ( $p$ ), a topografia ( $z$ ) e a pressão efetiva da água no solo ( $h$ ). A condutividade hidráulica do solo ( $K$ ) é calculada através do modelo de Mualem (Mualem, 1976), utilizando a condutividade saturada ( $K_s$ ), específica para cada tipo de solo, e a saturação efetiva na célula ( $S_E$ ) onde ( $L$ ) corresponde a um valor empírico de conectividade de poros como indicado na equação (8). O coeficiente ( $m_n$ ) é obtido pela equação (9) onde ( $n$ ) corresponde ao parâmetro empírico do declive das curvas  $\theta(h)$  e  $K(h)$ .

$$K = K_s \times S_E^L \times \left( 1 - \left( 1 - S_E^{\frac{1}{m_n}} \right)^{m_n} \right)^2 \quad (8)$$

$$m_n = 1 - \frac{1}{n} \quad (9)$$

O cálculo da saturação efetiva da célula vai ser realizado através da equação (10). Esta equação relaciona a humidade no solo ( $\theta$ ) na célula com a humidade residual ( $\theta_r$ ) daquele solo específico com a retenção de água saturada desse mesmo solo ( $\theta_s$ ).

$$S_E = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (10)$$

A humidade do solo ( $\theta$ ) descrita na equação (11) corresponde à quantidade de água existe na célula, podendo ser obtida pelo quociente entre o volume de água na célula ( $V_w$ ) e o volume total da célula ( $V_T$ ), corresponde ao volume ocupado por solo, ar e água.

$$\theta = \frac{V_w}{V_T} \quad (11)$$

No MOHID, o cálculo da humidade do solo ( $\theta$ ) é feito através da curva de retenção de água dada pelo modelo de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980)(12). Nesta equação ( $\alpha$ ) corresponde ao valor inverso da entrada de ar e ( $h$ ) corresponde à pressão efetiva.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^{1-\frac{1}{n}}} \quad (12)$$

O cálculo da pressão efetiva é obtido em função da humidade do solo, modificando a equação (12), como descrito na equação (13).

$$h = \left| \frac{\left( S_E^{\frac{1}{n}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \right| \quad (13)$$

O fluxo de água entre as células à superfície do solo e o escoamento superficial é realizado no modelo através do número de escoamento ( $CN$ ). A equação empírica (14) relaciona o escoamento superficial com a precipitação ( $P$ ), a capacidade máxima de retenção de água no solo ( $S$ ) e as perdas de precipitação devido ao coberto vegetal e a infiltração e retenção de água ( $I_a$ ). A capacidade máxima de retenção de água no solo ( $S$ ) relaciona-se com o número de escoamento ( $CN$ ) através da equação (15). O número de escoamento é um número compreendido entre 30 e 100. O ( $I_a$ ) correspondente é calculado a partir de ( $S$ ) e assume valores compreendidos entre  $0,1(S)$  e  $0,3(S)$ .

$$Q = \begin{cases} 0 & , se P \leq I_a \\ \left( \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \right) & , se P > I_a \end{cases} \quad (14)$$

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

O fluxo de água existente entre o solo e a atmosfera utilizado pelo MOHID é realizado através de diferentes processos, nomeadamente a evaporação do solo e transpiração das plantas, que no seu conjunto se designam por evapotranspiração. É utilizada a equação de FAO *Penman-Monteith* (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998) (16) para calcular a evapotranspiração de uma cultura de relva de referência fictícia. Esta equação utiliza a curva de pressão do vapor ( $\Delta$ ), a radiação à superfície ( $R_n$ ), o fluxo de calor no solo ( $G$ ), a constante psicrométrica ( $\gamma$ ), a temperatura ( $T$ ), a velocidade do vento a 2 metros de altura ( $U_2$ ), a pressão atual do vapor de água ( $e_a$ ) e a pressão de vapor de saturação ( $e_s$ ).

$$ET_o = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \left( \gamma \times \frac{900}{T + 273} \times U_2 \times (e_s - e_a) \right)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (16)$$

Utilizando a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) e um coeficiente de vegetação ( $K_c$ ), calcula-se a evapotranspiração potencial para um determinado tipo de vegetação, como pode ser observado na equação (17). A evapotranspiração potencial corresponde a máxima quantidade de água que pode ser evapotranspirada.

$$ETP = K_c \times ET_o \quad (17)$$

Através do uso do LAI é feita a partição da evapotranspiração potencial em evaporação potencial ( $EP$ ) e transpiração potencial ( $TP$ ), de acordo com as equações (18) e (19) (Ritchie, 1972) .

$$TP = ETP \times (1 - e^{-0.463 \times LAI}) \quad (18)$$

$$EP = ETP - TP \quad (19)$$

O cálculo do escoamento superficial e o escoamento na rede de drenagem é realizado através da equação de Saint Venant, variando apenas na dimensão (2D para o escoamento superficial e 1D para o escoamento na rede de drenagem). A equação de Saint Venant é obtida através da segunda lei de Newton, que afirma que a soma das forças aplicadas a um dado corpo iguala o produto da massa do corpo pela aceleração que este sente, equação (20).

$$\sum Forças = m \times \frac{dv}{dt} \quad (20)$$

Um corpo ou massa de água pode encontrar-se em movimento ou em repouso. A sua velocidade num determinado instante é determinada pelas forças que lhe são aplicadas. Quando a soma das forças aplicadas for zero, a aceleração é nula e a velocidade do corpo mantém-se constante. Caso a soma das forças seja diferente de zero, existe aceleração e a velocidade varia. Dado que a massa do corpo é o produto da densidade pelo volume, da substituição na equação (20) resulta a equação (21).

$$\rho \times Vol \times \frac{dv}{dt} = \sum Forças \quad (21)$$

A ocorrer, o movimento de uma massa de água corresponde ao movimento de um grupo de massas que interagem entre si, podendo existir influência no *momentum* da massa de água. A derivada da velocidade é decomposta em 2 derivadas parciais de velocidade, uma em relação ao tempo e outra ao espaço, de acordo com a equação (22).

$$\rho \times Vol \times \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \sum Forças \quad (22)$$

As principais forças que atuam num corpo de água no escoamento superficial e na rede de drenagem são o gradiente hidráulico  $\left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)$  e a resistência de atrito ( $\mu$ ) na superfície do solo e ou nas paredes do canal. O gradiente hidráulico para águas superficiais corresponde à variação de altura da coluna de água entre 2 pontos. O cálculo da resistência de atrito ( $\mu$ ) está descrito na equação (23), e considera a

aceleração gravítica ( $g$ ), o volume da célula ( $Vol$ ), a densidade ( $\rho$ ), e o declive à superfície da água ( $S_f$ ).

$$\mu = \rho \times Vol \times g \times S_f \quad (23)$$

A equação (24) traduz a soma das principais forças que atuam no escoamento das águas superficiais e na rede de drenagem.

$$\sum F = -\rho \times Vol \times g \times \left( \frac{\partial H}{\partial x_i} + S_{fi} \right) \quad (24)$$

Ao igualar as equações (22) e (24) obtêm-se a equação de Saint Venant (25).

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -g \left( \frac{\partial H}{\partial x_i} + S_{fi} \right) \quad (25)$$

A equação de Saint Venant (25) pode ser multiplicada por uma área (vertical), o que permite utilizar caudais no cálculo dos fluxos de água. A equação resultante, (26), também é conhecida como equação da onda dinâmica.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial Q_i}{\partial x_j} = -g \times A \left( \frac{\partial H}{\partial x_i} + S_{fi} \right) \quad (26)$$

O declive à superfície da água ( $S_f$ )<sub>*i*</sub> é definido através da lei empírica de Manning-Strickler, equação (27), onde ( $R_h$ ) corresponde ao raio hidráulico (definido pelo quociente entre a secção transversal molhada e o perímetro molhado), ( $m_r$ ) ao coeficiente de rugosidade de Manning.

$$(S_f)_i = \frac{m_r^2 |Q| Q_i}{A^2 R_h^{\frac{4}{3}}} \quad (27)$$

Em determinadas condições, a equação de Saint Venant pode ser simplificada. Quando existe uma fraca variação de declive e um número de Froude baixo, o gradiente de velocidade horizontal é baixo e as forças de inércia podem ser desprezadas (Abbott & Minns, 1998). Quando a aceleração é praticamente nula, a equação de Saint Venant pode ser escrita na equação (28), equação de onda difusa, onde o gradiente hidráulico anula o atrito. Nesta situação, o fluxo de água depende do gradiente da altura da coluna de água e da resistência de Manning ( $m_r$ ).

$$Q_i = \frac{A(R_h)^{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{d(z+h)}{dx_i}}}{m_r} \quad (28)$$

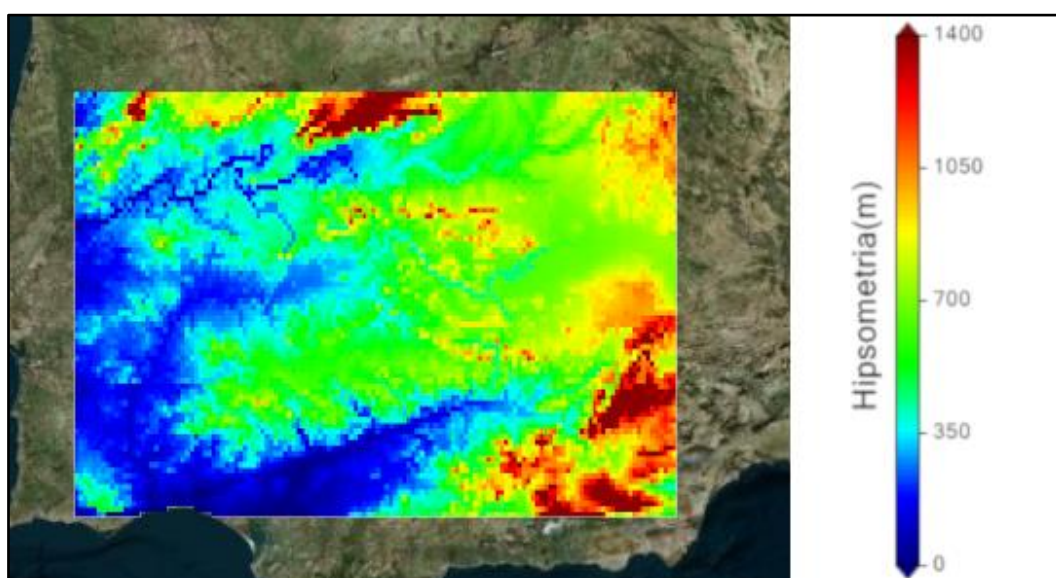
Se o nível de água for paralelo ao fundo da coluna de água, a equação de St. Venant pode ser simplificada para a equação de onda cinemática (29), onde o declive pode ser utilizado em vez do gradiente do nível de água.

$$Q_i = \frac{A(R_h)^{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{dz}{dx_i}}}{m_r} \quad (29)$$

## 3.2 Implementação do modelo

A implementação do modelo foi inicializada através da criação de uma malha bidimensional com células de dimensão constante. A malha apresenta um formato retangular e localiza-se entre as coordenadas (8° 13' 58,8 " W; 37° 7' 40,44" N) e (2° 6' 27" W; 40 ° 30' 21,24" N). A resolução da malha é de 5 km, correspondendo a células de dimensão 0.045 x 0.045 graus decimais, num total de 10200 células (75 x 136).

O passo seguinte na implementação do modelo é a obtenção de um modelo digital do terreno (DTM), tendo sido escolhido o Copernicus Land Monitoring Service EU-DEM (European Environment Agency, 2017) com resolução de 1 km, que foi interpolado com a malha previamente criada, tendo-se obtido o DTM indicado na Figura 12.



*Figura 12 – Hipsometria (m) implementada no modelo.*

Com a obtenção do DTM interpolado com a malha do modelo, procedeu-se a remoção de depressões nele existentes porque o MOHID-Land não permite a existência de depressões dentro da bacia, sendo necessário existir um gradiente de escoamento em todas as células da malha. A remoção de depressões origina 3 ficheiros com informação necessária à modelação, nomeadamente, a delineação da bacia, a geometria da bacia e a rede de drenagem. O ficheiro da geometria da bacia inclui as informações sobre o limite em área da bacia e a localização na malha (i,j) do local onde o escoamento de água de toda a bacia converge, como indica a Tabela 1.

*Tabela 1- Propriedades definidas no ficheiro das propriedades geométricas da bacia*

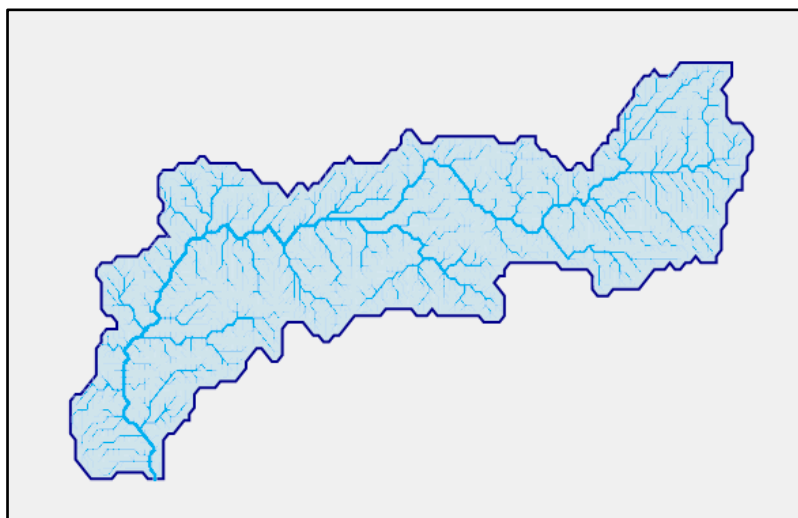
| Geometria da Bacia           |            |
|------------------------------|------------|
| Área Limite                  | 10 000 000 |
| Célula de convergência (i,j) | (3;19)     |

A delineação da bacia obtida após a remoção de depressões no DTM pode ser observada na Figura 13.



*Figura 13 – Delineação da bacia utilizada para a modelação.*

O ficheiro da rede de drenagem é utilizado no próximo passo, através da edição das suas secções transversais. O MOHID permite definir a secção transversal para todo o sistema de drenagem utilizando um de dois métodos possíveis, o número de Strahler ou a área de drenagem. O método de Strahler atribui um nível a cada troço da rede de drenagem e sempre que ocorre a junção de 2 ramificações do mesmo nível, é formado um troço de nível seguinte. Quando as ramificações apresentam níveis diferentes, o troço formado mantém o nível superior. O método da área de drenagem, como o nome indica, permite a escolha das dimensões da secção de corte conforme a área de drenagem e realiza interpolação para as áreas de drenagem intermédias. Foi seleccionado o método da área de drenagem por permitir uma aproximação mais realista às dimensões da secção ao longo da rede de drenagem, pois com o método de Strahler foram registados apenas 6 níveis ao longo dos 860 km de extensão do rio Guadiana. Na Figura 14 encontra-se a rede de drenagem.



*Figura 14 – Rede de Drenagem implementada no modelo.*

A secção de corte da rede de drenagem utilizada na implementação do modelo tem o formato de um trapézio, com uma largura de superfície, uma largura de fundo e uma altura da coluna de água. A largura da rede de drenagem à superfície e a altura da coluna de água foram obtidas da base de dados (Andreadis, Schumann, & Pavelsky, 2013). Para estimar a largura de fundo da rede de drenagem recorre-se às equações (30) e (31). A equação (33) indica que a largura obtida para um determinado caudal ( $W_{flow}$ ) corresponde ao produto da largura máxima da rede de drenagem ( $W_{full}$ ) com o quociente entre a altura de água do caudal ( $h_{flow}$ ) e a altura máxima da rede de drenagem ( $h_{full}$ ), assumindo que as margens da rede de drenagem são simétricas. A equação (30) foi obtida por (Neal, et al., 2015).

$$W_{flow} = W_{full} \times \left( \frac{h_{flow}}{h_{full}} \right)^{\frac{1}{s}} \quad (30)$$

A Figura 15 apresenta o formato da secção de corte da rede de drenagem para diferentes ( $s$ ) aplicados na fórmula. Selecionou-se o ( $s$ ) igual a 5 para ser implementado na rede de drenagem. A equação (31) relaciona a área da secção de corte com a sua largura na superfície e a sua altura (Neal, et al., 2015).

$$A = W_{flow} \times h_{flow} \times \left( 1 - \frac{1}{s+1} \right) \quad (31)$$

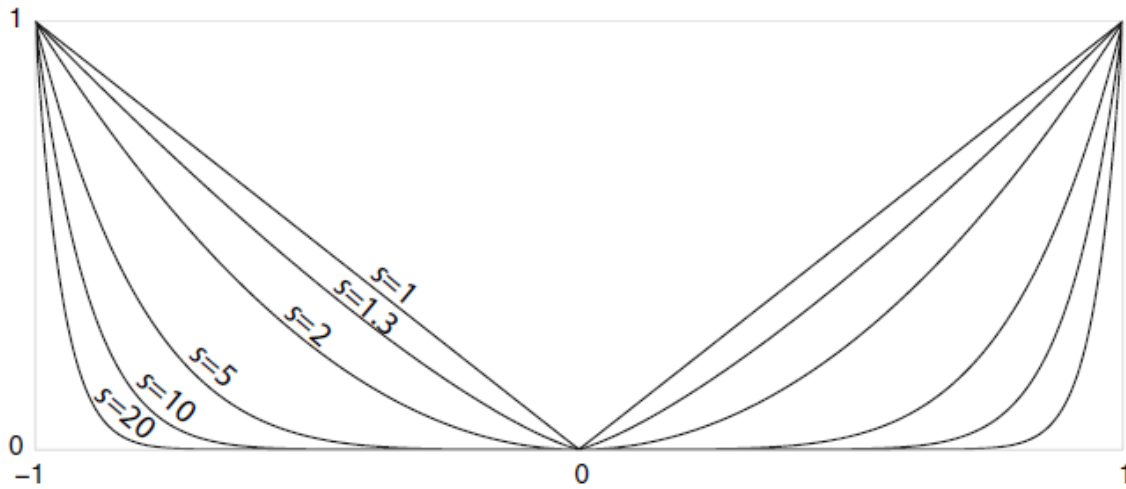


Figura 15 – Formato da secção de corte da rede de drenagem para os diferentes  $s$  implementados na equação (33) (fonte: (Neal, et al., 2015)).

Para diferentes larguras à superfície e alturas de coluna de água com  $s = 5$ , com o formato trapezoidal, estima-se que a largura no fundo do rio é sensivelmente 2/3 da largura à superfície. As dimensões da secção de corte aplicadas ao longo da rede de drenagem no início da modelação encontram-se na Tabela 2.

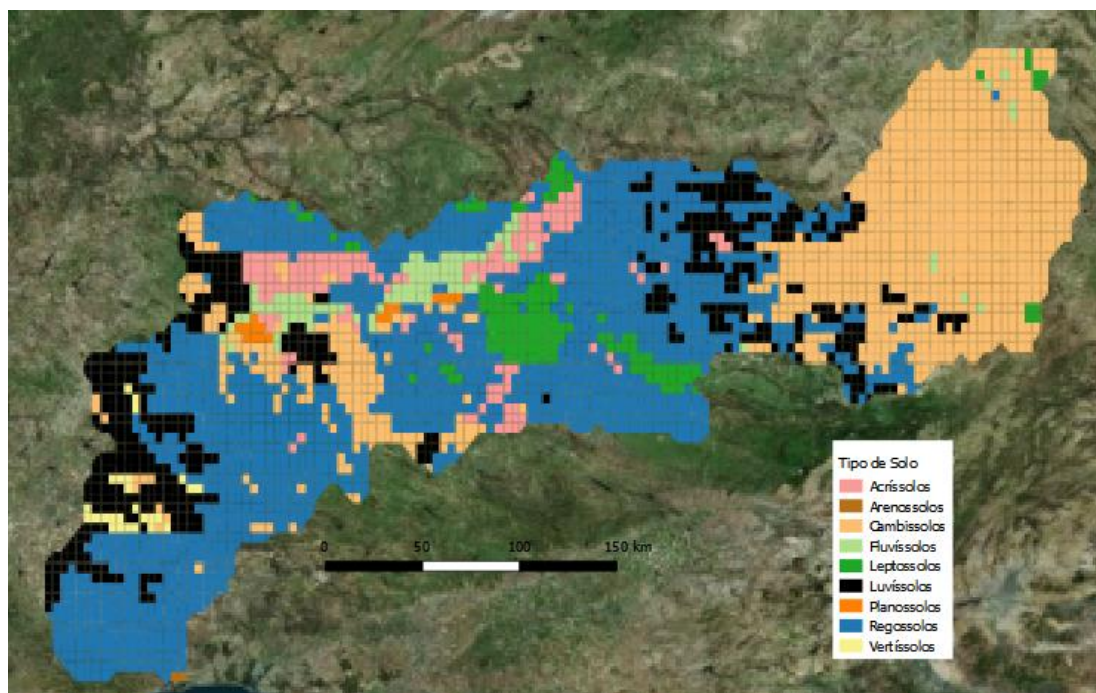
Tabela 2 - Dimensões de diversas secções de corte da rede de drenagem

| Área de drenagem (km <sup>2</sup> ) | Largura a superfície (m) | Largura no fundo (m) | Altura (m) |
|-------------------------------------|--------------------------|----------------------|------------|
| 18                                  | 3,5                      | 2,3                  | 0,15       |
| 25                                  | 3,8                      | 2,5                  | 0,16       |
| 50                                  | 4,7                      | 3,1                  | 0,20       |
| 100                                 | 6,7                      | 4,6                  | 0,26       |
| 200                                 | 9,8                      | 6,5                  | 0,34       |
| 500                                 | 15,8                     | 10,6                 | 0,50       |
| 750                                 | 19,5                     | 12,9                 | 0,60       |
| 1 000                               | 23,0                     | 15,2                 | 0,70       |
| 2 000                               | 30,0                     | 22,0                 | 0,85       |
| 5 000                               | 55,0                     | 36,7                 | 1,40       |
| 10 000                              | 79,0                     | 53,0                 | 1,80       |
| 20 000                              | 111,0                    | 74,0                 | 2,35       |
| 40 000                              | 160,0                    | 107,0                | 3,00       |
| 50 000                              | 178,0                    | 119,0                | 3,50       |
| 60 000                              | 280,0                    | 186,0                | 4,90       |
| 67 000                              | 300,0                    | 200,0                | 5,50       |

Com a rede de drenagem definida, procedeu-se à implementação do meio poroso. Selecionou-se uma espessura mínima de 0,3 m para o perfil de solo e uma espessura máxima de 30 m. Estipulou-se um declive máximo de 1 e ainda que 83% da espessura de solo se encontra saturada no início da simulação. Com as características definidas para o meio poroso e com o ficheiro do DTM obtido anteriormente, efetuou-se uma interpolação e criaram-se 4 ficheiros correspondentes ao declive, profundidade de solo, fundo do solo e nível freático de água.

O ficheiro que indica qual o tipo de solo existente em cada uma das células da malha é obtido através da interpolação da carta de solos *Harmonized World Soil Database* (FAO, 2009), à escala 1: 1.000.000 com o DTM obtido anteriormente. O ficheiro obtido na interpolação apresenta um total de 9 tipos de solo existentes dentro da bacia hidrográfica, como se pode ver na Figura 16. Devido às dimensões, formatos e sobreposição da carta de solos com a malha de estudo, o solo solonchanks e as massas de água deixaram de ter representação no mapa.





*Figura 16 – Tipos de solo na bacia hidrográfica do Guadiana.*

A construção da geometria vertical da área de estudo é realizada através da aplicação de 7 camadas de solo com uma profundidade total de 30 metros. As camadas foram definidas nas coordenadas CartesianasTop, que diferem das coordenadas cartesianas por criar as camadas a partir da topografia do terreno em direção ao fundo do solo ao invés de serem criadas a partir do zero hidrográfico. Das 7 camadas implementadas no modelo, as 5 camadas mais profundas foram definidas com as mesmas propriedades, de acordo com a Tabela 3. Apesar de existirem 3 tipos de camadas com propriedades diferentes foram implementadas 7 camadas, porque uma camada de menor espessura permite obter diferenças menores entre a saturação de água no centro da célula e a sua fronteira, permitindo uma representação mais realista do perfil vertical do solo.

*Tabela 3 – Camadas do solo implementadas no modelo.*

| Camada | Espessura da camada (m) | Agrupamento de camadas por propriedades |
|--------|-------------------------|-----------------------------------------|
| 1      | 0,3                     | 1                                       |
| 2      | 0,5                     | 2                                       |
| 3      | 1,2                     | 3                                       |
| 4      | 3,1                     |                                         |
| 5      | 8,0                     |                                         |
| 6      | 8,0                     |                                         |
| 7      | 8,9                     |                                         |
| Total: | 30,0                    |                                         |

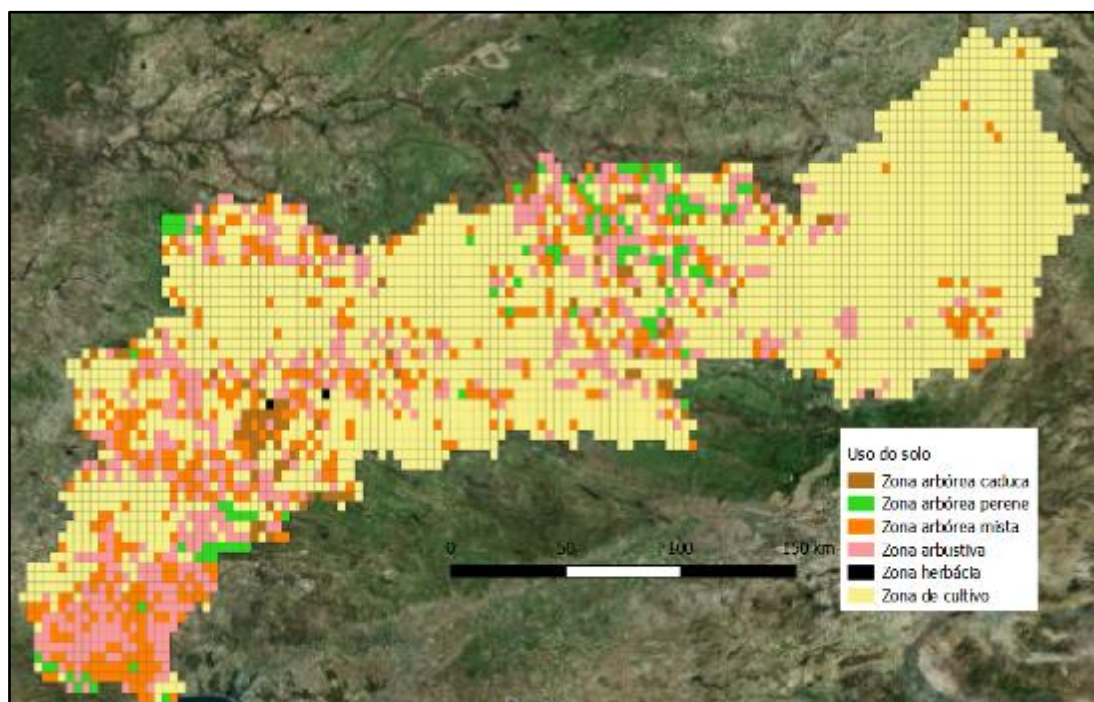
Para cada tipo de solo existente na bacia do Guadiana, definiram-se várias propriedades do meio poroso, podendo ser diferentes conforme a profundidade, como se encontra descrito na Tabela 4. As propriedades definidas para cada tipo de solo foram o número de escoamento ( $CN$ ) (USDA-SCS, 1972), a condutividade saturada do solo ( $K_s$ ), a retenção de água saturada do solo ( $\theta_s$ ), a humidade residual ( $\theta_r$ ), o inverso da entrada de ar ( $\alpha$ ), a medida de distribuição da dimensão de poros ( $n$ ) e conectividade empírica de poros ( $L$ ) (J.H.M, Lilly, Nemes, & Bas, 1999).

*Tabela 4 –Diversas propriedades para os diferentes tipos de solo(fontes: (USDA-SCS, 1972) e (J.H.M, Lilly, Nemes, & Bas, 1999) ).*

| Parâmetro            | Regossolos | Leptossolos | Arenossolos | Fluvisolos | Cambissolos | Luvissolos | Planossolos | Vertissolos | Acrissolos |
|----------------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| $CN$<br>(-)          | 85         | 89          | 84          | 71         | 76          | 66         | 74          | 70          | 65         |
| $KS_1$<br>(cm/d)     | 60         | 12          | 60          | 12         | 60          | 60         | 60          | 25          | 60         |
| $KS_2$ (cm/d)        | 60         | 0,12        | 60          | 11         | 11          | 11         | 9           | 9           | 9          |
| $KS_3$ (cm/d)        | 60         | 0,12        | 60          | 11         | 11          | 60         | 11          | 11          | 60         |
| $\theta_{s1}$<br>(-) | 0.403      | 0.439       | 0.403       | 0.439      | 0.403       | 0.403      | 0.403       | 0.520       | 0.403      |
| $\theta_{s2}$<br>(-) | 0.350      | 0.300       | 0.350       | 0.392      | 0.392       | 0.392      | 0.481       | 0.481       | 0.481      |
| $\theta_{s3}$<br>(-) | 0.350      | 0.300       | 0.350       | 0.392      | 0.392       | 0.350      | 0.392       | 0.392       | 0.350      |
| $\theta_{r1}$<br>(-) | 0.025      | 0.010       | 0.025       | 0.010      | 0.025       | 0.025      | 0.025       | 0.010       | 0.025      |
| $\theta_{r2}$<br>(-) | 0.025      | 0.010       | 0.025       | 0.010      | 0.010       | 0.010      | 0.010       | 0.010       | 0.010      |
| $\theta_{r3}$<br>(-) | 0.025      | 0.010       | 0.025       | 0.010      | 0.010       | 0.025      | 0.010       | 0.010       | 0.025      |
| $\alpha_1$<br>(1/m)  | 3.830      | 3.140       | 3.830       | 3.140      | 3.830       | 3.830      | 3.830       | 3.670       | 3.830      |
| $\alpha_2$<br>(1/m)  | 3.830      | 3.140       | 3.830       | 2.490      | 2.490       | 2.490      | 0.198       | 0.198       | 0.198      |
| $\alpha_3$<br>(1/m)  | 3.830      | 3.140       | 3.830       | 2.490      | 2.490       | 3.830      | 2.490       | 2.490       | 3.830      |
| $n_1$<br>(-)         | 1.377      | 1.180       | 1.377       | 1.180      | 1.377       | 1.377      | 1.377       | 1.100       | 1.377      |
| $n_2$<br>(-)         | 1.377      | 1.180       | 1.377       | 1.170      | 1.170       | 1.170      | 1.086       | 1.086       | 1.086      |
| $n_3$<br>(-)         | 1.377      | 1.180       | 1.377       | 1.170      | 1.170       | 1.377      | 1.170       | 1.170       | 1.377      |
| $L$<br>(-)           | 0,5        | 0,5         | 0,5         | 0,5        | 0,5         | 0,5        | 0,5         | 0,5         | 0,5        |

Com cada tipo de solos e as suas propriedades definidas, elaborou-se o ficheiro correspondente ao uso de solos. O ficheiro que representa o coberto vegetal existente na bacia hidrográfica foi obtido através da interpolação do DTM com a carta de uso do solo do projeto GLC 2000 à escala 1:1 000 000

(JRC, 2016), estando representado na Figura 17. A interpolação com a malha de estudo utilizada originou um ficheiro sem representação dos usos urbano e água.



*Figura 17 – Uso do solo na bacia hidrográfica do Guadiana implementado no modelo.*

Através do ficheiro do uso do solo da bacia, criaram-se os ficheiros correspondentes ao coeficiente de Manning e o coeficiente cultural ( $K_c$ ). Foi associado um coeficiente de Manning a cada tipo de uso de solo, bem como um coeficiente cultural ( $K_c$ ). Os valores atribuídos encontram-se na Tabela 5 e foram obtidos/estimados a partir dos artigos (Pestana, et al., 2013) e (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998) respetivamente. No artigo estão definidos diferentes coeficientes culturais ( $K_c$ ) para diferentes estágios de desenvolvimento da vegetação e foi selecionado um valor médio de todas as espécies vegetais correspondentes a esse tipo de vegetação, correspondendo ao estágio de desenvolvimento da cultura com o maior período de duração.

*Tabela 5 – Propriedades do uso de solos na bacia hidrográfica do Guadiana*

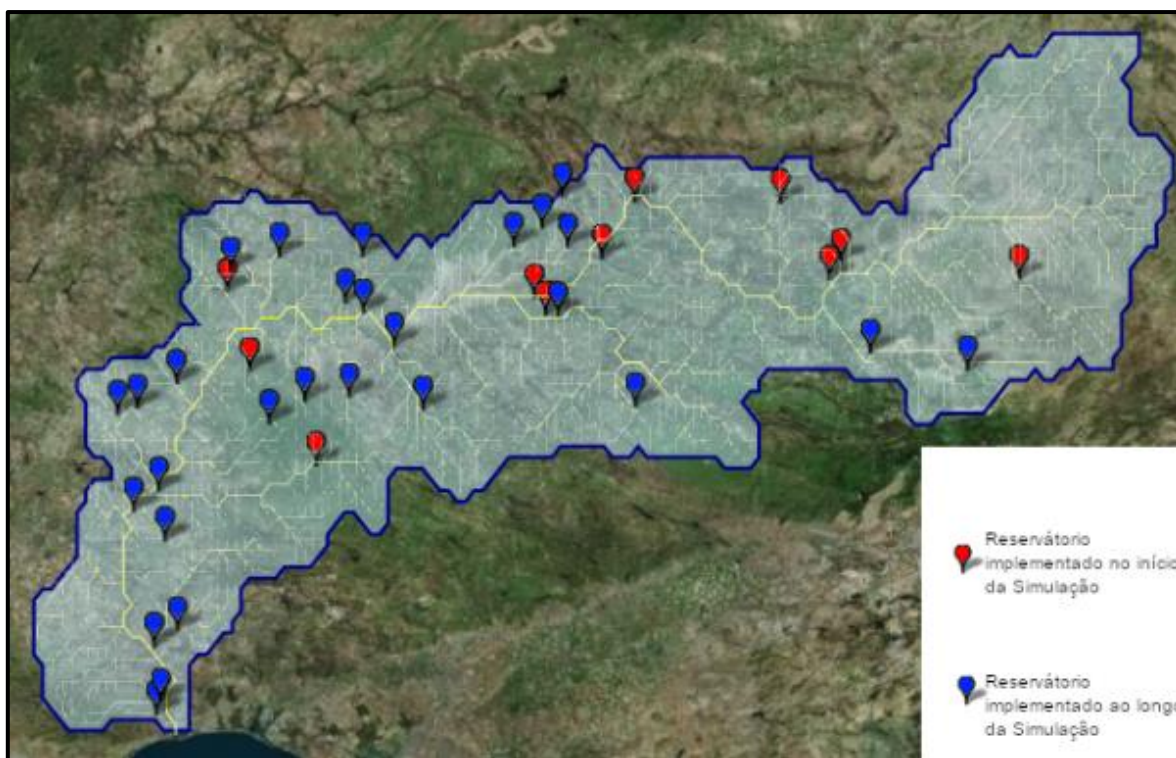
| Usos de Solo                 | Coeficiente de Manning<br>[s.m <sup>-1/3</sup> ] | $K_c$ de cultural<br>[-] |
|------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------|
| Zona de cultivo              | 0,045                                            | 0,92                     |
| Zona arbórea de folha mista  | 0,227                                            | 0,95                     |
| Zona arbórea de folha caduca | 0,231                                            | 0,80                     |
| Zona arbórea de folha perene | 0,125                                            | 1,07                     |
| Zona herbácea                | 0,039                                            | 0,85                     |
| Zona arbustiva               | 0,057                                            | 0,91                     |
| Massa de água                | 0,032                                            | 0,00                     |

O passo seguinte consiste na implementação dos fenómenos atmosféricos existentes na bacia durante o período simulado. Os dados atmosféricos utilizados no modelo foram fornecidos pelo sistema SAFRAN e foram interpolados com a malha utilizada no projeto. O SAFRAN (Quintana-Seguí, 2017) é um modelo que permite estimar variáveis atmosféricas em zonas climaticamente homogêneas através



de valores observados a cada 6h, sendo interpolados em dados horários. Os ficheiros da atmosfera obtidos contêm dados horários de precipitação, humidade relativa, módulo de vento, temperatura do ar e radiação solar, sendo que o coberto de nuvens é calculado através do MOHID e depende da radiação.

As albufeiras existentes na bacia hidrográfica do Guadiana com capacidade de armazenamento superior a 10 hm<sup>3</sup> de água existentes no período entre 1/10/1979 e 30/09/2014 foram implementados no modelo. Para cada albufeira implementado no modelo é fornecida a sua localização em coordenadas de latitude e longitude conforme se apresenta nos anexos E e F. Também foi necessário implementar os volumes mínimo e máximo de armazenamento da albufeira bem como a sua curva de acumulação. As descargas das albufeiras para o leito do rio foram implementadas nas albufeiras que apresentam esses registos durante o período simulado. Para as albufeiras sem qualquer registo de descarga foi selecionada uma curva de operação que relaciona a percentagem do volume da albufeira com a percentagem de máxima descarga da albufeira para calcular as descargas. As albufeiras em funcionamento no início da simulação foram implementados com 45% do seu volume ocupado por água. A Figura 18 indica a localização dos diferentes albufeiras existentes na bacia hidrográfica do Guadiana. A vermelho encontra-se representado as albufeiras construídos anteriormente a 1979, e a azul as albufeiras finalizados entre 1979 e 2014.



*Figura 18 - Localização das albufeiras com capacidade superior a 10 hm<sup>3</sup> de água implementados no início e ao longo da simulação.*

Após criados os diferentes ficheiros com informação da bacia hidrográfica utilizados na simulação, foram selecionadas as diferentes opções existentes nos módulos do MOHID-Land.

No módulo *Basin* ativaram-se os módulos *Atmosphere*, *Porous Media*, *Runoff*, *Drainage Network*, *Vegetation*, e *Reservoirs* e selecionou-se o método de Penman-Monteith para ser utilizado no cálculo da evapotranspiração.

No módulo *Atmosphere* definiu-se a localização dos ficheiros HDF que contêm as diferentes propriedades atmosféricas necessárias para o modelo, nomeadamente, a radiação solar, a precipitação, a temperatura do ar, a velocidade do vento, a humidade relativa bem como o método para o cálculo do coberto de nuvens.

No módulo *Drainage Network* selecionou-se a equação de onda dinâmica, como aproximação hidrodinâmica a ser utilizada nos cálculos. Para um coeficiente de Manning de  $0,035 \text{ s.m}^{-1/3}$ , uma altura mínima da coluna de água de 0,01 m e um declive mínimo de 0,0001. O cálculo do fluxo de água na fronteira entre a bacia do Guadiana e o oceano Atlântico é efetuado com a equação de onda cinemática.

No módulo *Porous Media* definiu-se o  $Kh$  com o valor 3. Quando a humidade no solo ( $\theta$ ) for superior a 0,98%, o modelo começa a utilizar a pressão hidrostática no cálculo do escoamento. Definiu-se a humidade no solo ( $\theta$ ) na fronteira entre as diferentes camadas de solo como sendo o mínimo das duas saturações.

No módulo *Run off* a aproximação hidrodinâmica selecionada foi a onda dinâmica, e foi definido o valor de 0,0001 m para a altura mínima da coluna de água. No instante inicial foi definida uma coluna de água de 0,01 m em toda a bacia do Guadiana.

No módulo *Reservoir* definiu-se que as albufeiras existentes no início da simulação se encontram com uma taxa de ocupação de 45%. Não foram selecionadas trocas à superfície e no fundo da albufeira e selecionou-se o caudal de saída das albufeiras como uma descarga, que é ativada no modulo *Discharge*.

No módulo *Vegetation* selecionou-se que a vegetação na bacia hidrográfica utiliza o modelo de crescimento, estando os diferentes parâmetros associados ao crescimento da vegetação definidos no *GrowDatabase* (anexo H). Estes parâmetros estão segundo a parametrização (Neitsch, 2011) utilizada no modelo SWAT.

O módulo *Discharge* define quais as descargas existentes ao longo da bacia, com a localização de cada albufeira e a indicação da série temporal com os caudais de saída da albufeira.

As series temporais foram definidas com um intervalo horário nos diversos módulos.

### 3.3 Avaliação de resultados

A calibração e a validação do modelo necessitam indicadores que avaliem a qualidade do ajustamento dos valores obtidos na simulação com as observações existentes ao longo dos cursos de água da bacia hidrográfica.

Selecionaram-se estações hidrométricas com o registo do caudal médio diário num período mínimo de 5 anos durante o tempo de calibração (1985-1995), tanto em Espanha (CEH-CEDEX, 2018) como em

Portugal (SNIRH, 2018). Cada estação foi localizada na rede de drenagem e durante a simulação o modelo registou séries temporais com diversos parâmetros associados à água existente na rede de drenagem, nomeadamente, caudal, altura da coluna de água, escoamento superficial a chegar à rede de drenagem, velocidade do caudal e a percentagem do máximo volume ocupado. As estações hidrométricas foram divididas em 2 grupos (Anexo J), conforme sejam ou não influenciadas por albufeiras e ou outras estruturas influenciadas por atividades humanas, figura 19.

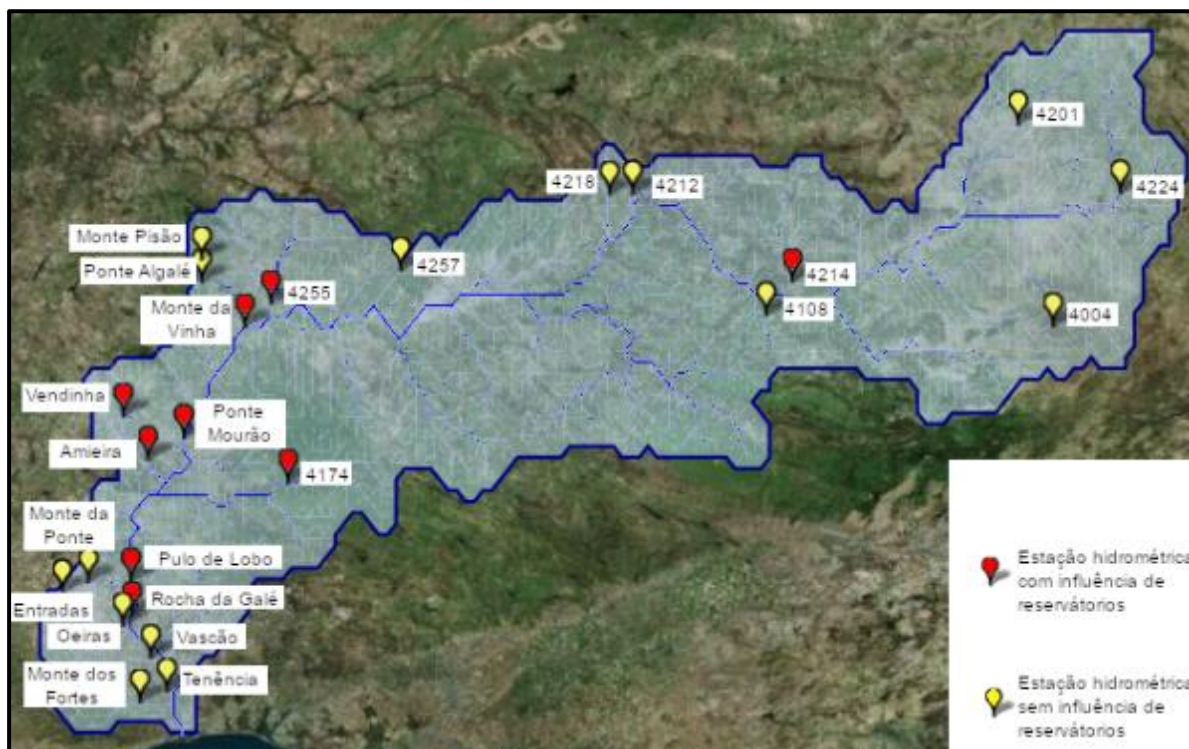


Figura 19 - Localização das estações hidrométricas existentes na bacia hidrográfica do Guadiana utilizadas no modelo, com e sem influência de albufeiras.

A curva de permanência é um método particularmente útil para analisar a variação do caudal sem considerar a sua variação no tempo num determinado período de tempo. Neste método, os dados disponíveis são ordenados por ordem de crescente permitindo relacionar um determinado valor e a sua frequência de ocorrência, podendo assim perceber-se quando esse valor é superado ou igualado. No caso de estudo, é analisada a curva de permanência do caudal médio diário. A comparação entre a curva obtida na simulação e a curva da estação hidrométrica vai permitir perceber qualitativamente de entre várias coisas, se os fenómenos extremos ocorrem com a mesma frequência e se ambos os caudais apresentam a mesma tendência.

A simulação também vai ser avaliada estatisticamente através de 5 coeficientes estatísticos com os caudais mensais. Os coeficientes estatísticos permitem comparar os caudais observados nas estações hidrométricas com os caudais simulados e obter resultados quantitativos.

O coeficiente *NSE* (Nash-Sutcliffe Efficiency) é utilizado para determinar a magnitude relativa da variância residual entre os valores simulados e os valores observados. Este coeficiente é calculado através da fórmula dada na equação (32). O número obtido pelo coeficiente *NSE* varia no intervalo

$[-\infty; 1]$ . Um valor de  $NSE$  igual a 1 significa que os resultados simulados e os valores observados são iguais. Quanto mais perto de 1 for o  $NSE$  melhor a capacidade de previsão do modelo, sendo considerada uma boa previsão para valores superiores a 0,75 e aceitável para valores entre  $[0,5; 0,75]$  (Moriasi, et al., 2007). Um valor de  $NSE$  negativo implica que as previsões do modelo têm uma baixa precisão e que a média dos dados observados descreve melhor os dados observados do que o modelo. (Moriasi, et al., 2007).

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{medio})^2} \right] \quad (32)$$

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), equação (33) descreve em percentagem a capacidade da simulação em explicar a variabilidade existente nas observações. Considera-se que o modelo simulado apresenta uma boa aproximação quando o ( $R^2$ ) é superior a 0,75 e aceitável para valores entre  $[0,5; 0,75]$  (Moriasi, et al., 2007). O valor do ( $R^2$ ) obtido deve ser analisado tendo em linha de conta outros métodos estatísticos, pois este coeficiente é insensível às diferenças proporcionais e aditivas entre os dados simulados e os dados observados, podendo o resultado levar a conclusões erradas (Moriasi, et al., 2007) e (Legate & Jr., 1999).

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})(Y_i^{sim} - \bar{Y}^{sim})}{\left[ \sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2 \right]^{0.5} \left[ \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - \bar{Y}^{sim})^2 \right]^{0.5}} \right]^2 \quad (33)$$

Vai ser utilizado também o coeficiente do erro médio quadrático ( $RMSE$ ) dado pela equação (34). Este coeficiente é utilizado para verificar a precisão de um modelo, sendo sempre obtido um resultado não negativo. O valor de zero corresponde aos dados simulados serem iguais aos dados observados. Este coeficiente não é adimensional como os coeficientes anteriores e depende da escala e unidades dos dados (Moriasi, et al., 2007).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{n - 1}} \quad (34)$$

O  $NRMSE$  (erro médio quadrático normalizado) corresponde ao  $RMSE$  dividido pelo desvio padrão. A normalização do  $RMSE$  com o desvio padrão torna o  $NRMSE$  adimensional, permitindo a este coeficiente ser facilmente comparado com outros modelos para os mesmos dados, mas que possam funcionar em escalas diferentes. O  $NRMSE$  encontra-se na equação (35). Um  $NRMSE$  com valor situado entre  $[0; 0,5]$  é considerado uma boa aproximação, entre  $[0,5; 0,7]$  é considerado aceitável e superior a 0,7 é considerado uma má aproximação (Moriasi, et al., 2007).

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{n - 1}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2}} \quad (35)$$

O último coeficiente a ser utilizado é o *PBIAS* (*Percent bias*), equação (36), que tem como função verificar se a simulação está a sobrestimar ou a subestimar os resultados obtidos comparativamente com os valores observados. Numa simulação ideal, este coeficiente tem o valor de zero. Caso estejamos perante uma sobrestimação este coeficiente tem valor negativo e caso exista uma subestimação o valor é positivo. Este coeficiente é adimensional encontrando-se em escala percentual. Valores de *PBIAS* entre [-10% ; 10%] indicam que os valores simulados são boas aproximações aos valores observados, entre [-25%; -10%] e [10% ; 25%] considera-se que a simulação apresenta uma aproximação razoável e quando os valores simulados não se encontram no intervalo [-25% ; 25%] estamos perante uma má aproximação (Moriasi, et al., 2007).

$$PBIAS = 100 \times \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (36)$$

Os coeficientes  $R^2$ , *NSE*, *RMSE* e *NRMSE* são sensíveis à existência de dados com valores anormais extremos.



## 4 Resultados

Neste capítulo são realizadas a calibração e a validação do modelo para a bacia hidrográfica do Guadiana. O período de simulação do modelo tem início no dia 1 de outubro de 1979 e termina a 30 de junho de 2014. Definiram-se os primeiros 5 anos de simulação do modelo para a estabilização do modelo enquanto que o período de calibração ocorre entre 1 de outubro de 1985 e 30 de setembro de 1995. A validação do modelo é feita no período compreendido entre 1 de outubro de 1995 e 30 de junho de 2014.

### 4.1 Análise de sensibilidade

Após a implementação do modelo, procedeu-se à sua simulação. Foi necessário modificar alguns parâmetros utilizados para permitir a computação de volumes de água acumulados em determinados locais na rede de drenagem nos períodos de precipitação crítica, bem como para permitir a obtenção de resultados aceitáveis na calibração.

#### 4.1.1 Rede de drenagem

O primeiro parâmetro a ser modificado no modelo foi a dimensão da rede de drenagem. Em períodos de precipitação crítica (precipitações com elevada duração de tempo e ou precipitações muito elevadas num curto período de tempo) o volume de água acumulado nos diferentes troços da rede de drenagem pode ser elevado o suficiente para que o modelo não seja capaz de calcular o seu escoamento. O aumento das dimensões da rede de drenagem aumenta o caudal que se pode escoar, permitindo a continuação da simulação. As dimensões iniciais e finais da rede de drenagem utilizadas no modelo encontram-se na Tabela 2.

*Tabela 6 – Diferenças entre as dimensões iniciais e finais da rede de drenagem.*

| Área de drenagem (km <sup>2</sup> ) | Largura à superfície (m) |        | Largura no fundo (m) |        | Altura da coluna de água (m) |       | Secção Transversal (m <sup>2</sup> ) |        |
|-------------------------------------|--------------------------|--------|----------------------|--------|------------------------------|-------|--------------------------------------|--------|
|                                     | Inicial                  | Final  | Inicial              | Final  | Inicial                      | Final | Inicial                              | Final  |
| 18                                  | 3,50                     | 6,10   | 2,30                 | 4,07   | 0,15                         | 0,33  | 0,4                                  | 1,7    |
| 25                                  | 3,80                     | 7,40   | 2,50                 | 4,93   | 0,16                         | 0,45  | 0,5                                  | 2,8    |
| 50                                  | 4,70                     | 10,40  | 3,10                 | 6,93   | 0,2                          | 0,58  | 0,8                                  | 5,0    |
| 100                                 | 6,70                     | 21,30  | 4,60                 | 14,20  | 0,26                         | 0,77  | 1,5                                  | 13,7   |
| 200                                 | 9,80                     | 34,20  | 6,50                 | 22,80  | 0,34                         | 1,03  | 2,8                                  | 29,4   |
| 500                                 | 15,80                    | 53,60  | 10,60                | 35,73  | 0,5                          | 1,42  | 6,6                                  | 63,4   |
| 750                                 | 19,50                    | 56,2   | 12,90                | 37,47  | 0,6                          | 1,48  | 9,7                                  | 69,3   |
| 1000                                | 23,00                    | 60,80  | 15,20                | 40,53  | 0,7                          | 1,52  | 13,4                                 | 77,0   |
| 2000                                | 30,00                    | 80,60  | 22,00                | 53,73  | 0,85                         | 1,70  | 22,1                                 | 114,2  |
| 5000                                | 55,00                    | 110,50 | 36,70                | 73,67  | 1,4                          | 2,13  | 64,2                                 | 196,1  |
| 10000                               | 79,00                    | 138,20 | 53,00                | 92,13  | 1,8                          | 2,35  | 118,2                                | 270,6  |
| 20000                               | 111,00                   | 179,80 | 74,00                | 119,87 | 2,35                         | 3,10  | 217,4                                | 464,5  |
| 40000                               | 160,00                   | 245,50 | 107,00               | 163,67 | 3                            | 4,80  | 400,5                                | 982,0  |
| 50000                               | 178,00                   | 315,00 | 119,00               | 210,00 | 3,5                          | 5,70  | 519,8                                | 1496,3 |
| 60000                               | 280,00                   | 350,00 | 186,00               | 233,33 | 4,9                          | 6,80  | 1141,7                               | 1983,3 |
| 67000                               | 300,00                   | 358,00 | 200,00               | 238,67 | 5,5                          | 7,00  | 1375,0                               | 2088,3 |

Ao analisar a Tabela 2 verifica-se que em toda a rede de drenagem houve um aumento das suas dimensões, com as alterações mais significativas nas áreas de drenagem inferiores a 2000 km<sup>2</sup>.

#### 4.1.2 Número de Escoamento

O primeiro parâmetro a ser analisado após definir as dimensões da rede de drenagem é o número de escoamento (*CN*), utilizado nas equações (13) e (14). Este parâmetro integra o cálculo do fluxo de água entre a fronteira do escoamento superficial com o escoamento no solo, representando a infiltração de água no solo. Foram selecionadas as estações hidrométricas 4004, 4201 e 4224 por apresentarem apenas um tipo de solo em praticamente toda a extensão das suas áreas de drenagem, regossolo. Nas figuras 20, 21 e 22 são comparados os caudais obtidos na simulação para diferentes números de escoamento, 45, 69 e 80.

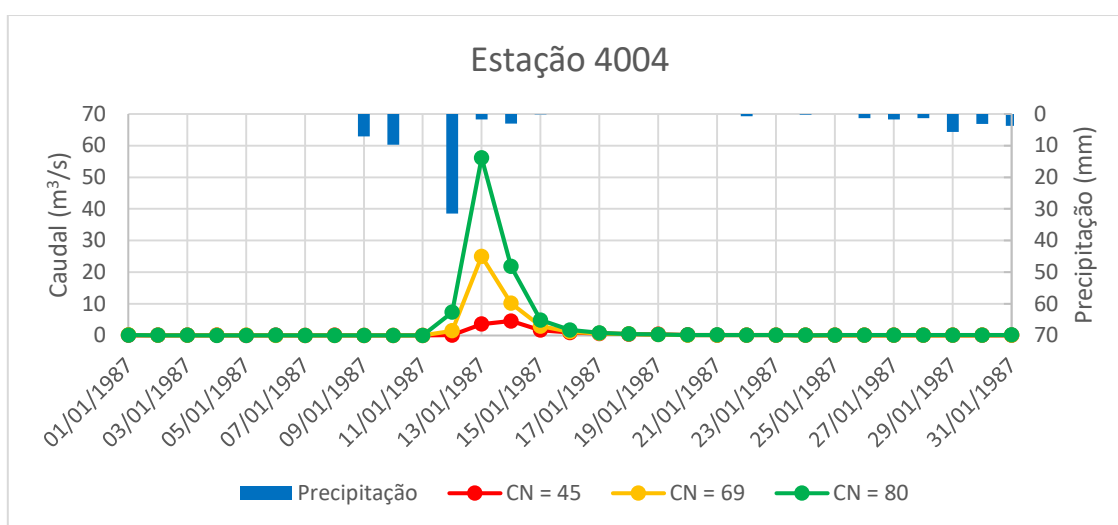


Figura 20 - Caudais diários de escoamento para diferentes números de escoamento na estação 4004.

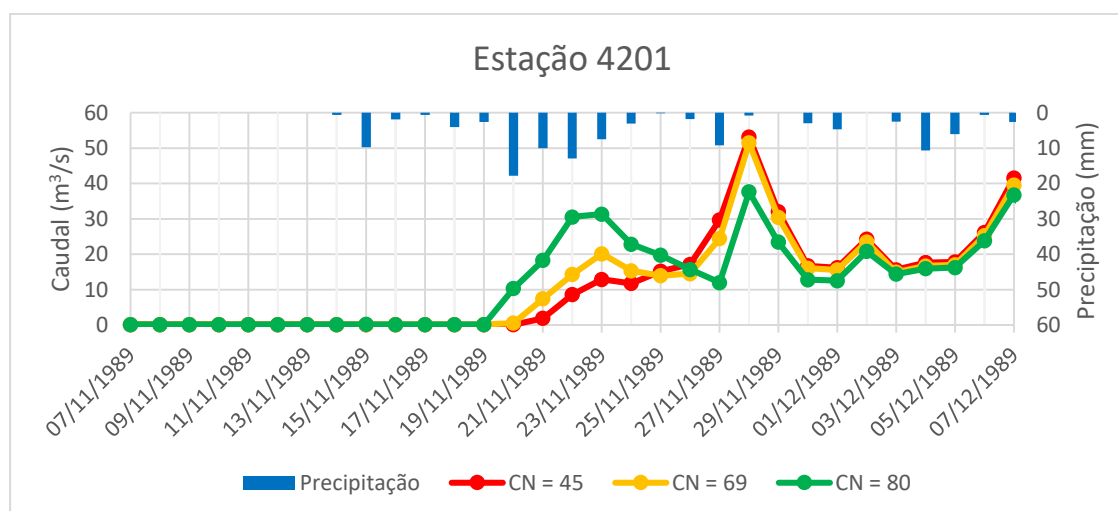


Figura 21 - Caudais diários de escoamento para diferentes números de escoamento na estação 4201.

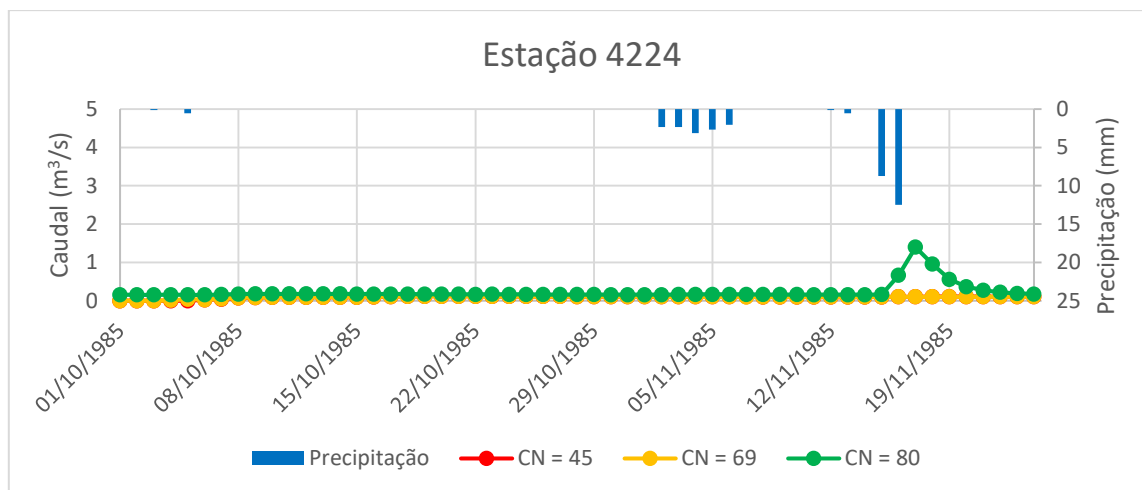


Figura 22 - Caudais diários de escoamento para diferentes números de escoamento na estação 4224.

Na figura 20, estação 4004, verifica-se a ocorrência de precipitação intensa (32 mm) no dia 30 de janeiro de 1987, após um intervalo de tempo sem precipitação. O número de escoamento (CN) 80 apresenta um caudal muito superior comparativamente aos números de escoamento (CN) 45 e 69 entre os dias 12 e 16 de janeiro de 1987. A diferença nos caudais é explicada pela taxa de infiltração de água no solo. Nas 3 situações, a ocorrência de um período de tempo sem precipitação permite que o nível de saturação de água no solo não esteja perto do nível de saturação, existindo capacidade da água infiltrar no solo. O aumento do número de escoamento corresponde a uma diminuição da capacidade de infiltração da água no solo e o aumento do escoamento superficial de água, como pode ser visto entre os dias 12 e 15 de janeiro de 1987. No dia 12 de janeiro de 1987, o caudal da simulação com número de escoamento 80 é cerca de 16 vezes superior ao caudal da simulação com número de escoamento 45 e cerca de 2 vezes superior ao caudal do número de escoamento 69. Quando o volume de água associado a precipitação de dia 12 janeiro escoar para jusante da estação 4004, o caudal das 3 simulações estabiliza na mesma ordem de grandeza.

A Figura 21 apresenta os caudais obtidos nas diferentes simulações para a estação 4201. Entre os dias 19 e 24 de novembro de 1989, observa-se o mesmo fenómeno ocorrido na figura 20, com um aumento de caudal superior para números de escoamento maiores. Como existe precipitação diária após o dia 19 de novembro, o solo nas simulações de número de escoamento 45 e 69 atinge a sua capacidade de saturação ou pelo menos o seu nível de saturação encontra-se perto de 100%, acabando por diminuir a capacidade de infiltração do solo e este comporta-se como um solo impermeável. O fenómeno de impermeabilidade pode ser verificado entre os dias 27 e 29 de novembro, com o caudal do número de escoamento 80 ser inferior as outras 2 simulações, por o solo nesta simulação ainda não estar totalmente saturado (menor taxa de infiltração). Após dia 30 de novembro, as diferentes simulações apresentam caudais semelhantes, com tendência a se igualarem, à medida que o solo da simulação com número de escoamento 80 atinge os mesmos níveis de saturação.

A Figura 22 apresenta as diferentes simulações relativamente ao número de escoamento na estação 4224. No mês de outubro de 1985 praticamente não existiu precipitação na célula da estação 4224 e na sua área de drenagem, como se pode observar pelo caudal registado nas 3 simulações, que é

praticamente zero e constante ao longo do tempo. Entre os dias 2 e 6 de novembro de 1985 ocorreu precipitação, mas em quantidades inferiores a 5 mm de água por dia, não provocando alterações aos caudais. Nos dias 15 e 16 de novembro as precipitações de 8,75 mm e 12,5 mm provocaram um aumento do caudal na simulação do número de escoamento 80 enquanto nas simulações com números de escoamento 45 e 69 não existiram mudanças significativas no caudal. Nesta situação, a precipitação que ocorreu nos dias 15 e 16 de novembro foi superior à taxa de infiltração na simulação com o número de escoamento 80, aumentando o escoamento superficial para a rede de drenagem ao passo que foi inferior à taxa de infiltração nas outras duas simulações, que associado ao nível de saturação do solo, conseguiram absorver praticamente toda a água precipitada, não modificando significativamente o caudal.

#### 4.1.3 Coeficiente de Manning

O próximo parâmetro a ser analisado é o coeficiente de Manning ( $M_r$ ). O coeficiente de Manning é utilizado nas equações de escoamento superficial e representa a resistência da superfície ao escoamento de água. Nas figuras 23, 24 e 25 estão representados os caudais obtidos nas estações 4108, 4224 e 4201, por apresentarem o mesmo tipo de uso de solo ao longo de toda a sua área de drenagem, uso agrícola. Os valores utilizados para analisar o coeficiente de Manning são de  $0,034 \text{ s.m}^{-1/3}$ ;  $0,038 \text{ s.m}^{-1/3}$  e  $0,043 \text{ s.m}^{-1/3}$  respetivamente.

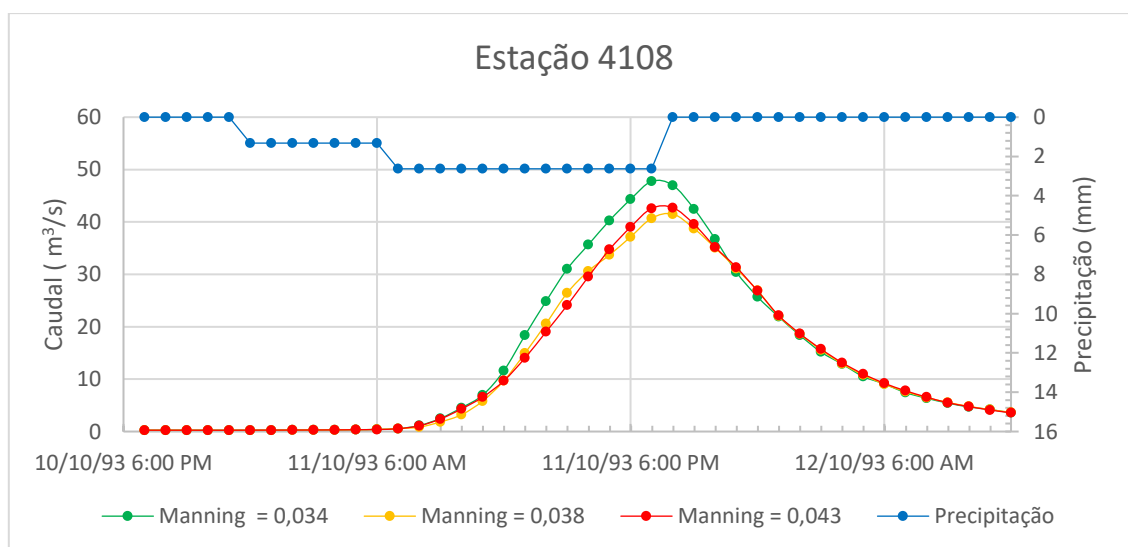


Figura 23- Caudais horários de escoamento para diferentes coeficientes de Manning na estação 4108

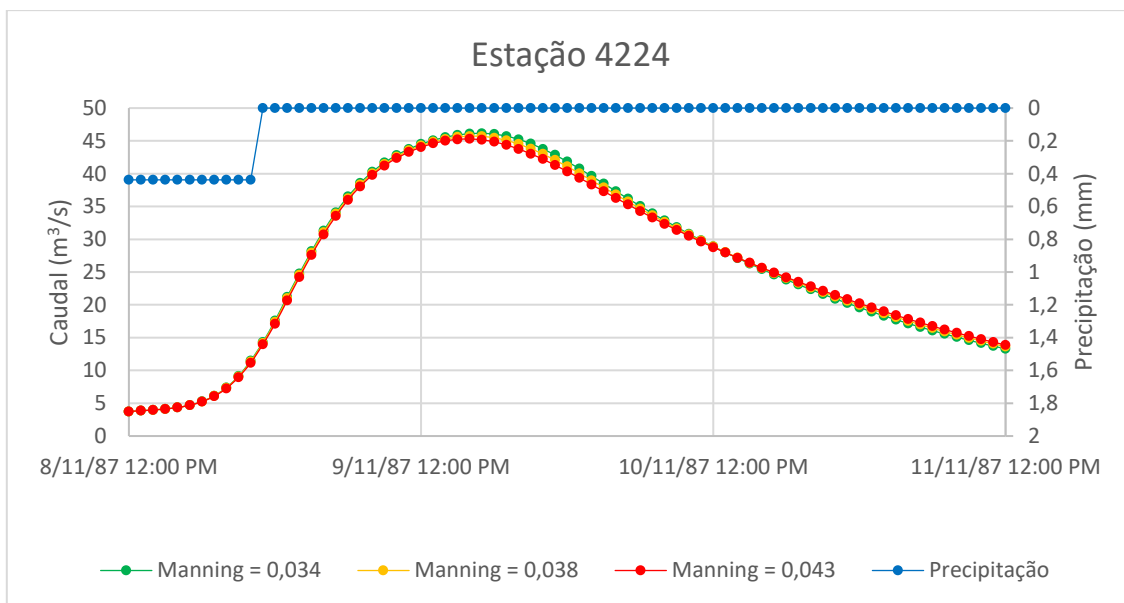


Figura 24- Caudais horários de escoamento para diferentes coeficientes de Manning na estação 4224.

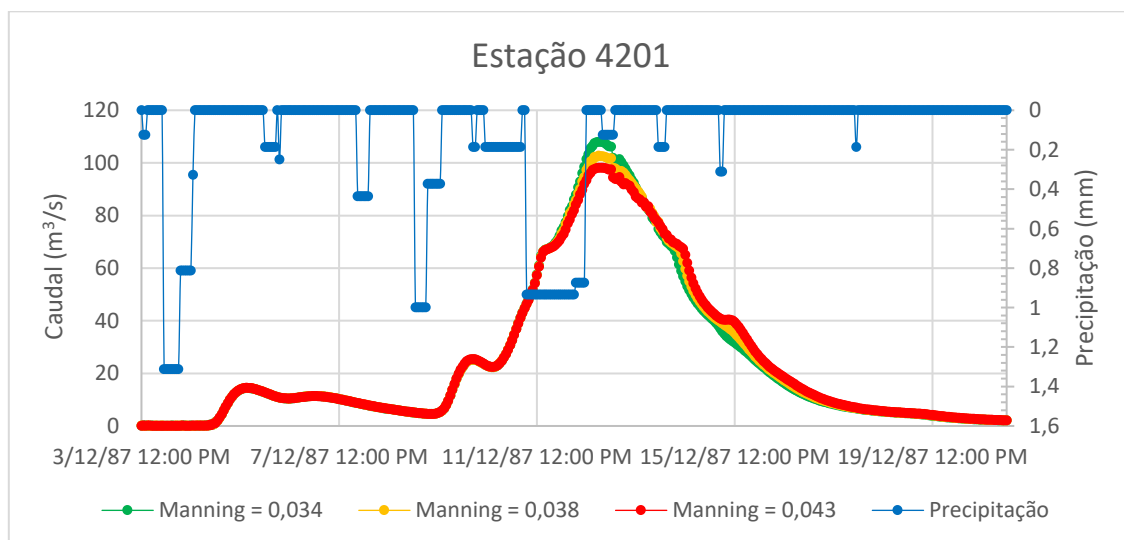


Figura 25 - Caudais horários de escoamento para diferentes coeficientes de Manning na estação 4201.

A análise da figura 23, estação 4108, permite perceber qual o efeito que o coeficiente de Manning têm no escoamento. Entre as 00:00 h e as 19:00 h do dia 11 de outubro existiu precipitação horária, num total de 43,4 mm, o que provocou escoamento superficial e por consequência, o aumento do caudal na rede de drenagem. Observa-se que o aumento do coeficiente de Manning de  $0,034 \text{ s.m}^{-1/3}$  para  $0,038 \text{ s.m}^{-1/3}$  implica um aumento da resistência ao escoamento superficial e por consequência, o caudal na rede de drenagem registado na estação é inferior ao longo de todo o período com precipitação e nas primeiras horas após precipitação. Por fim, os caudais de todas as simulações acabam por estabilizar com os mesmos valores, quando o efeito do escoamento superficial se torna negligenciável.

Na figura 24, estação 4224, verifica-se a mesma situação da figura 21. Existe um período de tempo com precipitação que vai influenciar o caudal do rio após algumas horas. O caudal das diferentes simulações é bastante semelhante até às 14:00 h do dia 9 de novembro, onde o efeito da resistência na superfície ao escoamento começa a ser verificado. A simulação com o coeficiente de Manning de

0,034 s.m<sup>-1/3</sup> apresenta um caudal superior às outras simulações entre as 14:00 h do dia 9 de novembro e as 12:00 h do dia 10 de novembro e a partir desta data o seu caudal passa a ser inferior ao das outras simulações. Esta mudança nos caudais acontece porque um coeficiente de Manning inferior implica maior velocidade de escoamento de água superficial para o mesmo volume de água precipitado, e passadas 28 h desde a última precipitação, o volume de água precipitada na área de drenagem da estação já se encontra a jusante desta e é superior na simulação do Manning de 0,034 s.m<sup>-1/3</sup>.

Na figura 25 está representado o caudal na estação 4201 com diferentes coeficientes de Manning verificando-se os mesmos fenómenos nas duas figuras anteriores. Na simulação com um coeficiente de Manning menor, o caudal máximo atingido após um período de precipitação intensa é superior as outras simulações e durante as primeiras horas após o caudal máximo ser atingido esta configuração do coeficiente de Manning continua a apresentar caudais superiores até que chega ao ponto de viragem e o caudal fica inferior ao das outras simulações. Verifica-se também que em todos os períodos de tempo em que existe precipitação com intensidade suficiente para alterar o caudal na rede de drenagem, existe um período de tempo considerável entre os 2 acontecimentos. No dia 3 de dezembro de 1997 às 23:00 h, começa a precipitar 1,3125 mm de água por hora durante 8 horas, seguido de 7 horas com precipitação, totalizando 15,7 mm de precipitação. O caudal de água existente antes e durante o período de precipitação é sempre inferior a 0,15 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> e apenas passadas 24 h do início da precipitação, às 23:00 h do dia 5 de dezembro é observável um aumento no caudal (atinge os 0,9 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) e atinge um máximo no dia 5 de dezembro as 16:00 h, caudal de 14,4 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Na madrugada de dia 9 de dezembro existe um novo período de precipitação, num total de 8,6 mm de água que só começa a influenciar o caudal passadas 12h.

#### 4.1.4 Coeficiente de cultura vegetal

O quarto parâmetro analisado é o coeficiente ( $K_c$ ) da vegetação, utilizado como um fator multiplicativo na vegetação de referência para simular uma cultura vegetal específica. É utilizado no cálculo da evapotranspiração, permitindo retirar água do solo e utilizá-la no crescimento de plantas. Selecionou-se o ( $K_c$ ) correspondente ao uso de solo agrícola, tendo sido aplicado os valores de 0,7; 0,96 e 1,2. As estações 4201, 4224 e 4108 foram selecionadas para a análise deste parâmetro, como pode ser observado nas figuras 26, 27 e 28.

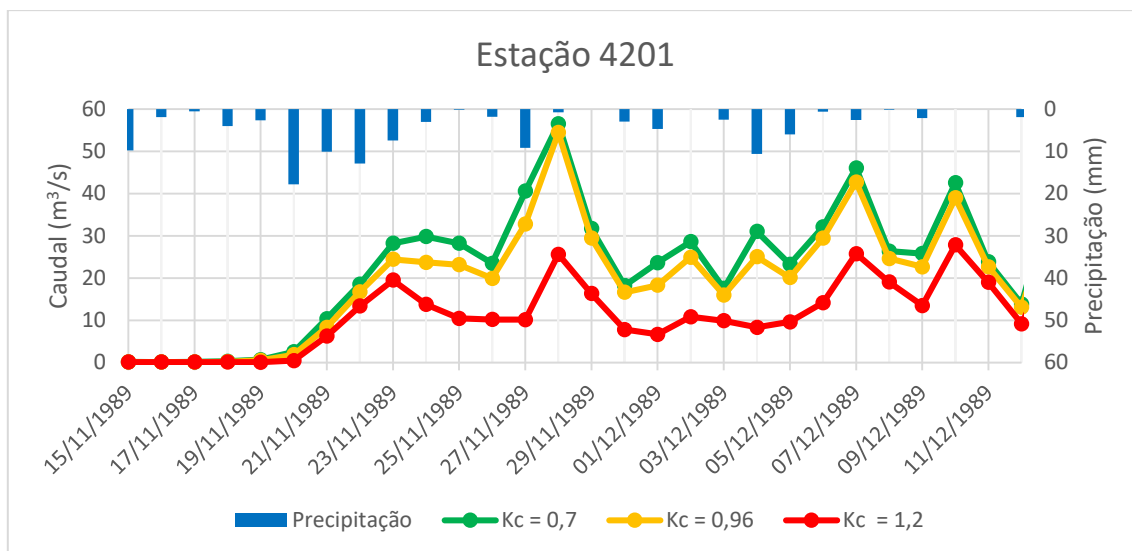


Figura 26 - Caudais diários de escoamento para diferentes coeficientes de vegetação ( $K_c$ ) na estação 4201.

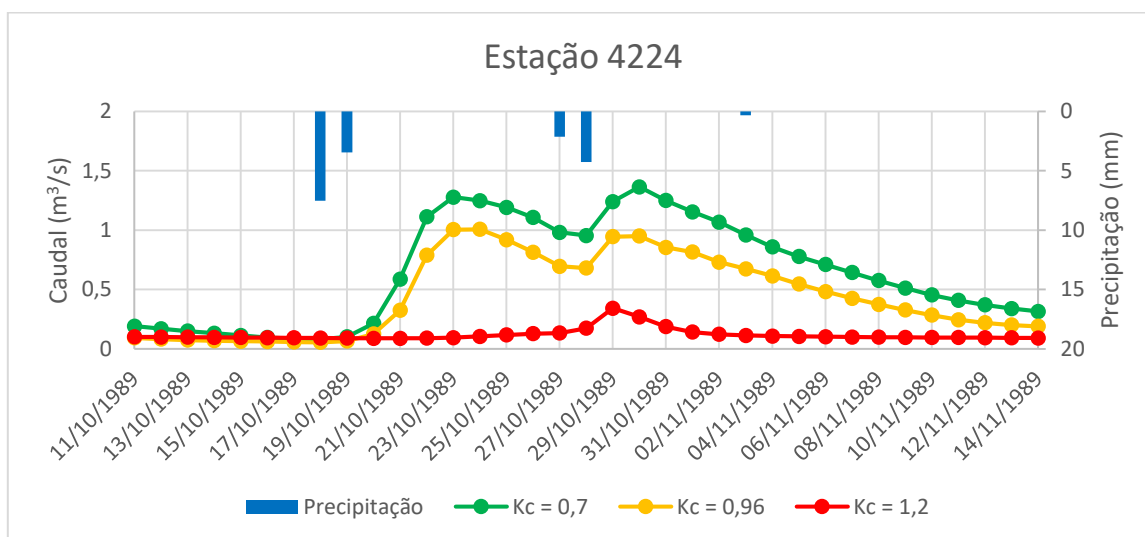


Figura 27 - Caudais diários de escoamento para diferentes coeficientes de vegetação ( $K_c$ ) na estação 4224.

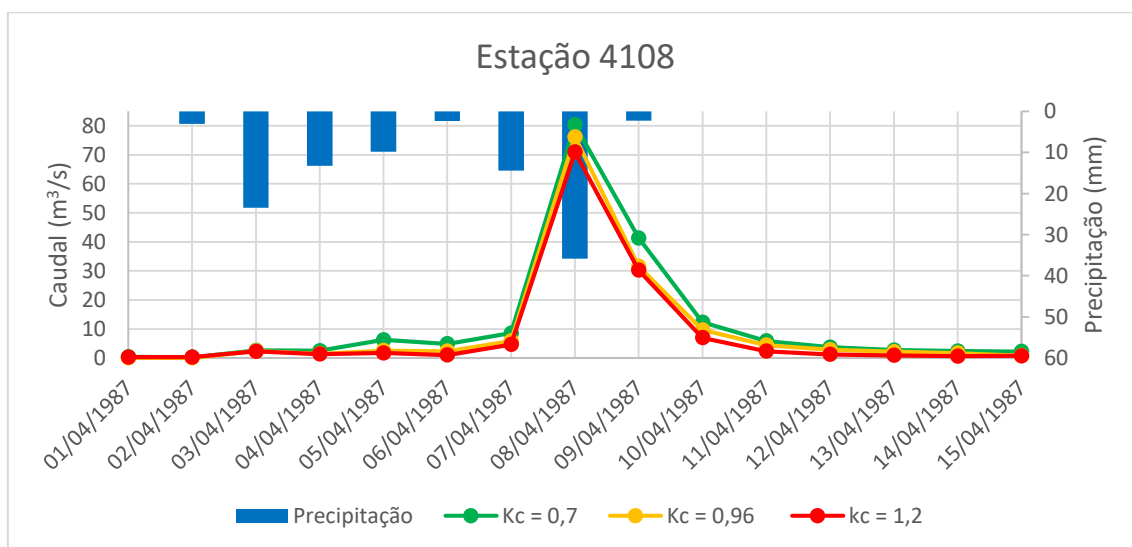


Figura 28 - Caudais diários de escoamento para diferentes coeficientes de vegetação ( $K_c$ ) na estação 4108.

Da análise da figura 26 verifica-se que o aumento do ( $K_c$ ) implica um menor caudal na rede de drenagem. O aumento do ( $K_c$ ) vem associado a um volume e massa superiores na espécie vegetal, que utiliza uma quantidade superior de água nas suas atividades, acabando por remover água do solo a uma taxa superior e permitindo que quando ocorre precipitação exista uma maior infiltração no solo.

Na figura 27, observa-se que no intervalo de tempo indicado, existiram apenas 5 dias onde ocorreu precipitação. O efeito da precipitação nos dias 18 e 19 de outubro no caudal da simulação com o ( $K_c$ ) de 1,2 foi impercetível não se verificando nenhuma mudança visível no caudal. A precipitação que ocorre nos dias 27 e 28 de outubro é inferior à precipitação dos dias 18 e 19, mas acaba por apresentar influência no caudal, porque o nível de saturação de água no solo é elevado o suficiente para que a precipitação de 27 e 28 de outubro seja convertida maioritariamente em escoamento superficial.

Na figura 28, a precipitação que ocorre entre os dias 3 e 7 de abril aumenta o caudal em todas as simulações para valores superiores a  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  no dia 7 de abril. A precipitação que ocorre nos dias 7 e 8 de abril, um total de 50.23 mm, faz os caudais aumentarem para valores a rondarem os  $75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Observa-se que a diferença de caudais das simulações no dia 8 de abril e a diferença de caudais para o dia 9 de abril se encontram na mesma ordem de grandeza, pelo que se verifica que em situações de precipitação intensa quando o solo se encontra saturado de água, o efeito do ( $K_c$ ) da vegetação é baixo.

#### 4.1.5 Condutividade de saturação do solo

O quarto parâmetro a ser observado é o ( $K_s$ ) do solo. Este parâmetro corresponde à condutividade saturada no solo, isto é, a velocidade de escoamento vertical que pode ocorrer num solo até chegar à saturação. Foram escolhidas as estações 4224, 4201 e 4004 por apresentarem nas suas áreas de drenagem maioritariamente o tipo de solo regossolo. As velocidades de escoamento selecionadas na análise deste parâmetro foram de 40, 69 e 120  $\text{cm} \cdot \text{dia}^{-1}$ , estando representado os caudais mensais simulados nas figuras 29, 30 e 31.

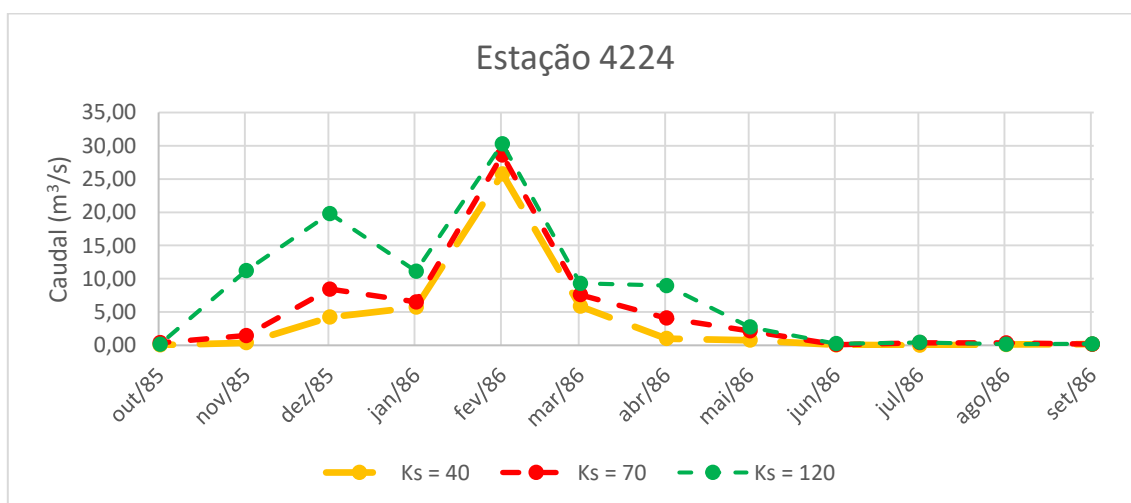


Figura 29 -Caudais mensais de escoamento para diferentes condutividades saturadas ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) do solo na estação 4224.



Na figura 29 verifica-se que o caudal existente na rede de drenagem junto à estação 4004 é diferente em todas as simulações ao longo dos vários meses do ano. O aumento do ( $K_s$ ) na simulação vai implicar um caudal superior no mesmo período de tempo na rede de drenagem. O aumento do caudal na rede de drenagem acontece porque após a precipitação, o aumento da infiltração da água no solo vai aumentar o nível de cota do nível freático no solo (zona saturada do solo). Quando um solo se encontra saturado de água, a água precipitada não se consegue infiltrar no solo e acaba por ocorrer apenas escoamento superficial.

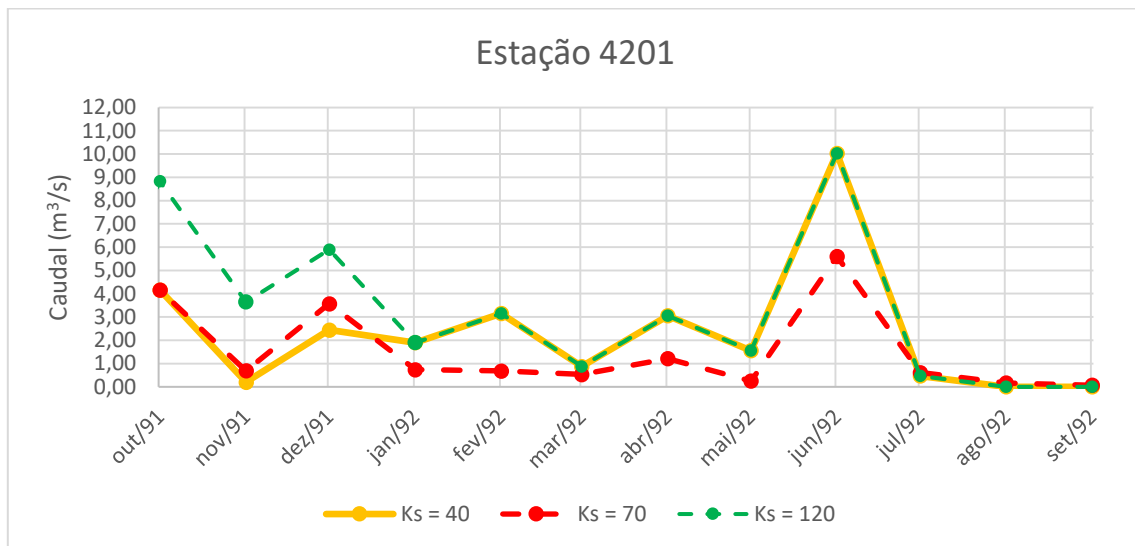


Figura 30 - Caudais mensais de escoamento para diferentes condutividades saturadas ( $m.s^{-1}$ ) do solo na estação 4201.

Na figura 30 observa-se que nos primeiros meses do ano hidrológico o caudal registado para cada simulação é diferente, estando a simulação com o ( $K_s$ ) superior a apresentar caudais superiores. No período de tempo entre janeiro e julho de 1992 na estação 4201, verifica-se que o caudal mensal das simulações com menor e maior ( $K_s$ ) passa a ser igual. Isto acontece porque a condutividade saturada na simulação com ( $K_s$ ) de  $45 m.s^{-1}$  é baixa e as camadas superficiais do solo acabam por ficar saturadas, sem aumentar o nível freático, acabando por ocorrer quase exclusivamente escoamento superficial quando existe precipitação. No caso da simulação com condutividade saturada de  $70 m.s^{-1}$ , a condutividade saturada é elevada o suficiente para não existir saturação apenas nas camadas superficiais do solo existindo infiltração de água no solo e escoamento superficial.

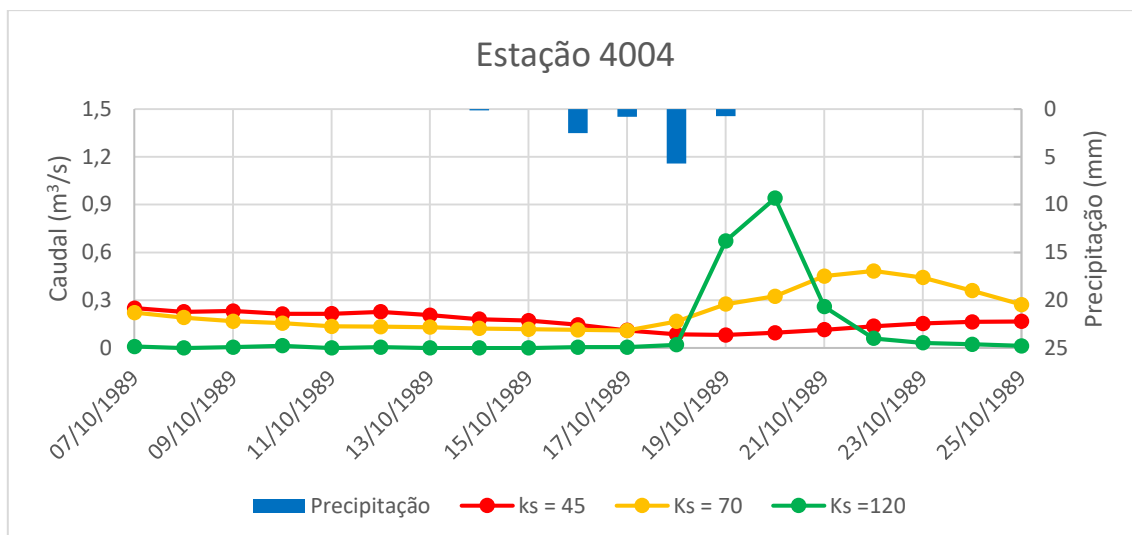


Figura 31 – Caudais diários de escoamento para diferentes condutividades saturadas ( $m.s^{-1}$ ) do solo na estação 4004

Na figura 31 observa-se o caudal escoado na estação 4004. Entre os dias 7 e 19 de outubro a simulação com o ( $K_s$ ) de  $120 m.s^{-1}$  apresenta o caudal mais baixo. Neste período de tempo o solo nesta simulação encontra-se longe de estar saturado e o nível freático está baixo. No caso das outras simulações, por apresentarem um ( $K_s$ ) inferior, a quantidade de água armazenada no solo e o nível freático são superiores comparativamente com a simulação de ( $K_s$ )  $120 m.s^{-1}$ , existindo uma quantidade de água superior em equilíbrio com a rede de drenagem. Quando ocorre precipitação, na simulação de ( $K_s$ )  $120 m.s^{-1}$ , a infiltração da água no solo ocorre com maior rapidez, acabando por aumentar o nível freático, levando a que o aumento do caudal na rede de drenagem seja mais acentuado e o caudal máximo ocorra antes das outras simulações, com valores de caudal superior. A simulação com ( $K_s$ ) de  $45 m.s^{-1}$ , acaba por ser pouco influenciada, porque a velocidade de infiltração de água no solo é baixa, não provocando alterações significativas no nível freático.

#### 4.1.6 Condutividade horizontal do solo

O último parâmetro a ser analisado é ( $K_h$ ), o fator de condutividade horizontal. O uso das equações para o escoamento vertical multiplicado por este coeficiente permite o cálculo do escoamento que ocorre horizontalmente dentro da camada de solo. As estações hidrométricas selecionadas para analisar este parâmetro foram a 4004, 4201 e 4224, por apresentarem o mesmo tipo de solo nas suas áreas de drenagem, regossolo. Os valores de ( $K_h$ ) utilizados foram de 1, 3 e 10, encontrando-se os resultados das 3 simulações nas diferentes estações nas figuras 32, 33 e 34.

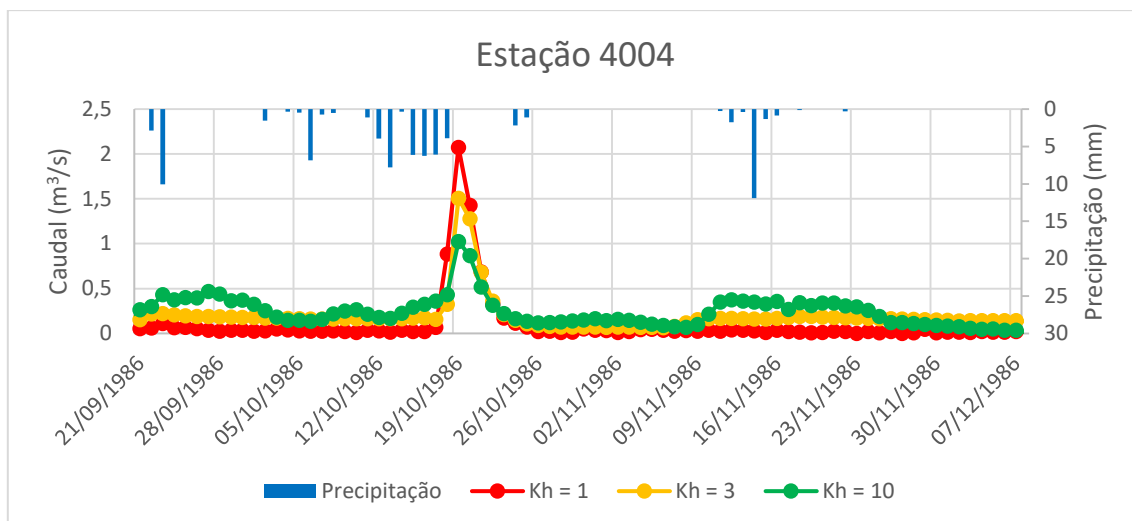


Figura 32 - Caudal diário de escoamento na rede de drenagem para diferentes fatores de condutividade horizontal na estação 4004.

Na figura 32 observa-se o efeito do ( $Kh$ ) no caudal na rede de drenagem junto a estação 4004. Nos dias 22 e 23 ocorreu precipitação e a simulação com o ( $Kh$ ) de 10 apresenta o caudal superior ao das outras simulações porque a sua velocidade horizontal é superior, o que permite que a água que circula no solo chegue à rede de drenagem mais rapidamente e por sua vez aumente o caudal. Quando ocorre um período sem precipitação, como se verifica após o dia 22 de novembro, o caudal da simulação com o ( $Kh$ ) de 10 é superior ao das outras simulações e com o passar do tempo este vai diminuir para valores do caudal com o ( $Kh$ ) de 1.

Quando ocorre precipitação diária ao longo de uma semana, como é observado entre os dias 12 e 18 de outubro, o aumento do ( $Kh$ ) implica um escoamento na rede de drenagem superior durante este período de tempo. Como o caudal de água na rede de drenagem neste período de tempo na simulação com o ( $Kh$ ) de 10 é superior, quando ocorre um pico de cheia, este vai apresentar caudais inferiores às outras simulações, como se pode observar entre os dias 19 e 21 de outubro, porque parte da água precipitada anteriormente já foi escoada previamente.

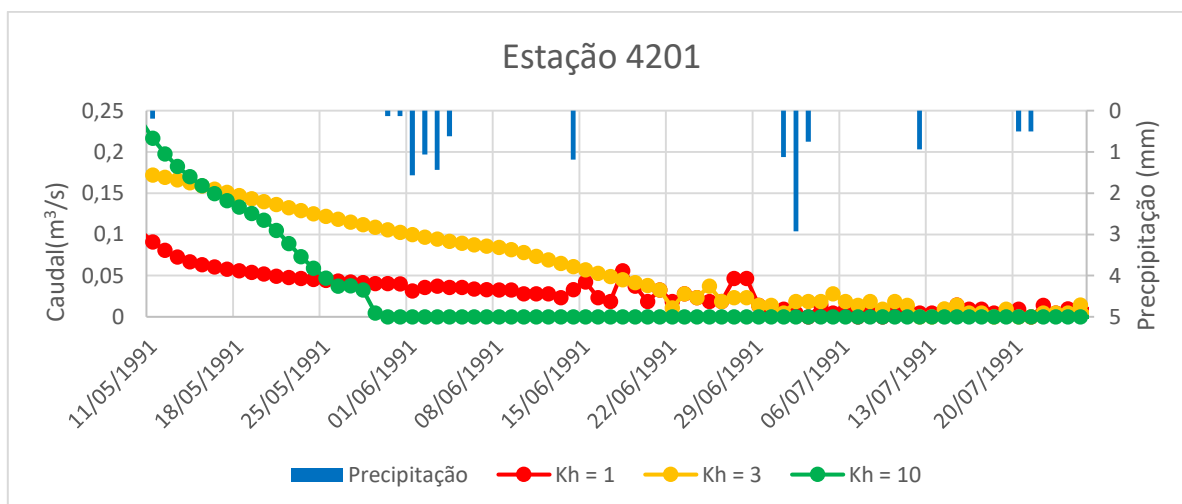


Figura 33 - Caudal diário de escoamento na rede de drenagem para diferentes fatores de condutividade horizontal na estação 4201.

Na figura 33, observa-se o caudal registado na estação 4201, num período de tempo com baixa precipitação. Entre os dias 11 de maio e 25 de julho de 1991 (num total de 75 dias) existiram apenas 14 dias com precipitação sempre com valores inferiores a 1,5 mm de água diários. A simulação com o ( $Kh$ ) de 10 atinge o caudal nulo no dia 30 de maio, o que implica um solo com baixa humidade e o nível freático abaixo do nível topográfico da rede de drenagem, mantendo-se com este caudal no resto do período de tempo observado. As simulações com o ( $Kh$ ) de 1 e de 3 apresentam também caudais a diminuir ao longo do tempo, mas com declive inferior à simulação do ( $Kh$ ) de 10 porque ao terem um escoamento horizontal inferior, a quantidade de água a chegar a rede de drenagem é inferior, levando a caudais inferiores. Devido a baixa quantidade de água existe no solo também nestas simulações, o efeito da precipitação existente entre os dias 30 de maio e 4 de junho é mínimo alterando apenas ligeiramente o declive do caudal.

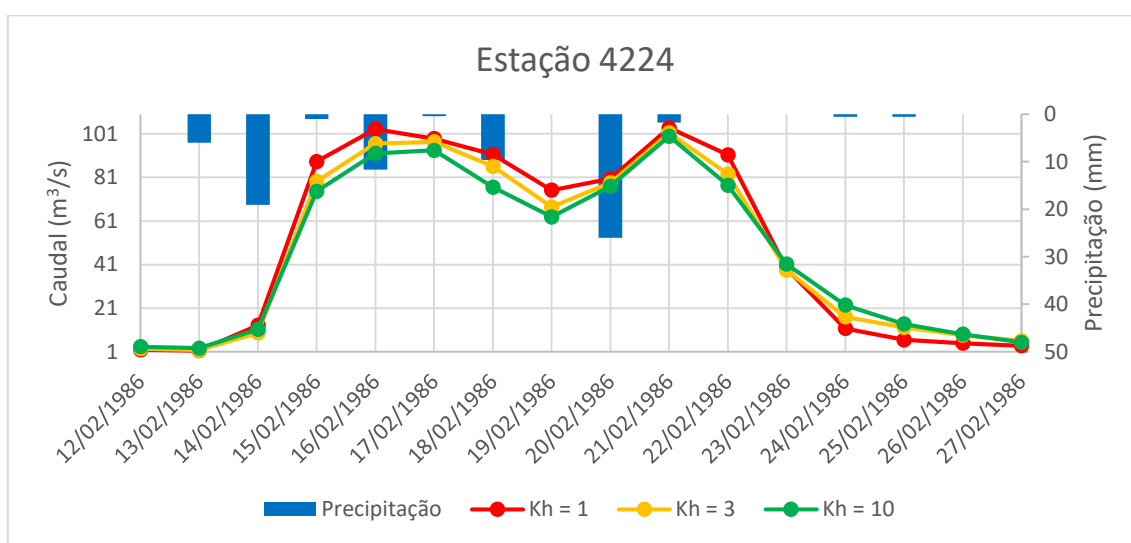


Figura 34 - Caudal diário de escoamento na rede de drenagem para diferentes fatores de condutividade horizontal na estação 4224.

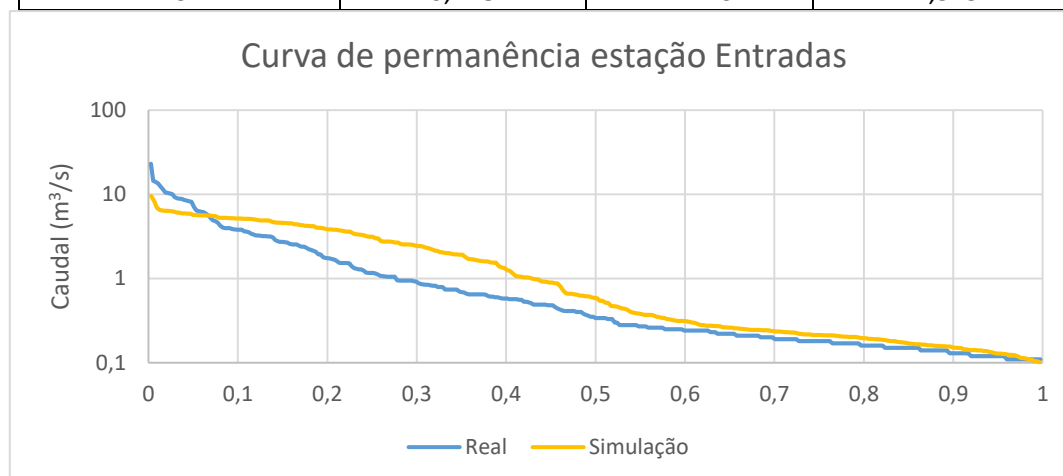
Na figura 34 está indicado o comportamento do caudal na rede de drenagem na estação 4224 durante o período de tempo compreendido entre os dias 12 e 27 de fevereiro de 1986. A precipitação que ocorre na área de drenagem da estação 4224 até ao dia 14 de fevereiro faz o caudal diário aumentar de  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  para valores na ordem dos  $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  no dia 15 de fevereiro. A simulação com o ( $Kh$ ) de 10 apresenta caudais inferiores ao das outras simulações entre os dias 15 e 22 de fevereiro, mas na mesma ordem de grandeza, o que implica que a maior parte da precipitação ocorrida na área de drenagem não se infiltrou no solo e foi escoada superficialmente até a rede de drenagem. Após o caudal diário diminuir significativamente no dia 23 de fevereiro, nos dias seguintes, a simulação com o ( $Kh$ ) de 10 apresenta o maior caudal diário, porque encontrando-se o solo com elevada humidade, a existência de maior velocidade de escoamento de água no solo, vai transferir mais água para a rede de drenagem.

## 4.2 Calibração

Após verificar os efeitos dos principais parâmetros implementados no modelo, procedeu-se à sua calibração no período compreendido entre 1985 e 1995. A calibração do modelo é realizada através da análise dos parâmetros estatísticos e pela comparação da curva de permanência das estações hidrométricas com o seu correspondente no modelo, em escala mensal. Os resultados quantitativos dos parâmetros estatísticos das estações 4004, 4212, 4255, 4214, Amieira, Entradas, Monte dos Fortes e Pulo de Lobo encontram-se descritos neste capítulo, estando os valores obtidos pelas restantes estações presentes nos anexos A e B e a parametrização final utilizada no modelo nos anexos K e I. As figuras 43, 44, 45 e 46 apresentam os resultados qualitativos obtidos em todas as estações hidrométricas implementadas no modelo com a sua localização espacial.

*Tabela 7 – Parâmetros estatísticos na estação Entradas no período de calibração. Estação sem influência de albufeiras em território português.*

| Estação                |       | Entradas       |        |
|------------------------|-------|----------------|--------|
| Nº de anos com registo | 10,00 | R <sup>2</sup> | 0,787  |
| Caudal médio registado | 0,151 | RMSE           | 0,263  |
| Caudal médio simulado  | 0,158 | NRMSE          | 0,043  |
| NSE                    | 0,778 | PBIAS          | -4,519 |



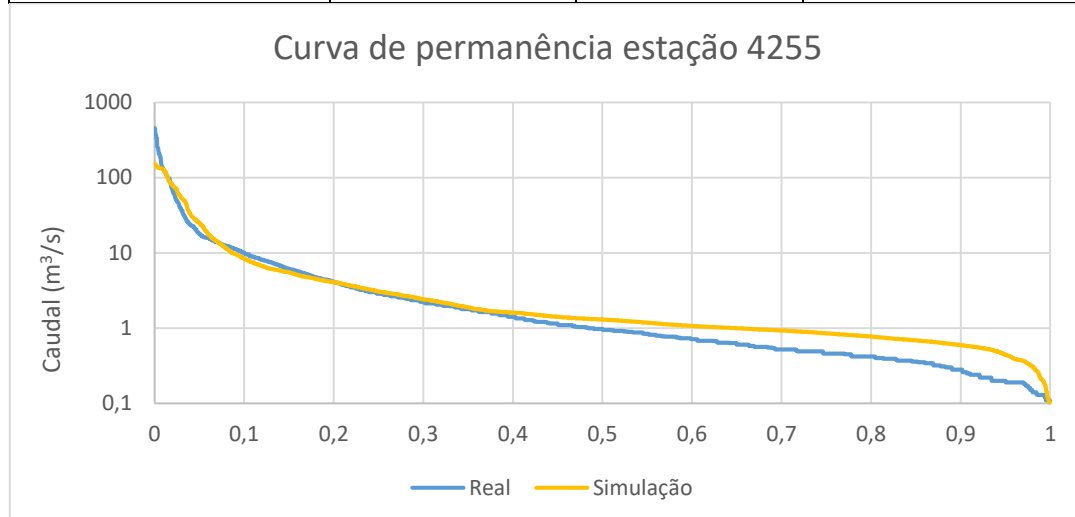
*Figura 35 – Curva de permanência da estação hidrográfica Entradas no período de calibração. Estação sem influência de albufeiras em território português.*

Ao observar a curva de permanência da estação hidrométrica de Entradas (Figura 35), verifica-se que estamos perante um troço da rede de drenagem de baixo caudal, com uma frequência de excedência de 27% para caudais superiores a  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e de 2% para caudais superiores a  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Na curva de permanência da simulação na estação de Entradas verifica-se que não foram registados caudais superiores a  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e que os caudais superiores a  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ocorrem com uma frequência de excedência de 42%, valor bastante superior ao registado na estação hidrométrica. Relativamente ao comportamento das curvas para as frequências de excedência com caudais inferiores a  $0,311 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , ambas apresentam para cada uma das frequências a mesma tendência e valores semelhantes. Os caudais médios mensais para a estação hidrométrica e para a simulação no período de calibração são bastante semelhantes, com os valores de  $0,151 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $0,158 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  respetivamente. Na análise dos

parâmetros estatísticos (Tabela 7) verifica-se que em escala mensal, todos os resultados estatísticos obtidos são bons. O NRMSE obtido foi de 0,043, o que indica que o modelo apresenta uma boa precisão, existindo pouca variância entre a simulação e os registos da estação hidrométrica. O NSE obtido (0,778) foi superior a 0,75 e o corrobora com o NRMSE, porque indica que a magnitude da variância residual entre é baixa. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido foi de 0,787 e traduz-se numa boa aproximação do modelo em relação a variância dos dados da estação hidrométrica. Relativamente ao PBIAS, foi obtido o valor de -4,519%, o que corresponde a uma baixa sobrestimação do caudal.

*Tabela 8 - Parâmetros estatísticos na estação 4255 no período de calibração. Estação sem influência de albufeiras em território espanhol.*

| Estação                |       | 4255  |        |
|------------------------|-------|-------|--------|
| Nº de anos com registo | 8,8   | $R^2$ | 0,820  |
| Caudal médio registado | 5,660 | RMSE  | 7,167  |
| Caudal médio simulado  | 6,172 | NRMSE | 0,041  |
| NSE                    | 0,809 | PBIAS | -9,033 |



*Figura 36 - Curva de permanência da estação hidrográfica 4255 no período de calibração. Estação sem influência de albufeiras em território espanhol.*

Na estação 4255 observa-se que as curvas de permanência (Figura 36) para as frequências de excedência até 40% são qualitativamente muito semelhantes com exceção para caudais com probabilidade de excedência de 1%. Nas restantes frequências de excedência, a simulação apresenta caudais superiores à estação hidrométrica, com a simulação a registar um caudal de  $0,57 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e a estação hidrométrica com caudal de  $0,26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  para uma frequência de excedência de 90%. O caudal médio mensal é superior na simulação,  $6.172 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , relativamente a estação hidrométrica,  $5,660 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . A análise dos parâmetros estatísticos da estação 4255 (Tabela 8) indicam uma boa aproximação no caudal obtido pelo modelo, com um NRMSE de 0,041, um NSE de 0,809, um  $R^2$  de 0,820 e um PBIAS de -9.03%, uma sobrestimação de caudal.

Tabela 9 - Parâmetros estatísticos na estação Amieira no período de calibração. Estação sem influência de albufeira em território português.

| Estação                |       | Amieira        |       |
|------------------------|-------|----------------|-------|
| Nº de anos com registo | 8,9   | R <sup>2</sup> | 0,868 |
| Caudal médio registado | 4,287 | RMSE           | 8,713 |
| Caudal médio simulado  | 4,005 | NRMSE          | 0,053 |
| NSE                    | 0,707 | PBIAS          | 6,584 |

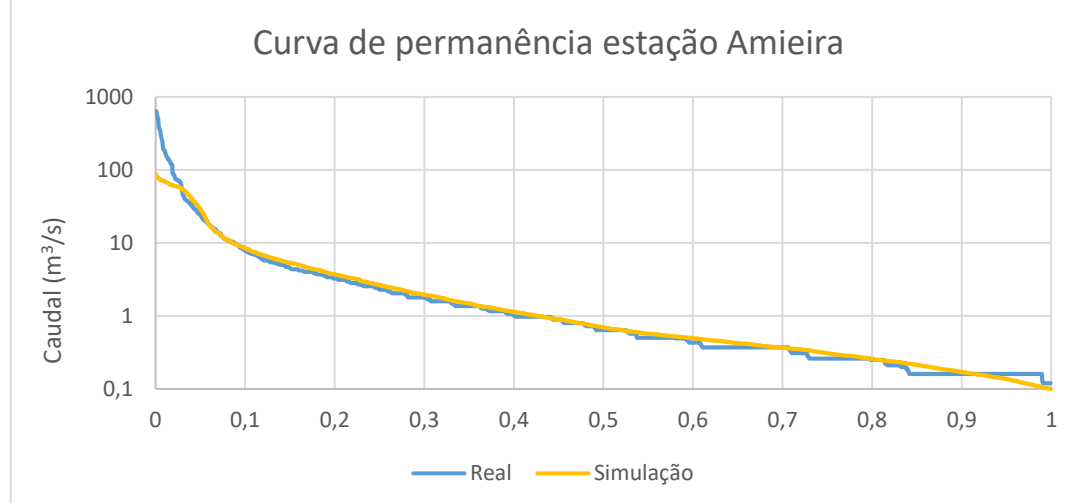


Figura 37 - Curva de permanência da estação hidrográfica Amieira no período de calibração. Estação sem influência de albufeiras em território português.

Na figura da curva de permanência da estação da Amieira (Figura 37) verifica-se a mesma tendência e valores semelhantes em ambas as curvas, com exceção para as frequências de excedências inferiores 4%. No intervalo das frequências inferiores a 4%, o caudal simulado é bastante inferior ao caudal da estação hidrométrica atingindo o valor de 85,971 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> na simulação comparativamente com o valor de 637,81 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> no caudal da menor frequência registada. No restante intervalo de frequências, principalmente para as frequências de excedência superiores a 60%, o caudal da estação hidrométrica apresenta os valores em patamares, o que poderá estar associado a algum erro de medição. Relativamente aos parâmetros estatísticos na estação da Amieira (Tabela 9), a exceção do NSE (0,706) que é considerado aceitável todos os parâmetros apresentam valores bons, com um R<sup>2</sup> de 0,868, um NRMSE de 0,052 e um PBIAS de 6,584 que indica uma subestimação do caudal.

Tabela 10 – Parâmetros estatísticos na estação 4212 no período de calibração. Estação sem influência de albufeiras em território espanhol.

| Estação                |       | 4212  |         |
|------------------------|-------|-------|---------|
| Nº de anos com registo | 5,5   | R2    | 0,800   |
| Caudal médio registado | 1,755 | RMSE  | 2,070   |
| Caudal médio simulado  | 2,307 | NRMSE | 0.057   |
| NSE                    | 0,785 | PBIAS | -31.463 |

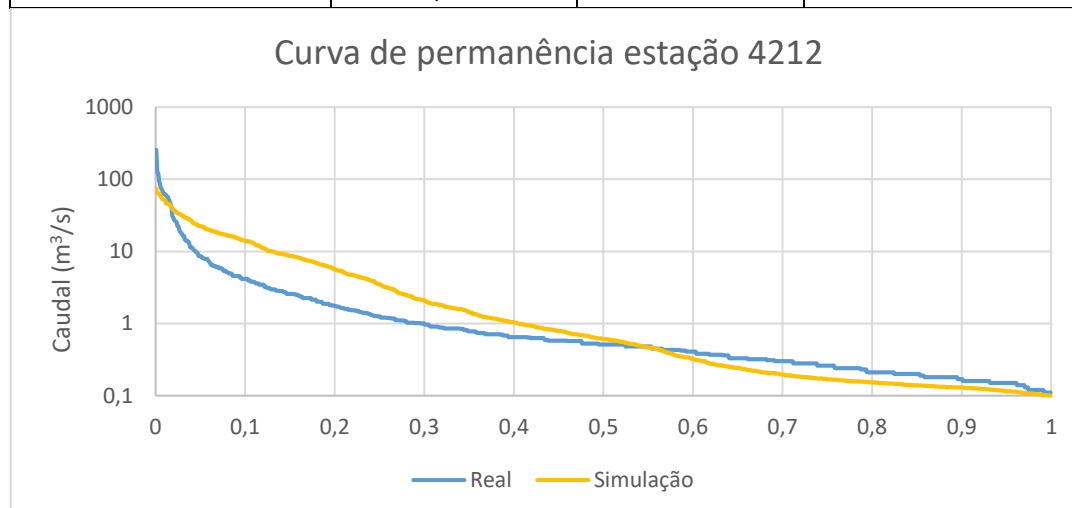


Figura 38 - Curva de permanência da estação hidrográfica 4212 no período de calibração. Estação sem influência de albufeiras em território espanhol.

Na curva de permanência da estação 4212 (Figura 38) verifica-se que para as diferentes frequências de excedência localizadas entre os 2% e os 54% a simulação apresenta caudais bastante superiores comparativamente com a estação hidrométrica, com caudais de  $5,41 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  e  $1,72 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  respetivamente na frequência de 20%. No intervalo de frequências de excedência entre os 54% e os 100%, a simulação apresenta caudais inferiores a registo da estação. O caudal médio mensal da estação 4212 (Tabela 10) é de  $1,755 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  na simulação de  $2,307 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Verifica-se que apesar de o modelo neste local apresentar uma boa precisão (NRMSE de 0,057 e NSE de 0,785) e uma boa explicação dos valores observados ( $R^2$  de 0,800), que o PBIAS obtido é de -31,463%, o que indica uma sobrestimação não aceitável no caudal, como era espectável pela diferença dos caudais médios mensais.



Tabela 11 - Parâmetros estatísticos na estação 4004 no período de calibração. Estação sem influência de albufeiras em território espanhol.

| Estação                |         | 4004  |         |
|------------------------|---------|-------|---------|
| Nº de anos com registo | 7,0     | R2    | 0,027   |
| Caudal médio registado | 0,720   | RMSE  | 2,517   |
| Caudal médio simulado  | 0,825   | NRMSE | 0,867   |
| NSE                    | -61,764 | PBIAS | -14,731 |

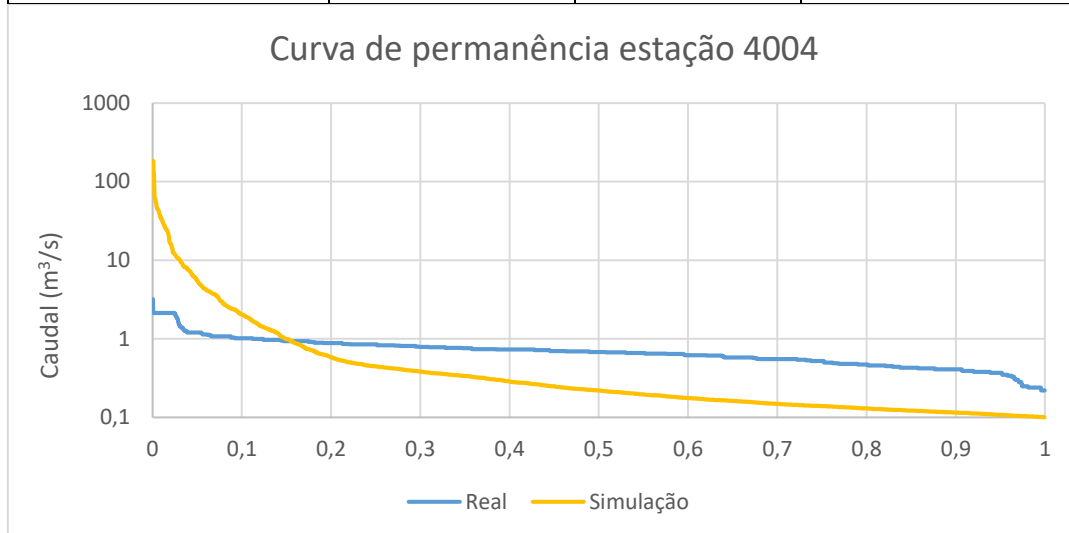


Figura 39 - Curva de permanência da estação hidrográfica 4004 no período de calibração. Estação sem influência de albufeiras em território espanhol.

A curva de permanência da simulação na estação 4004 (Figura 39) apresenta uma tendência e valores bastante diferentes da estação hidrométrica, com o caudal da menor frequência de excedência a atingir o valor de  $182,67 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , enquanto o valor registado é de  $3,18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . O caudal na estação hidrográfica é bastante baixo, tendo o valor de  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  para uma frequência de excedência de 10% e estável com uma baixa variação, apresentando um caudal de  $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  com uma frequência de 90%. Na simulação o caudal de  $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  corresponde a uma frequência de excedência de 28%. O caudal mensal médio da simulação é semelhante ao caudal da estação hidrográfica, com os valores de  $0,825 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $0,719 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  respetivamente como pode ser visto na Tabela 11. Apesar da semelhança, e com um PBIAS aceitável, -14,731%, os restantes parâmetros estatísticos não são aceitáveis, como era espectável pelas curvas de permanência bastante diferentes. O NRMSE é de 0,867, valor muito elevado indicando uma precisão muito baixa e o NSE de -61,430 indica amplitudes na variância dos caudais muito elevadas. A capacidade de o modelo explicar a variância dos caudais da estação hidrográfica é baixa, com um  $R^2$  de 0,020.

Tabela 12 - Parâmetros estatísticos na estação Ponte Algalé no período de calibração. Estação sem influência de albufeiras em território português.

| Estação                |       | Monte dos Fortes |       |
|------------------------|-------|------------------|-------|
| Nº de anos com registo | 9,0   | R2               | 0,845 |
| Caudal médio registado | 2,374 | RMSE             | 3,121 |
| Caudal médio simulado  | 1,313 | NRMSE            | 0,052 |
| NSE                    | 0,705 | PBIAS            | 44,69 |

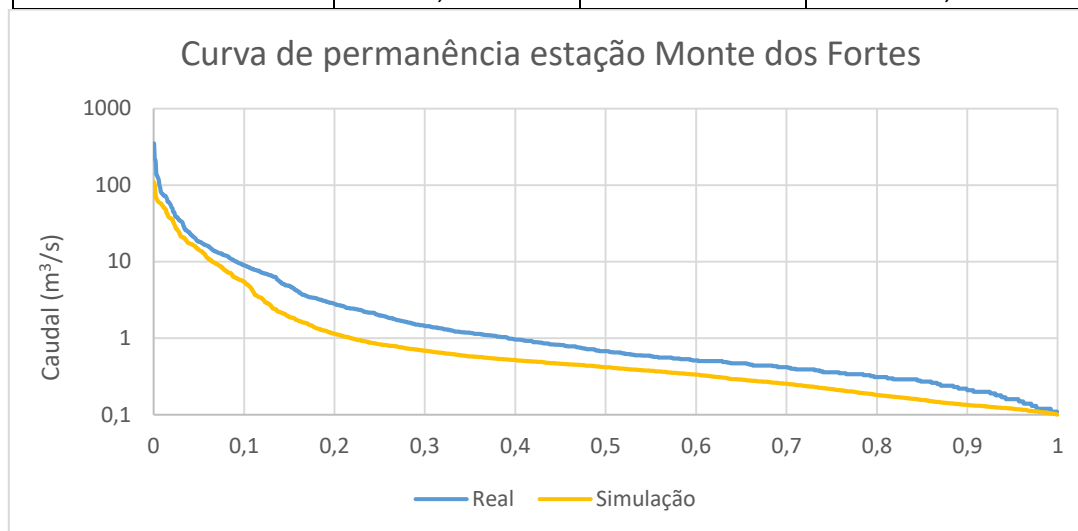


Figura 40 - Curva de permanência da estação hidrográfica Monte dos Fortes no período de calibração. Estação sem influência de albufeiras em território português.

Na estação Monte dos Fortes, figura 40, as curvas de permanência apresentam a mesma tendência, mas com valores diferentes. Para cada frequência de excedência, o caudal da simulação apresenta valores inferiores ao registo da estação hidrométrica. Na Tabela 12 o caudal mensal médio na estação é de  $2,374 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  e na simulação tem o valor de  $1,313 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Esta diferença é validada pelo PBIAS, que indica uma subestimação de 44,69%. O NRMSE apresenta o valor de 0,054, que é considerado bom, e, portanto, o modelo até apresenta alguma precisão, mas o NSE é de 0,705, o que implica que ampliação na variância dos caudais é apenas aceitável. O modelo tem boa capacidade de explicar a variância do caudal registado na rede de drenagem, com um  $R^2$  de 0,845.

Tabela 13 - Parâmetros estatísticos na estação 4214 no período de calibração. Estação com influência de albufeiras em território espanhol.

| Estação                |        | 4214  |          |
|------------------------|--------|-------|----------|
| Nº de anos com registo | 6,0    | R2    | 0,645    |
| Caudal médio registado | 1,490  | RMSE  | 6,034    |
| Caudal médio simulado  | 5,191  | NRMSE | 0,182    |
| NSE                    | -1,345 | PBIAS | -248,290 |

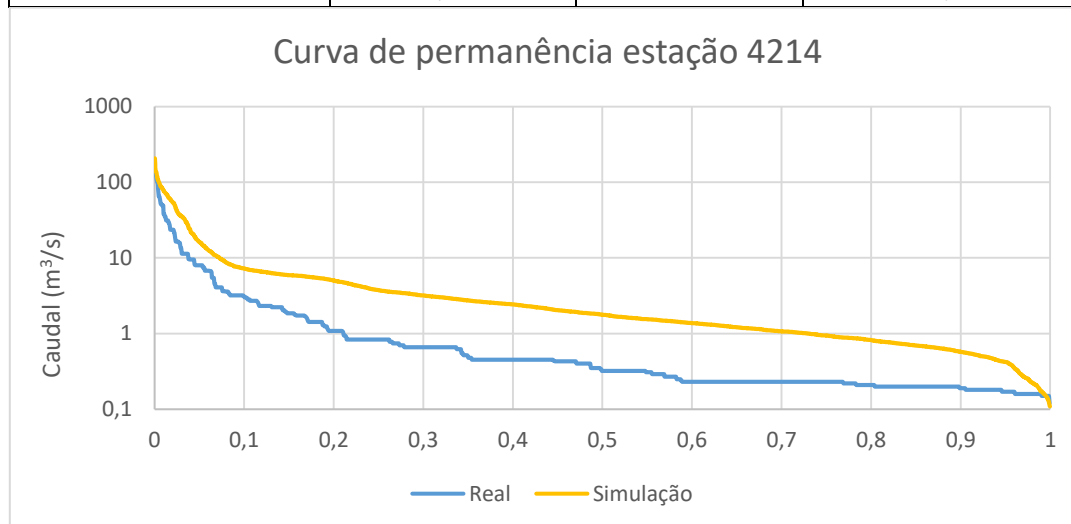


Figura 41 - Curva de permanência da estação hidrográfica 4214 no período de calibração. Estação com influência de albufeiras em território espanhol.

As curvas de permanência da estação 4214 (Figura 41) apresentam sensivelmente os mesmos declives, mas com caudais diferentes. Para qualquer frequência de excedência, o caudal na simulação é sempre superior ao registado na simulação. Ao observar o caudal mensal médio na Tabela 13 verifica-se que a simulação apresenta um caudal sensivelmente 3,5 vezes superior a estação hidrográfica,  $5,191 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $1,490 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  respetivamente. O PBIAS indica uma sobrestimação do caudal de 248,29%. O NRMSE ainda apresenta o valor de 0,182, considerado bom, mas o NSE não é aceitável, -1.346. O  $R^2$  é aceitável, com o valor de 0,646. A localização desta estação hidrométrica na rede de drenagem é influenciada por um albufeira, Torre de Abraham, que foi implementado desde o início da simulação.

Tabela 14 - Parâmetros estatísticos na estação Pulo do Lobo no período de calibração. Estação com influência de albufeiras em território português.

| Estação                |          | Pulo do Lobo |          |
|------------------------|----------|--------------|----------|
| Nº de anos com registo | 9,8      | R2           | 0,764    |
| Caudal médio registado | 58,679   | RMSE         | 1737,024 |
| Caudal médio simulado  | 1783,621 | NRMSE        | 0,988    |
| NSE                    | -114,293 | PBIAS        | -2939,62 |

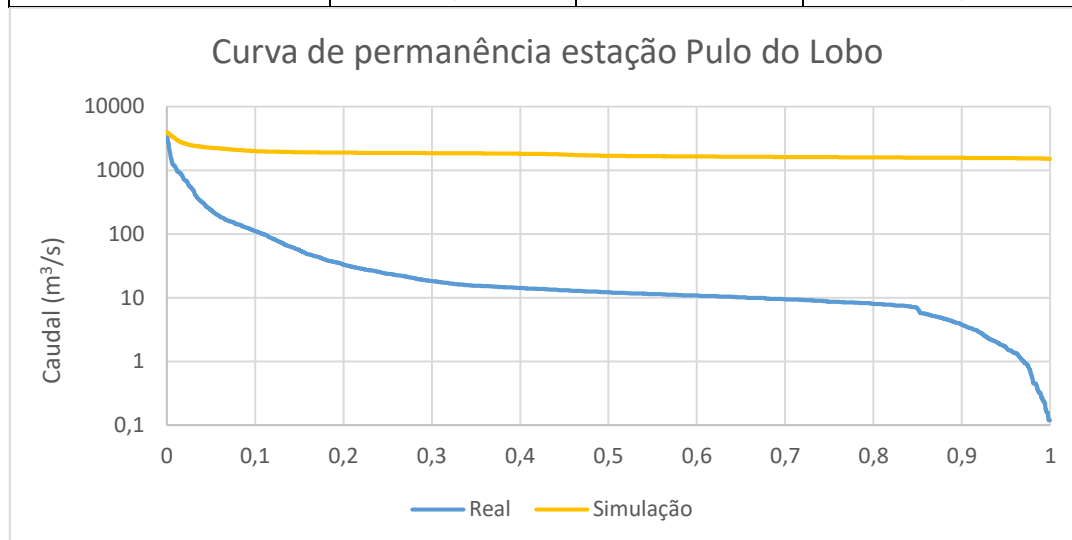


Figura 42 - Curva de permanência da estação hidrográfica Pulo do Lobo no período de calibração. Estação com influência de albufeiras em território português.

A estação hidrográfica de Pulo de Lobo (Figura 42), localizada a jusante de todos as albufeiras implementados no rio Guadiana apresenta curvas de permanência completamente distintas, com a simulação a indicar sempre um caudal superior a 1000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, enquanto que a estação apresenta um caudal de 12,17 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> para uma frequência de excedência de 50%. O caudal mensal médio é de 58,679 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> e o simulado de 1783,621 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Apesar de R<sup>2</sup> ser bom, com o valor de 0,764, os restantes parâmetros têm valores não aceitáveis. O NRMSE é de 0,988, o NSE de -114,293 e o PBIAS é de -2939,620%. O caudal simulado nesta estação não é representativo do caudal existente, indicando que os parâmetros e propriedades definidos nas imediações desta estação não são representativos da realidade.

A análise qualitativa dos vários parâmetros estatísticos em todas as estações hidrométricas implementadas na bacia estão representados nas próximas figuras. Na figura 43 é representado o NSE e na figura 44 o R<sup>2</sup>. O RMSE encontra-se na figura 45 e o PBIAS na figura 46. A classificação qualitativa é realizada pelo intervalo de valores definidos no capítulo 4.3 para cada tipo de parâmetro.

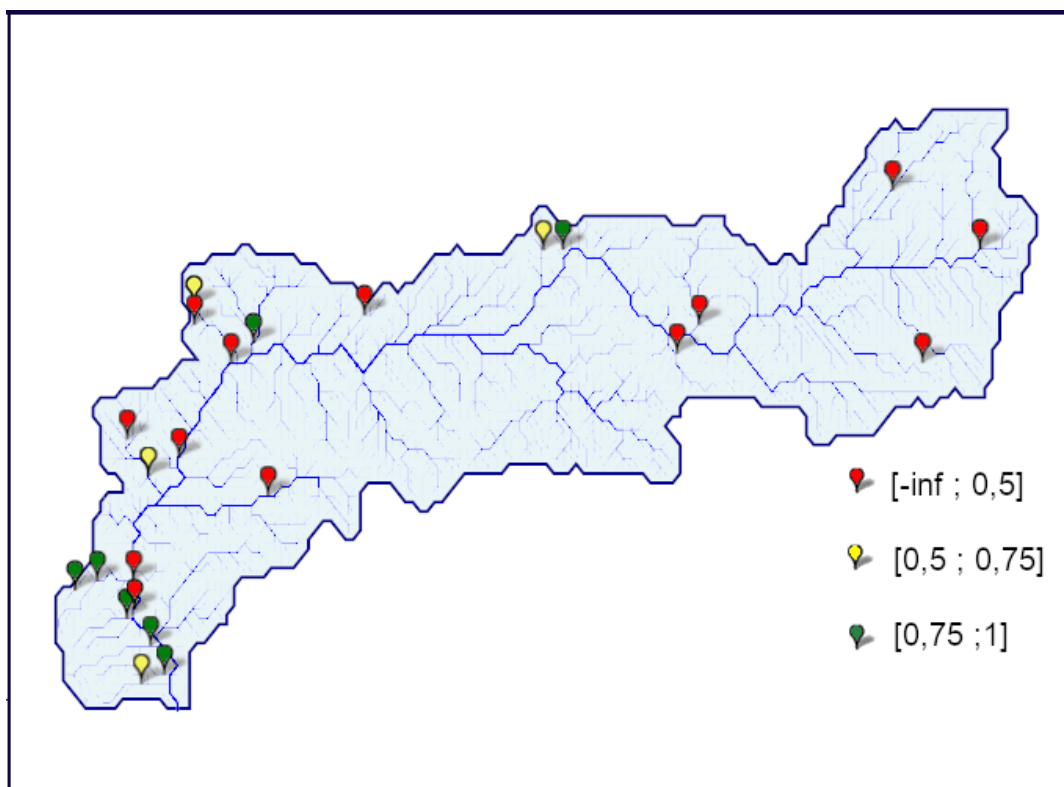


Figura 43 - Resultados obtidos na calibração das diferentes estações hidrométricas para o parâmetro NSE.

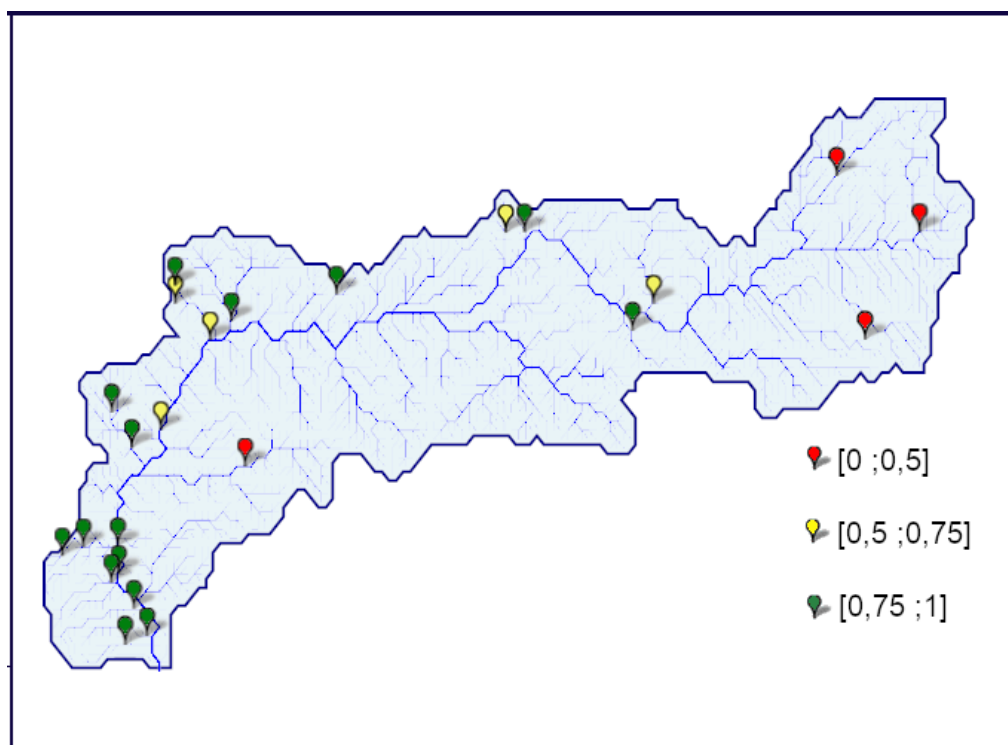


Figura 44 - Resultados obtidos na calibração das diferentes estações hidrométricas para o parâmetro  $R^2$ .

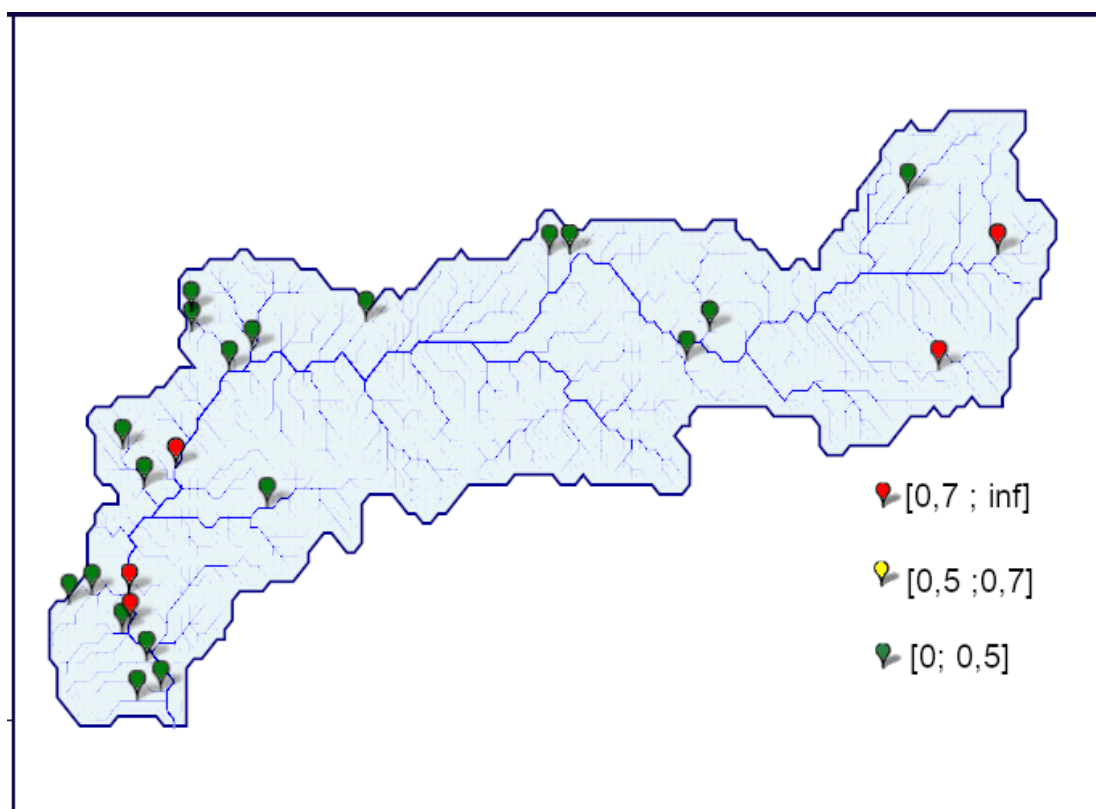


Figura 45 - Resultados obtidos na calibração das diferentes estações hidrométricas para o parâmetro NRMSE.

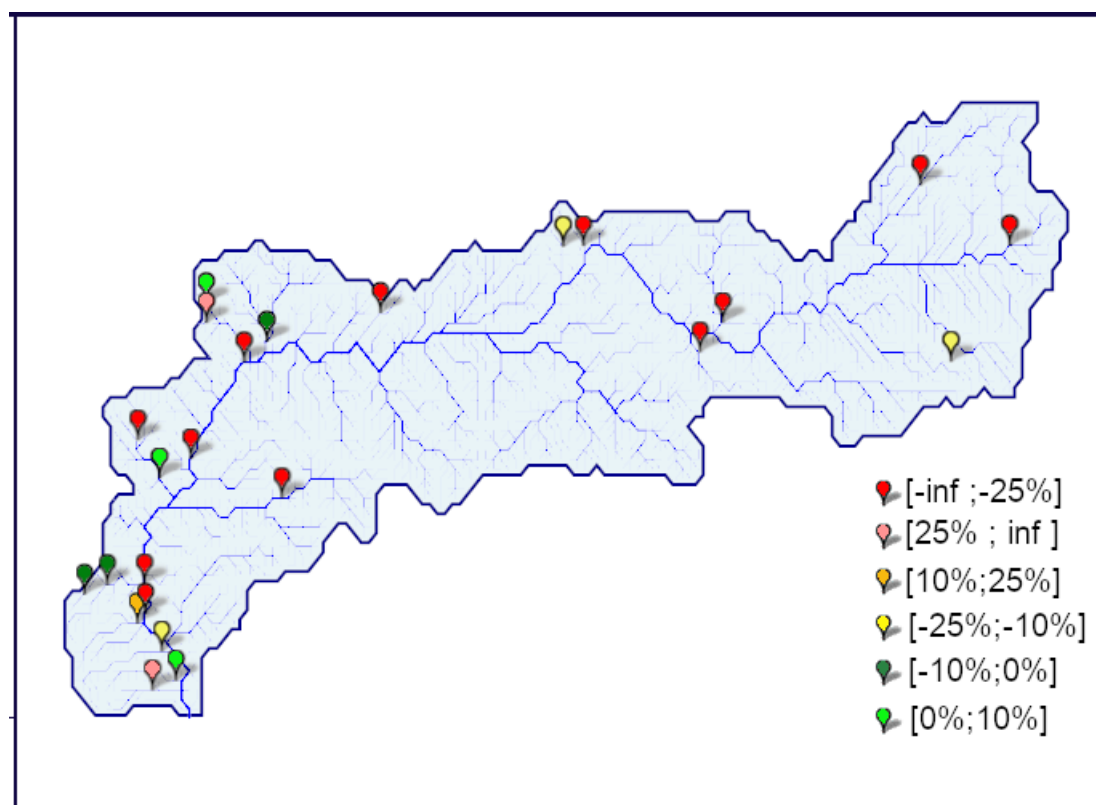


Figura 46 - Resultados obtidos na calibração das diferentes estações hidrométricas para o parâmetro PBIAS.

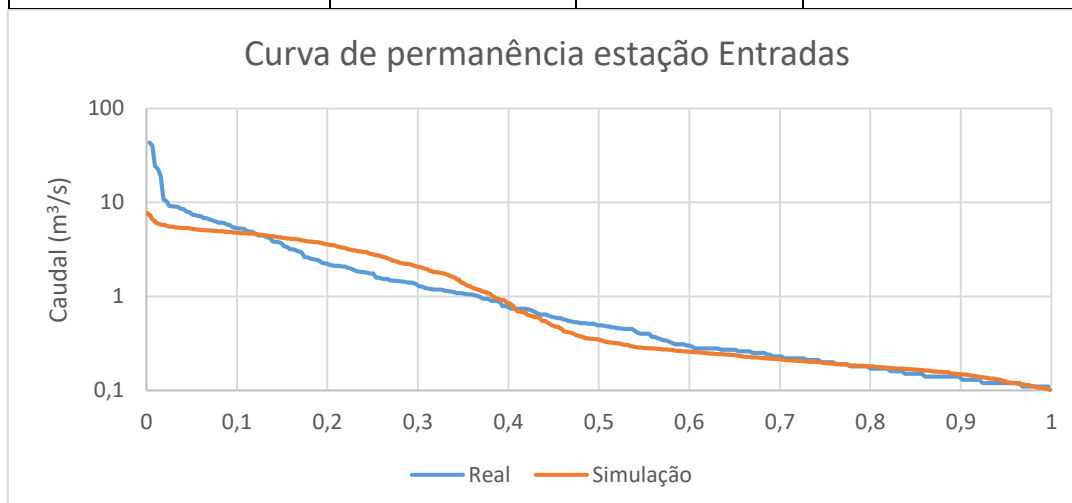
Na análise qualitativa das 24 estações nos diferentes parâmetros estatísticos verifica-se que o NRMSE apresenta o maior número de estações com resultados bons ao longo de toda a bacia, com exceção de 2 estações na zona montante da bacia e as 3 últimas estações hidrográficas existentes no rio Guadiana. O NSE das estações hidrográficas localizadas em território português sem influência de barragens têm bons resultados em quase todas as estações e todas as estações com influência de albufeiras tem um resultado não aceitável. No território espanhol apenas 3 estações não têm um NSE não aceitável. Os resultados obtidos na calibração para o  $R^2$  são bons para praticamente todas as estações em território português, com exceção de Monte da Vinha, Ponte Algalé e Ponte Mourão que são aceitáveis e em território espanhol verifica-se uma má correlação nas 3 estações a montante de el Vicario e na estação 4174. Na análise do PBIAS verifica-se que 18 estações apresentam uma sobrestimação do caudal, 6 têm uma sobrestimação do caudal e em termos de resultados aceitáveis, a maioria das estações encontra-se em território português e sem influência de barragens.

### 4.3 Validação

A validação do modelo é realizada através das ferramentas utilizadas na calibração, a análise da curva de permanência e a análise dos parâmetros estatísticos. O intervalo de tempo da validação está compreendido entre 1 de outubro de 1995 e 30 de junho de 2014 e utiliza as mesmas estações selecionadas na calibração. Os resultados da validação dos parâmetros estatísticos nas restantes estações hidrométricas encontram-se nos anexos C e D. Os resultados qualitativos dos vários parâmetros estatísticos para todas as estações hidrométricas estão também neste capítulo.

*Tabela 15 - Parâmetros estatísticos na estação Entradas no período de validação. Estação sem influência de albufeiras, em território português.*

| Estação                |       | Entradas |       |
|------------------------|-------|----------|-------|
| Nº de anos com registo | 5.6   | R2       | 0.631 |
| Caudal médio registado | 0.298 | RMSE     | 0.532 |
| Caudal médio simulado  | 0.273 | NRMSE    | 0.076 |
| NSE                    | 0.622 | PBIAS    | 6.649 |

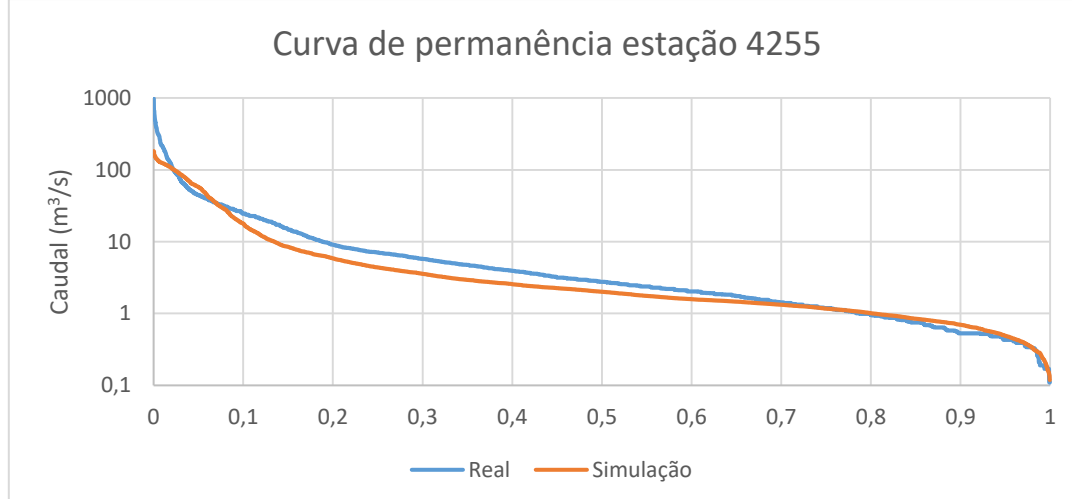


*Figura 47 - Curva de permanência da estação hidrográfica entradas no período de validação. Estação sem influência de albufeiras, em território português.*

A curva de permanência da simulação na estação de Entradas (Figura 47) apresenta caudais menores comparativamente com a estação hidrométrica para frequência de excedência menores que 10%, não atingindo os  $10 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . As curvas apresentam declives diferentes, havendo caudais superiores na simulação para frequências entre os 15% e os 40% e caudais inferiores entre os 40% e os 60%. Para frequências superiores a 60% os caudais são sensivelmente semelhantes. Os caudais médios (Tabela 15) são semelhantes, com a estação hidrométrica a registar o valor de  $0,298 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  e a simulação o valor de  $0,273 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Nos parâmetros estatísticos o NSE com o valor de 0,622 e o  $R^2$  com o valor de 0,631 são aceitáveis e o NRMSE e PBIAS tem valores bons, 0,076 e 6,65% respetivamente.

*Tabela 16 - Parâmetros estatísticos na estação 4255 no período de validação. Estação com influência de albufeiras, em território espanhol.*

| Estação                |        | 4255  |        |
|------------------------|--------|-------|--------|
| Nº de anos com registo | 17,0   | R2    | 0,708  |
| Caudal médio registado | 12,453 | RMSE  | 18,057 |
| Caudal médio simulado  | 8,236  | NRMSE | 0,043  |
| NSE                    | 0,599  | PBIAS | 33,863 |



*Figura 48 - Curva de permanência da estação hidrográfica 4255 no período de validação. Estação com influência de albufeiras em território espanhol.*

Para a estação 4255 a curva de permanência da simulação têm os caudais com valores semelhantes à estação hidrométrica com exceção das frequências de excedência inferiores a 3% e apresentando entre as frequências excedência de 7% e 73% um caudal inferior, como pode ser correlato com a análise ao caudal médio mensal, com o valor de  $8,236 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  para a simulação e de  $12,453 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  na estação hidrométrica. O NRMSE é bom, com o valor de 0,043 e os NSE e  $R^2$  são aceitáveis, com valores de 0,599 e 0,708 respetivamente. O PBIAS é uma subestimação não aceitável, com o valor de 33,86%.



Tabela 17 - Parâmetros estatísticos na estação Amieira no período de Validação. Estação com influência de albufeiras em território português.

| Estação                |       | Amieira |       |
|------------------------|-------|---------|-------|
| Nº de anos com registo | 6,1   | R2      | 0,820 |
| Caudal médio registado | 9,300 | RMSE    | 9,590 |
| Caudal médio simulado  | 8,653 | NRMSE   | 0,054 |
| NSE                    | 0,788 | PBIAS   | 6,955 |

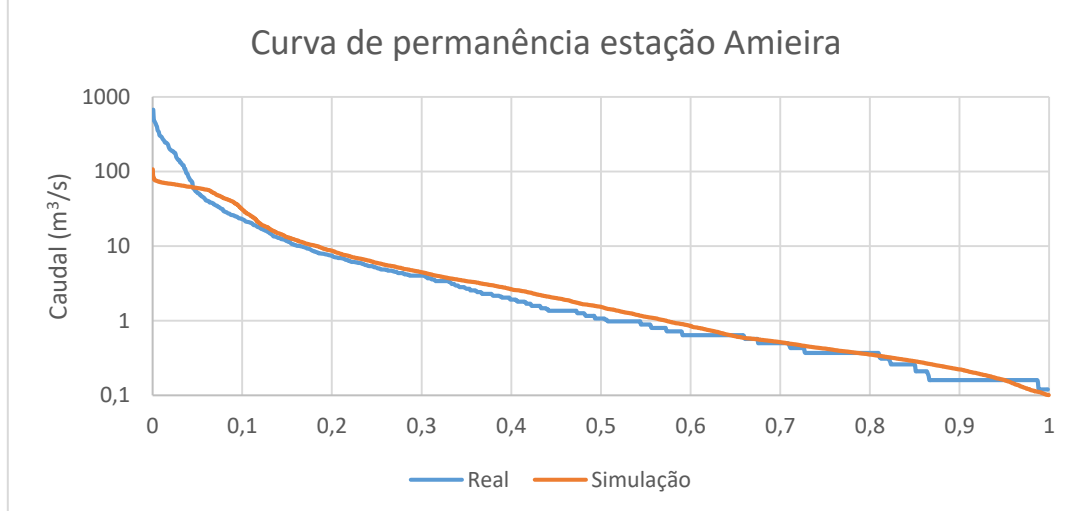


Figura 49 - Curva de permanência da estação hidrográfica Amieira no período de validação. Estação com influência de albufeiras em território português.

Na estação da Amieira, as curvas de permanência apresentam caudais semelhantes com a exceção dos caudais de frequência de excedência inferiores a 5%, onde a simulação registou caudais bastante inferiores. Nas restantes frequências de excedência, a simulação aparenta ter um caudal ligeiramente superior a estação hidrométrica. O caudal mensal médio no período de validação é de  $9,300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  para a estação hidrométrica e de  $8,653 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  para a simulação. Os parâmetros estatísticos apresentam todos resultados bons, com um NRMSE de 0,054, um NSE de 0,788, um  $R^2$  de 0,820 e um PBIAS de 6,96%.

Tabela 18 - Parâmetros estatísticos na estação 4212 no período de validação. Estação sem influência de albufeiras, em território espanhol.

| Estação                |       | 4212  |       |
|------------------------|-------|-------|-------|
| Nº de anos com registo | 8,8   | R2    | 0,798 |
| Caudal médio registado | 2,017 | RMSE  | 1,844 |
| Caudal médio simulado  | 1,894 | NRMSE | 0,045 |
| NSE                    | 0,781 | PBIAS | 6,102 |

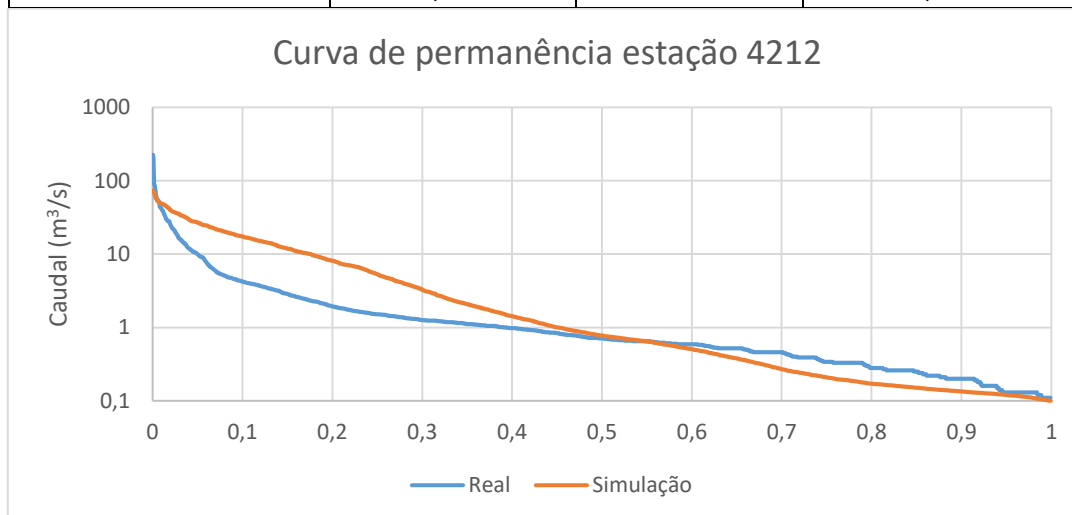


Figura 50 - Curva de permanência da estação hidrográfica 4212 no período de validação. Estação sem influência de albufeiras, em território espanhol.

As curvas de permanência da validação da estação 4212 são bastante diferentes, com caudais da simulação a serem bastante superiores entre as frequências de excedência de 2% e os 45% e inferiores entre os 65% e os 94%. Os caudais mensais médios registados são semelhantes, com o valor de 2,017  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  para a estação hidrométrica e de 1,894  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  para a simulação. Os parâmetros estatísticos obtidos são todos bons nesta estação, com um NSE de 0,781, um  $R^2$  de 0,798, um NRMSE de 0,045 e um PBIAS de 6,1%.

Tabela 19 - Parâmetros estatísticos na estação 4004 no período de validação. Estação sem influência de albufeiras, em território espanhol.

| Estação                |        | 4004  |         |
|------------------------|--------|-------|---------|
| Nº de anos com registo | 18.7   | R2    | 0,280   |
| Caudal médio registado | 2,417  | RMSE  | 6,591   |
| Caudal médio simulado  | 3,106  | NRMSE | 0,151   |
| NSE                    | -4,117 | PBIAS | -28,490 |

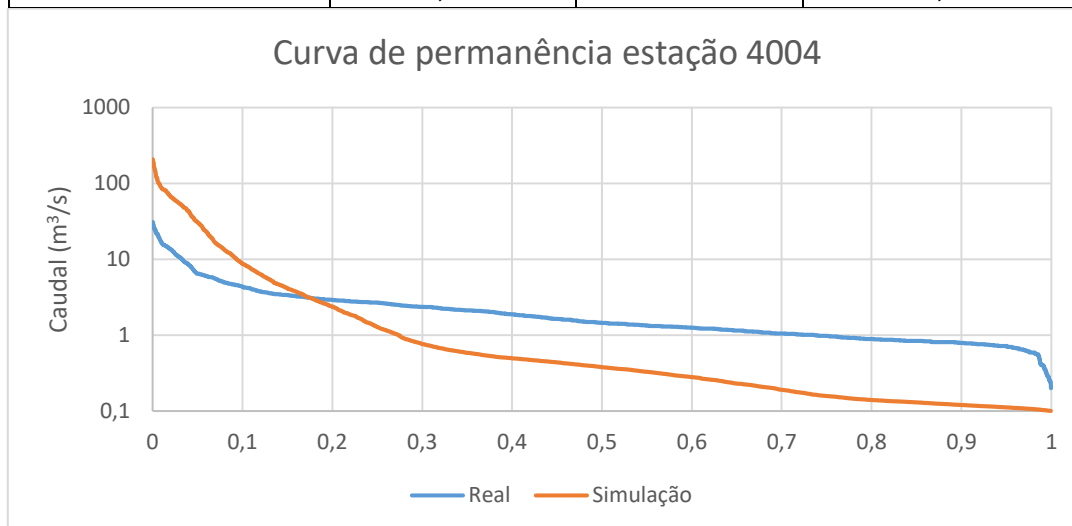


Figura 51 - Curva de permanência da estação hidrográfica 4004 no período de validação. Estação sem influência de albufeiras, em território espanhol.

Na estação 4004 verifica-se que as curvas de permanência têm declives e comportamento bastante diferentes. Na simulação para frequências de excedência inferiores a 15% os caudais são bastante superiores aos caudais da estação hidrométrica. Para frequências de excedência superiores a 20% os caudais são superiores na estação hidrométrica. Os caudais mensais médios são de 2,437 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> para a simulação e de 3,106 na simulação. Com a exceção do NRMSE que apresenta o valor 0,151, bom, todos os restantes parâmetros estatísticos são não aceitáveis, com um NSE de -4.117, um R<sup>2</sup> de 0,280 e um PBIAS de -28.49%.

Tabela 20 - Parâmetros estatísticos na estação Ponte Algalé no período de validação. Estação sem influência de albufeiras, em território português.

| Estação                |       | Monte dos Fortes |        |
|------------------------|-------|------------------|--------|
| Nº de anos com registo | 5,4   | R2               | 0,755  |
| Caudal médio registado | 3,279 | RMSE             | 4,841  |
| Caudal médio simulado  | 1,668 | NRMSE            | 0,838  |
| NSE                    | 0,550 | PBIAS            | 49,117 |

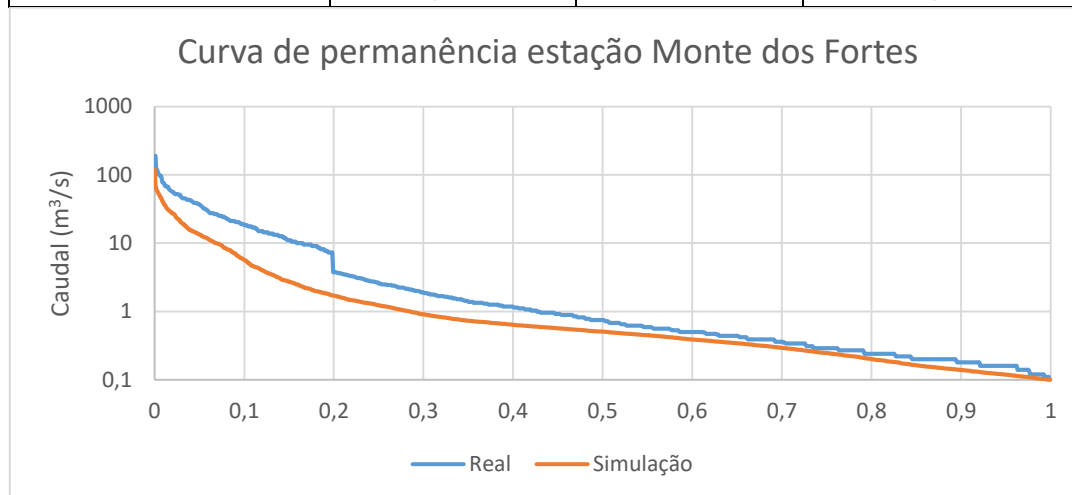


Figura 52 - Curva de permanência da estação hidrográfica Monte dos Fortes no período de validação. Estação sem influência de albufeiras, em território português.

Na estação Monte dos Fortes as curvas de permanência no período de validação apresentam curvas distintas, com uma simulação a apresentar um declive superior e caudais inferiores para frequências de excedência inferiores a 50%. Nas restantes das frequências de excedência, ambas as curvas de permanência apresentam um comportamento semelhante, com caudais ligeiramente inferiores na simulação, comparativamente a estação hidrométrica. O caudal médio simulado é de  $1,1668 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e o caudal médio da estação hidrométrica é de  $3,279 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , existindo claramente uma subestimação do caudal, como pode ser verificado pelo PBIAS de 49,117%, valor não aceitável. O NSE obtido é aceitável, com o valor de 0,550. O  $R^2$  e o NRMSE têm valores bons, 0,755 e 0,083 respetivamente.

Tabela 21 - Parâmetros estatísticos na estação 4214 no período de validação. Estação com influência de albufeiras em território espanhol.

| Estação                |       | 4214  |         |
|------------------------|-------|-------|---------|
| Nº de anos com registo | 16,0  | R2    | 0,716   |
| Caudal médio registado | 5,374 | RMSE  | 9,030   |
| Caudal médio simulado  | 8,750 | NRMSE | 0,042   |
| NSE                    | 0,648 | PBIAS | -62,831 |

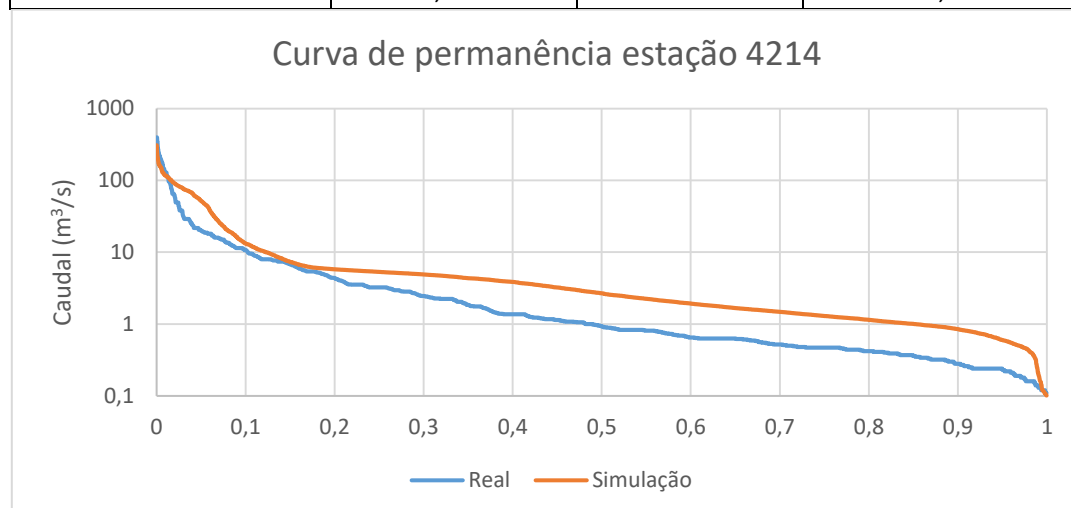


Figura 53 - Curva de permanência da estação hidrográfica 4214 no período de validação. Estação com influência de albufeiras em território espanhol.

Na estação 4214 verifica-se que praticamente para todas as frequências de excedência, o caudal da simulação é superior ao caudal da estação hidrográfica, com a exceção das frequências de excedência inferiores 2%, que são bastante semelhantes. O caudal mensal médio da simulação,  $5,374 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , é superior ao caudal médio da estação hidrométrica,  $5,374 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Os parâmetros estatísticos do  $R^2$  e do NSE são aceitáveis, com os valores de 0,7158 e 0,648 respetivamente. O NRMSE é bom com o valor de 0,042 e o PBIAS é não aceitável, com uma sobrestimação do caudal de 62,83%.

Tabela 22 - Parâmetros estatísticos na estação Pulo do Lobo no período de validação. Estação com influência de albufeiras em território português.

| Estação                |          | Pulo do Lobo |           |
|------------------------|----------|--------------|-----------|
| Nº de anos com registo | 4,9      | R2           | 0,856     |
| Caudal médio registado | 145,796  | RMSE         | 1817,102  |
| Caudal médio simulado  | 1940,451 | NRMSE        | 0,734     |
| NSE                    | -31,910  | PBIAS        | -1230,911 |

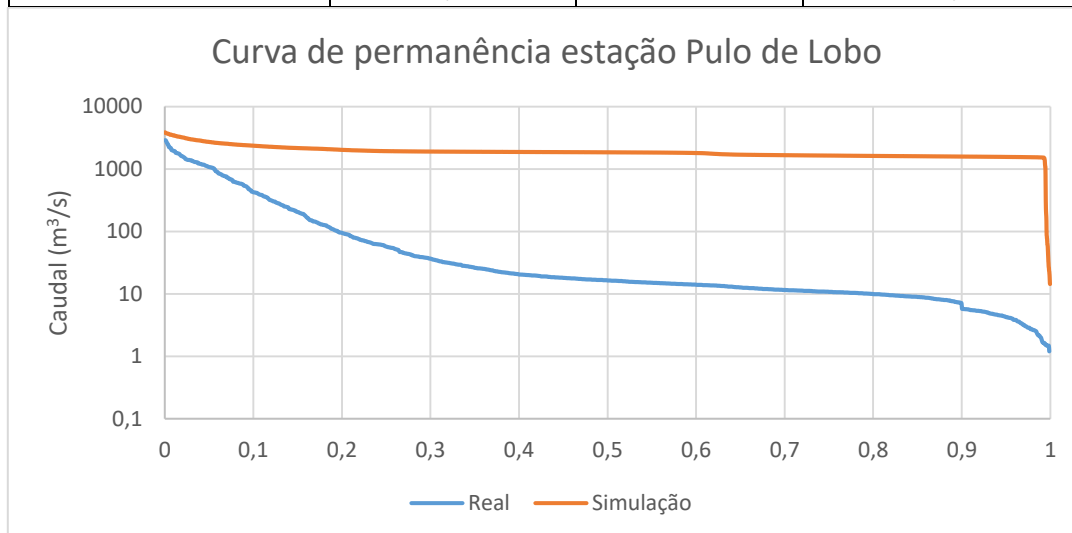


Figura 54 - Curva de permanência da estação hidrográfica Pulo do Lobo no período de validação. Estação com influência de albufeiras em território português.

A estação de Pulo de Lobo apresenta no período de validação o mesmo tipo de curva de permanência que no período de calibração, com curvas completamente distintas e com caudais para a mesma frequência de excedência bastante diferentes. O caudal médio simulado é mais de 10x superior ao caudal médio da estação hidrométrica, com os valores de 1940,451  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  e de 145,796  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  respetivamente. Todos os parâmetros estatísticos são maus, com um NRMSE de 0,734, um NSE de -31,910, um  $R^2$  de 0,856 e um PBIAS de sobrestimação de 1230,91%.

A análise qualitativa dos vários parâmetros estatísticos em todas as estações hidrométricas implementadas na bacia estão representados nas próximas figuras, com a exceção de 5 estações, Monte Pisão, Monte da Ponte, Monte da Vinha, Ponte Algalé e Tenência que não foram consideradas para validação por não apresentarem dados suficientes para se realizar a análise da curva de permanência e os seus parâmetros estatísticos, nomeadamente, menos de 4,5 anos de registos. Na figura 55 é representado os resultados das diferentes estações no parâmetro NSE e na figura 56 o  $R^2$ . O RMSE encontra-se na 57 e o PBIAS na figura 58. A classificação qualitativa é realizada pelo intervalo de valores definidos no capítulo 4.3 para cada tipo de parâmetro.

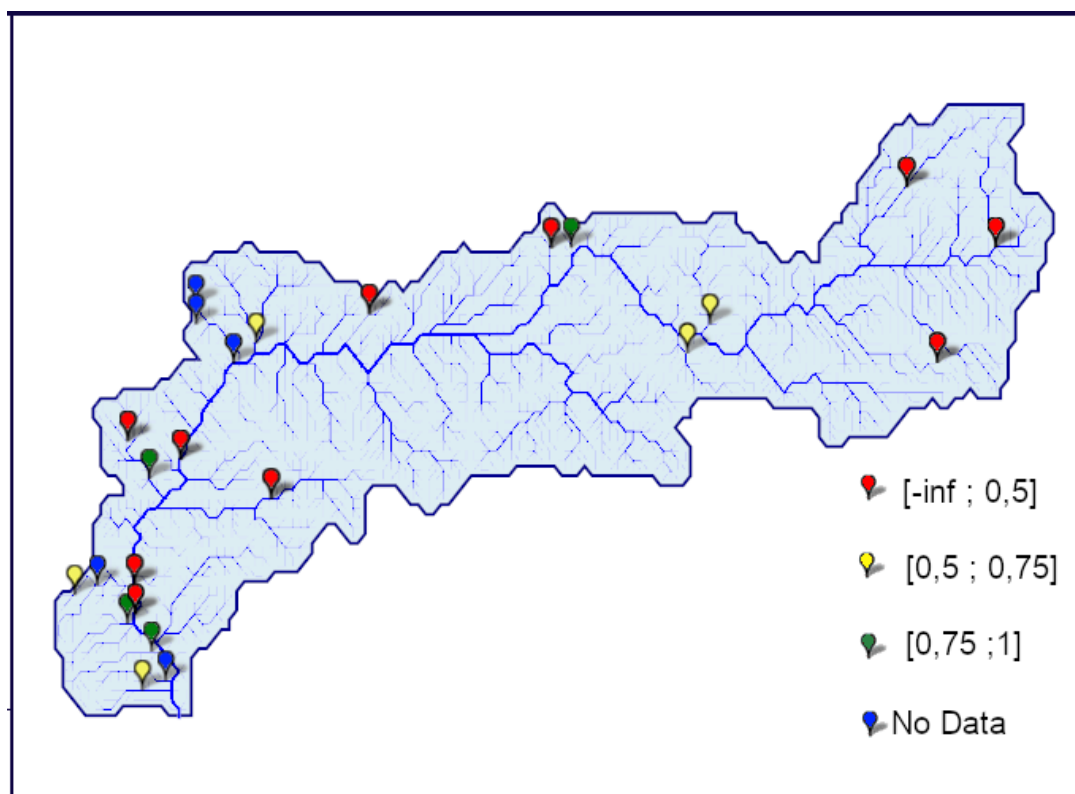


Figura 55 - Resultados obtidos na validação das diferentes estações hidrométricas para o parâmetro NSE.

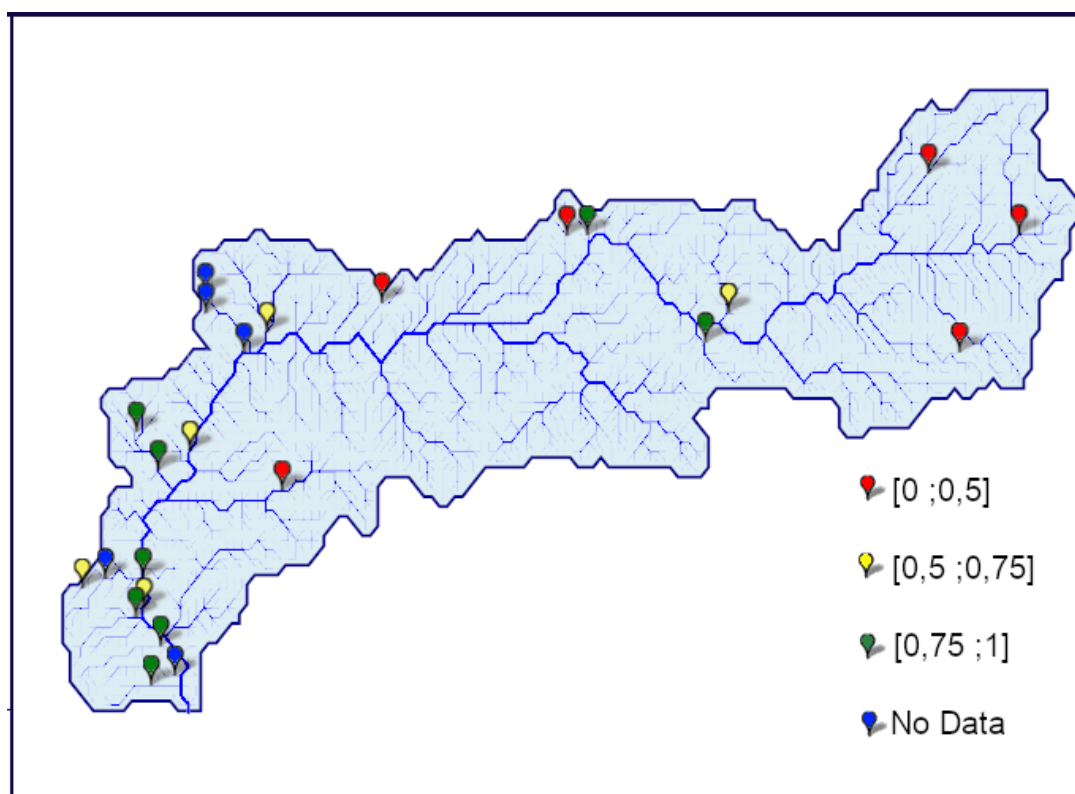


Figura 56 - Resultados obtidos na validação das diferentes estações hidrométricas para o parâmetro  $R^2$ .

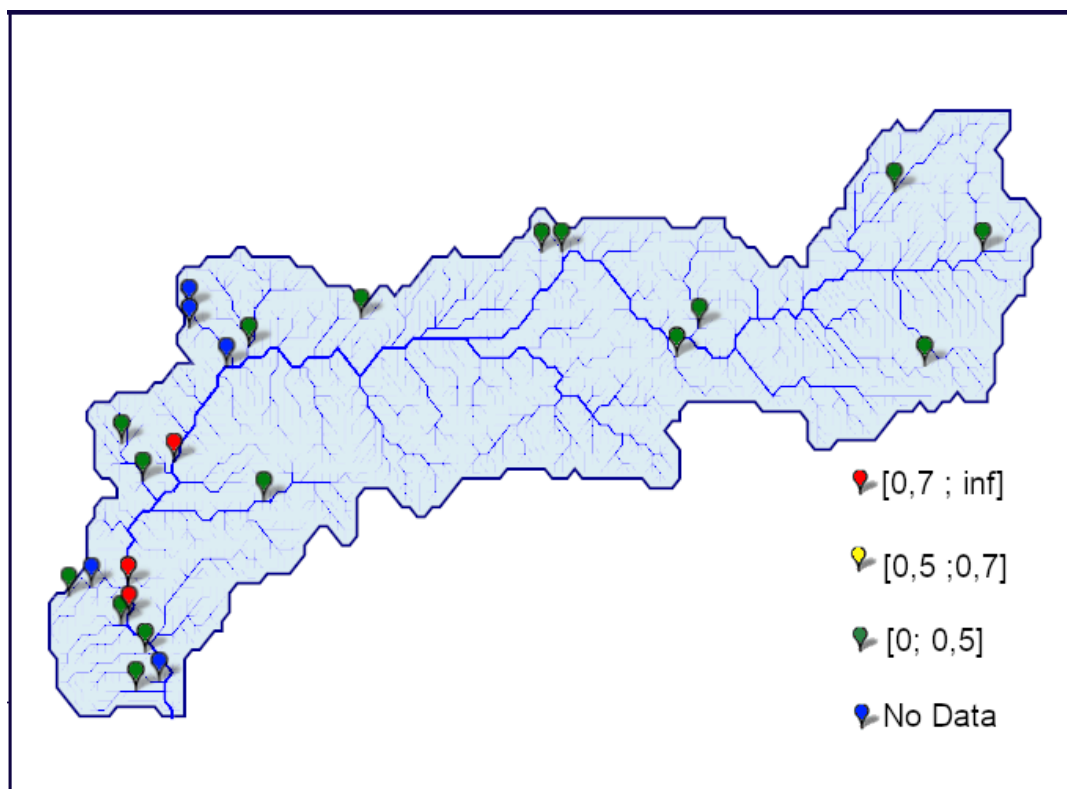


Figura 57 -- Resultados obtidos na validação das diferentes estações hidrométricas para o parâmetro NRMSE.

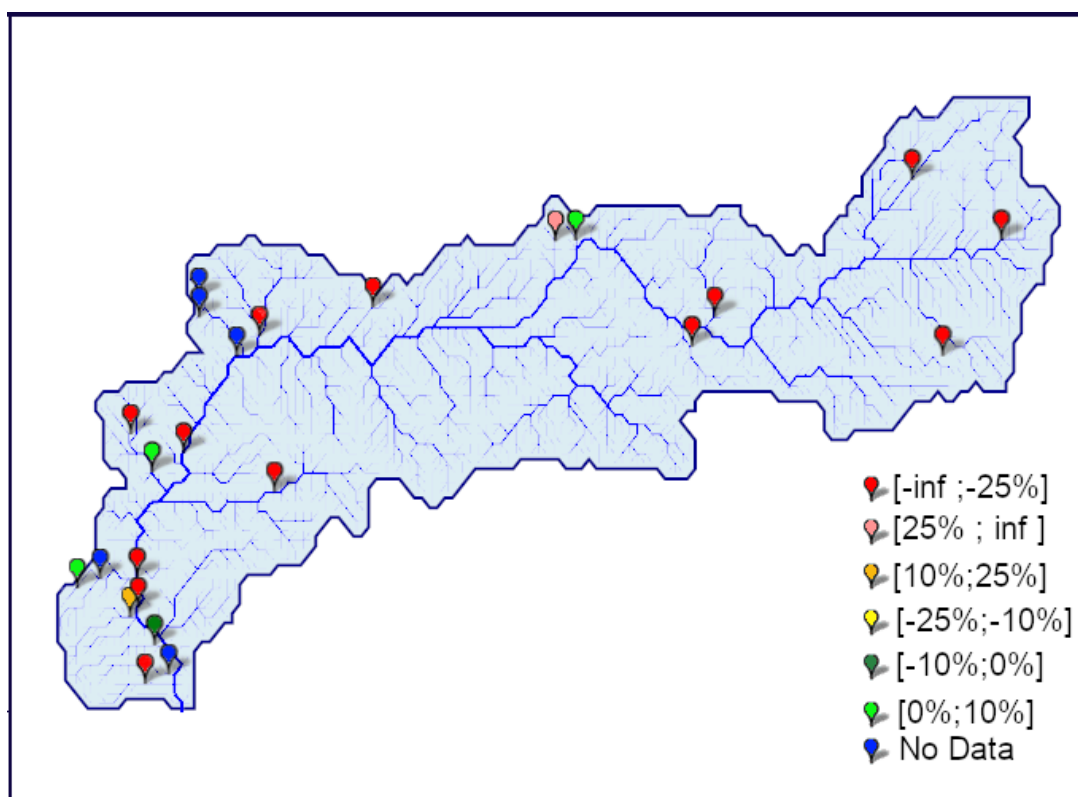


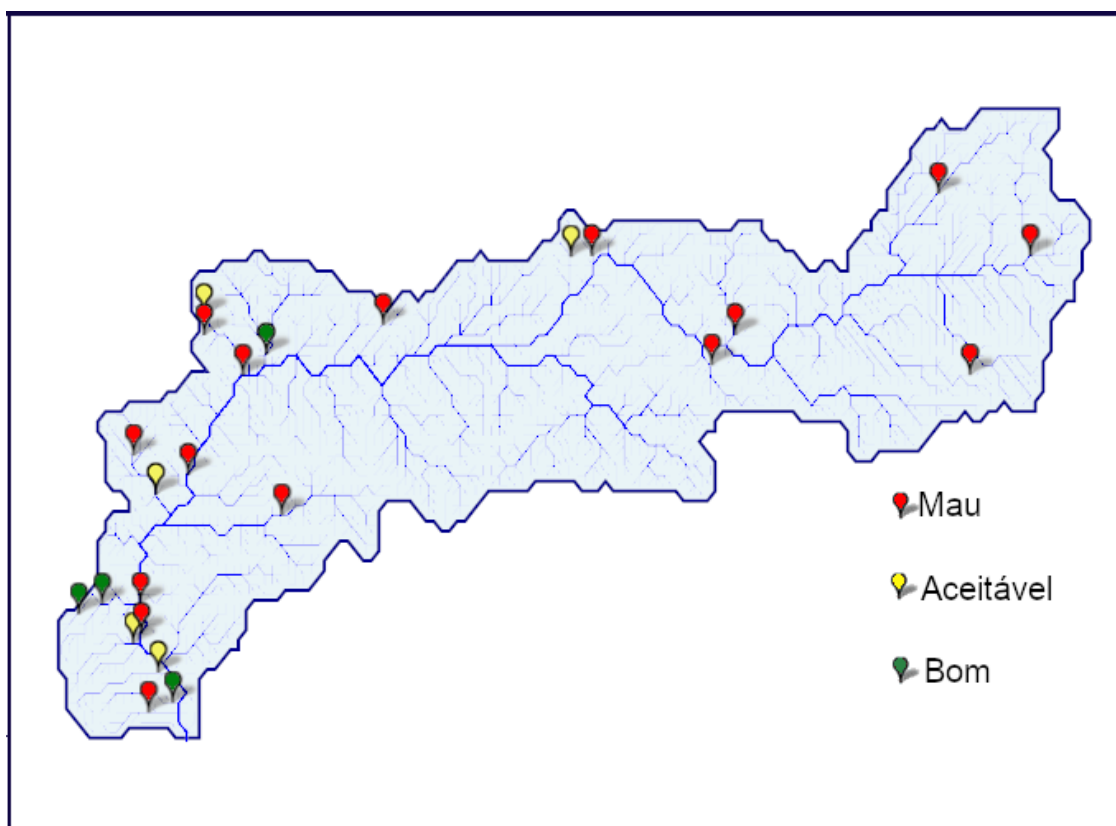
Figura 58 -- Resultados obtidos na validação das diferentes estações hidrométricas para o parâmetro PBIAS.



Na análise qualitativa das 20 estações no período de validação para os diferentes parâmetros estatísticos verifica-se que o NRMSE apresenta o maior número de estações com resultados bons ao longo de toda a bacia, com exceção de 3 últimas estações hidrográficas existentes no rio Guadiana. Apenas obteve-se uma estação com um bom NSE em território espanhol (4212), sendo que existem 3 com NSE aceitável (4108, 4214 e 4255) e 6 com NSE não aceitável (4004, 4174, 4201, 4218, 4224 e 4257). Em território português, 4 estações apresentam um NSE não aceitável (Vendinha, Rocha da Galé, Pulo de Lobo e Ponte Mourão), duas apresentam valores aceitáveis (Entradas e Monte dos Fortes) e 3 estações têm um NSE bom (Amieira, Oeiras e Vascão). Relativamente ao  $R^2$  em território português, as estações de Entradas, Rocha da Galé e Ponte Mourão apresentam um  $R^2$  aceitável e as restantes estações têm resultados bons neste parâmetro, não existindo estações com um  $R^2$  não aceitável. Relativamente as estações em território espanhol, apenas as estações 4108 e 4212 têm resultados bons, as estações 4214 e 4255 apresentam resultados aceitáveis e as estações 4004, 4174, 4201, 4218, 4224 e 4257 têm um  $R^2$  não aceitável. Na análise do PBIAS verifica-se que 12 estações apresentam uma sobrestimação do caudal e 7 têm uma sobrestimação do caudal. Existem 4 estações com um PBIAS bom, 4212, Entradas, Vascão e Amieira e apenas a estação de Oeiras têm um resultado aceitável. As restantes estações apresentam um PBIAS não aceitável.

## 5 Discussão

Na análise dos resultados globais da calibração, Figura 59, verifica-se que 15 das 24 estações hidrométricas implementadas apresentam resultados não satisfatórios onde pelo menos um dos parâmetros estatísticos não é aceitável, 5 estações apresentam resultados aceitáveis e 4 estações têm resultados bons.



*Figura 59 – Resumo dos resultados da calibração para cada estação hidrométrica, considerando todos os parâmetros estatísticos.*

Das 4 estações que apresentam uma boa calibração, Entradas, Monte da Ponte e Tenência encontram-se em território português enquanto que a estação 4255 está em território espanhol. No período de calibração nenhuma destas estações é influenciada por albufeiras. As estações com calibração aceitável, Amieira, Monte Pisão, Oeiras Vascão e 4218 não são influenciadas por albufeiras no período de calibração. Das 9 estações implementadas com influência de albufeiras 8 apresentam resultados não aceitáveis, sendo que das 15 estações sem influência de albufeiras 9 também apresentam resultados não aceitáveis.

Na figura 60 estão indicados os resultados dos parâmetros estatísticos no período de validação entre 1995 e 2014. Foram registadas apenas 3 estações com boas simulações, Vascão e Amieira em território português e a estação 4212 em território espanhol. Com coeficientes estatísticos aceitáveis, encontram-se as estações portuguesas de Entradas e Oeiras. As estações de Tenência, Monte da Ponte, Monte Pisão, Monte da vinha e Ponte Algalé não têm dados suficientes para realizar a validação e as restantes estações apresentam uma validação com pelo menos 1 coeficiente estatístico não aceitável.

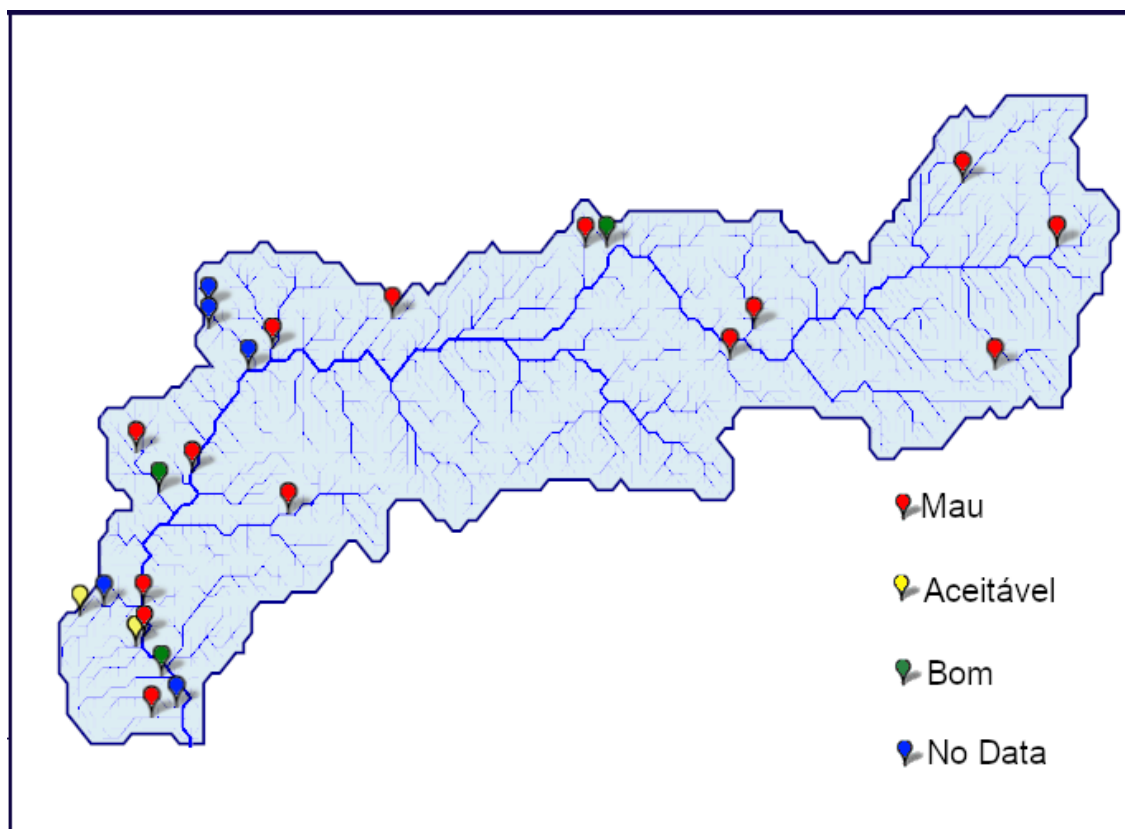


Figura 60 - Resumo dos resultados da validação para cada estação hidrométrica, considerando todos os coeficientes estatísticos.

Ao comparar a figura 59 com a figura 60 verifica-se que no período de validação houve uma diminuição de estações com bons resultados, passando de 4 para 3 estações. Das 4 estações com bons resultados na calibração, Monte da Ponte e Tenência não têm dados suficientes para serem validados, a estação 4255 em 1996 passa ser influenciada pela albufeira de Villar del Rey e os resultados da validação são não aceitáveis devido ao facto de o PBIAS ser 33,86%. A estação de Entradas deixa de ter um bom NSE passando a ser aceitável. Das estações que apresentam uma calibração aceitável, Monte Pisão não têm dados suficientes para ser validado, Oeiras mantêm um PBIAS aceitável, deixando de existir uma sobrestimação e passando a existir uma subestimação do caudal. A estação da Amieira, que na validação passa a ser influenciada pela albufeira de Monte Novo (1998), e a estação do Vascão que tinham uma calibração aceitável passam a ter uma validação com resultados bons. A estação 4218 passa de uma calibração aceitável para uma má validação piorando o NSE, o  $R^2$  e o PBIAS. Das estações com uma má calibração, Monte da Vinha e Ponte Algalé não têm dados no período de validação, a estação 4212 passa a ter uma validação boa e as restantes estações mantêm resultados não aceitáveis. De notar que apesar de serem não aceitáveis, os parâmetros estatísticos das estações 4004, 4201, 4224, 4108, 4174, 4214, Pulo de Lobo e Ponte Mourão têm uma melhoria, principalmente no parâmetro estatístico PBIAS, o que indica que a diferença média entre os caudais diminui, anexos A, B, C e D. Ao observar os caudais mensais médios nas estações hidrométricas verifica-se que comparativamente, à exceção das estações 4257 e Rocha da Galé, todas as restantes apresentam um caudal médio mensal superior no período de validação, sendo esta tendência verificada nos caudais

mensais médios simulados à exceção da estação 4212. Tanto na calibração como na validação do modelo verifica-se que a modelação da bacia hidrográfica apresenta melhores resultados em território português, principalmente em estações hidrométricas sem influência de albufeiras.

Para uma melhoria dos resultados, é necessário considerar diferentes fatores que influenciam os parâmetros implementados. A malha utilizada na bacia hidrográfica tem células de elevada dimensão (5 km) para diminuir o tempo de cálculo do modelo. O aumento da dimensão da célula implica uma diminuição da resolução do modelo e não sendo considerados diversos detalhes, tais como a não existência de zonas urbanas no modelo, a variação acentuada do declive em alguns locais e a distribuição espacial dos diferentes tipos de vegetação. A perda de sensibilidade da topografia e consequentemente do declive no terreno vai influenciar em larga medida a forma da rede de drenagem e as suas áreas de drenagem, influenciando o escoamento superficial existente e a quantidade de água que entra nos caudais dos rios.

A implementação do número de escoamento considerando apenas as propriedades do solo e sem considerar o uso existente à superfície, implica a existência de locais onde a permeabilidade apresenta maior dependência das propriedades à superfície que não são considerados pelo modelo. Especificamente, as zonas urbanas apresentam um coeficiente de Manning baixo e um número de escoamento alto devido a impermeabilização provocada pela edificação contínua e o pavimento que as conecta. A sua taxa de infiltração é, portanto quase nula e existe baixo atrito no escoamento superficial, independentemente da permeabilidade do solo existente por baixo.

O aumento da secção transversal em diversos segmentos da rede de drenagem permitiu estabilizar a simulação, por estar implementado um limite para o número máximo de iterações na resolução dos cálculos relativos ao escoamento entre células. A maior diferença provocada pelo aumento da secção de corte é na altura da coluna de água, que diminui ao aumentar a secção de corte para um mesmo caudal. Apesar do aumento da secção de corte da rede de drenagem, o caudal num determinado local mantém-se semelhante, porque o escoamento superficial é praticamente o mesmo e o caudal encontra-se em equilíbrio com o nível freático. Em alguns casos, devido à dimensão da malha de estudo, numa célula é possível encontrar pelo menos 2 cursos de água, que no modelo têm de ficar acoplados.

Relativamente a implementação do uso do solo na bacia hidrográfica, a classificação GLC 2000, indica que o uso de solo agrícola encontra-se em cerca de 70% do território e agrupa diferentes espécies vegetais no mesmo grupo taxonómico, sendo que esta classificação não considera as elevadas diferenças existentes para diferentes espécies na sua propriedade do ( $Kc$ ) e nos seus períodos de plantação, crescimento e colheita. Na tabela 23 está representado o ( $Kc$ ) de diversas espécies incluídas no uso agrícola nos diferentes estágios de crescimento e o seu tempo de crescimento, verificando-se que existem diferenças consideráveis que o modelo não considera.

Tabela 23 – ( $K_c$ ) de diferentes plantações em diferentes fases de crescimento e o tempo de crescimento em dias (fonte: (FAO, 1998))

| Plantação | $K_c$ inicial | $K_c$ crescimento | $K_c$ fim de vida | Tempo de crescimento fase inicial | Tempo de crescimento fase intermédia | Tempo total de crescimento |
|-----------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Trigo     | 0,4           | 1,15              | 0,30              | 20                                | 70                                   | 200                        |
| Cevada    | 0,3           | 1,15              | 0,25              | 20                                | 70                                   | 200                        |
| Uvas      | 0,3           | 0,7               | 0,45              | 30                                | 40                                   | 210                        |
| Feijão    | 0,5           | 1,05              | 0,90              | 20                                | 30                                   | 90                         |

A configuração atual do MOHID-Land permite definir apenas um ( $K_c$ ) para cada cultura e não considera diferentes necessidades de água que cada cultura tem ao longo do seu desenvolvimento, mas permite determinar a data de plantação e a data de colheita para cada cultura.

As estações hidrométricas existentes na zona montante de El Vicario (4004, 4201 e 4224) apresentam resultados não aceitáveis, com uma sobrestimação no caudal do 15%, 87% e 1634% no período de calibração respetivamente e de 28%, 49% e 446% no período de validação. Sendo estações a montante na bacia hidrométrica, vão influenciar a albufeira de El Vicario e todos as albufeiras a montante no rio Guadiana. Comparou-se a precipitação média mensal nas estações Naharros (GEO PORTAL, 2018) e Torrubia del Campo (GEO PORTAL, 2018) com dos dados fornecidos pelo SAFRAN para verificar se existe influência da precipitação fornecida pelo SAFRAN nos caudais do modelo. A estação de Naharros encontra-se localizada na fronteira da bacia do Guadiana com a bacia do Tejo e pertence à área de drenagem da estação 4201. A estação de Torrubia del Campo encontra-se situada a norte da estação 4201, mas não se encontra na sua área de drenagem. As comparações encontram-se nas tabelas 25 e 24 respetivamente.

Tabela 24 – Média da precipitação mensal da estação pluviométrica (1967-2003) e do SAFRAN (1979-2003) para Torrubia del Campo.

| Torrubia del Campo /mês    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | Anual |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Estação pluviométrica (mm) | 41,9 | 39,5 | 33,9 | 52,2 | 50,2 | 33,7 | 10,5 | 11,8 | 26,5 | 50,7 | 49,8 | 47,1 | 447,8 |
| SAFRAN (mm)                | 40,9 | 33,4 | 31,2 | 49,8 | 50,7 | 27,6 | 8,1  | 13,7 | 27,3 | 54,0 | 58,5 | 55,4 | 450,6 |

*Tabela 25 – Média da precipitação mensal da estação pluviométrica (1961-2003) e do SAFRAN (1979-2003) para Naharros.*

| Naharros /<br>mês                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | Anual |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Estação<br>pluviométrica<br>(mm) | 72,3 | 66,5 | 49,1 | 68,4 | 66,1 | 40,8 | 14,5 | 21,9 | 43,4 | 62,5 | 77,5 | 76,0 | 659,0 |
| SAFRAN<br>(mm)                   | 43,4 | 35,3 | 33,0 | 52,0 | 52,6 | 53,8 | 29,2 | 8,5  | 2,90 | 57,3 | 61,6 | 58,7 | 476,9 |

Na análise dos resultados pluviométricos verifica-se que os valores de precipitação fornecidos pelo SAFRAN apresentam resultados semelhantes ao registo da estação Torrubia del Campo e no caso da estação de Naharros a pluviosidade é superior no registo efetuado pela estação pelo que a precipitação fornecida pelo SAFRAN não pode ser considerada um fator para o aumento do caudal registado na rede de drenagem. O período utilizado na comparação não é o mesmo, mas existe um período de 24 anos coincidentes o que permite perceber a tendência de precipitação em ambas as regiões. Um razão plausível que explica em parte a existência de caudais superiores na simulação nestas estações é o tipo e o uso de solos das suas áreas de drenagem, compostos por solos calcários muito permeáveis, com grandes extensões de campos agrícolas e existe sobre-exploração dos aquíferos (APA, 2016). O uso intensivo de água na agricultura proveniente dos aquíferos permite que exista uma quantidade elevada de água evapotranspirada que não é considerada pelo modelo, levando a diminuição de água existente no solo e do nível freático e permitindo a diminuição do caudal na rede de drenagem. A utilização de 30 m de espessura de solo no modelo também influencia a capacidade de armazenamento de água, se comparativamente o solo existente apresentar espessura inferior, que corresponde a uma menor quantidade de água disponível no solo e associado ao uso intensivo de água, o solo apresenta uma melhor capacidade de infiltração nos períodos de maior precipitação.

A implementação das albufeiras no modelo é crucial para a obtenção de um caudal realista no leito do rio. A existência de um albufeira influencia o caudal que vai existir a jusante e a bacia do Guadiana têm bastantes albufeiras ao longo da sua extensão. A utilização de séries temporais com as descargas reais efetuadas nas albufeiras permite efetuar a simulação do comportamento da albufeira, existindo menos uma variável a ser considerada. Nas situações que essa informação não está disponível, a implementação de uma curva de operação para determinar o caudal de descarga da albufeira permite relacionar o volume de armazenamento da albufeira com o caudal de descarga. A curva de operação que é implementada no modelo não permite diferenciar as descargas necessárias de serem realizadas em diferentes estações do ano para as diferentes necessidades ecológicas e de consumo que existem, onde no período das primeiras chuvas é comum existir poucas descargas e de baixo caudal para armazenar água para os subseqüentes períodos secos e nos períodos secos é necessário satisfazer as necessidades ecológicas e da população e esvaziar em parte a albufeira de modo a que tenha capacidade de armazenamento no ano seguinte. A curva de operação implementada não permite que exista uma dualidade de caudais de descarga para um mesmo volume de armazenamento. O MOHID também não permite diferenciar diferentes políticas de armazenamento que muitos albufeira têm

estipuladas, como por exemplo Torre de Abraham, que permite um armazenamento total de 178,4 hm<sup>3</sup> entre os meses de outubro e março e de 183,4 hm<sup>3</sup> nos restantes meses do ano e foi implementado no modelo o volume máximo definido para cada albufeira. Na situação que existe uma série temporal com as descargas e o caudal de entrada na albufeira é constantemente superior ao real, figura 61, tende a ocorrer uma acumulação de água na albufeira e o volume de água armazenada atinge a capacidade máxima da albufeira e consequentemente existe descargas com caudais superiores de modo a manter o volume de água na albufeira até 100% da sua capacidade. Este efeito pode ser observado na Figura 61, onde o volume de armazenamento na simulação da albufeira Garcia de Sola atinge os 100% no dia 1 de janeiro de 1986, mantêm-se no volume máximo durante 3 meses e durante este período o caudal de descarga é superior na simulação. No mesmo período de tempo verifica-se que o volume máximo atingido nos registos reais da albufeira foi de 83%. Quando o volume simulado não está a 100% da capacidade de armazenamento, o caudal de descarga simulado é igual ao caudal real.

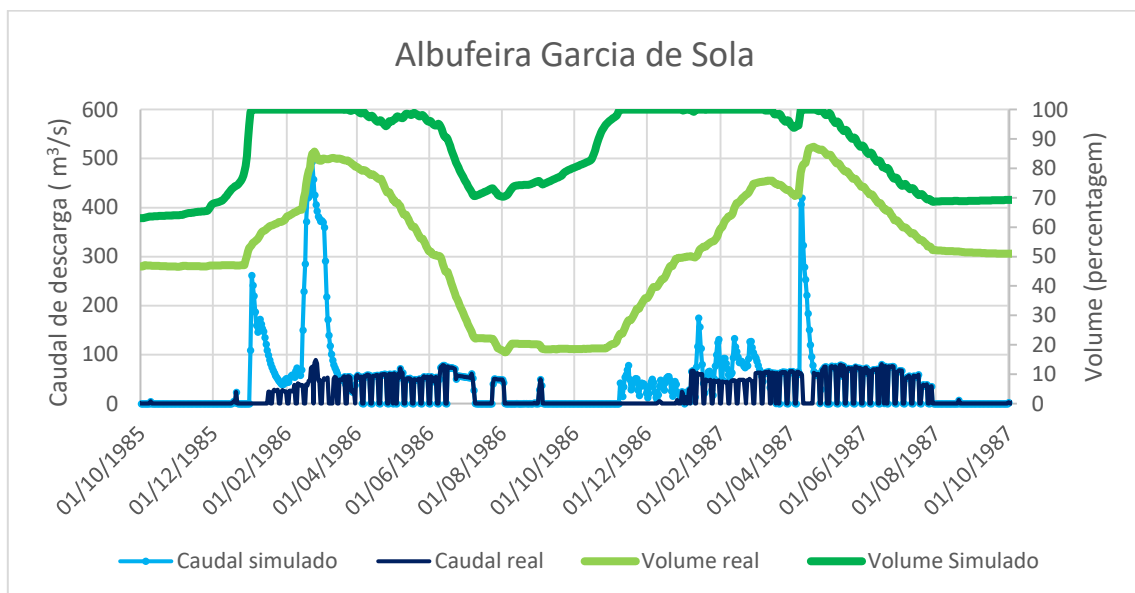


Figura 61 – Caudais e Volumes simulados e registados na albufeira Garcia de Sola no período de 1 de outubro de 1985 a 1 de outubro de 1987

O aumento do caudal na albufeira do modelo também é influenciado pelos períodos temporais onde não foi realizado um registo do caudal de descarga. No do modelo, os dias onde não existe um registo de caudal de descargas foi implementado um caudal de zero m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, influenciando o volume de água armazenado no interior da albufeira. Na maioria das albufeiras em território português os registos das descargas encontram-se em dados mensais, tendo sido implementados no modelo através de uma conversão para valores diários, sendo uma aproximação grosseira porque perde especificidade entre os períodos de precipitação e o caudal de saída, influenciando o caudal registado nas estações hidrométricas da simulação. A não existência de dados relativos a remoção de águas das albufeiras para consumo de populações, agrícola e industrial influencia a capacidade de armazenamento das albufeiras porque apesar de uma parte do volume de água voltar ao sistema de drenagem (quantidade não evapotranspirada), a velocidade de retorno é baixa.

A existência de pequenos lagos ao longo da bacia, tais como a Laguna de El Hito e a Laguna de El Longar têm um efeito semelhante a albufeiras nos primeiros meses que ocorre precipitação após o período de verão, porque acabam por acumular parte da água do escoamento superficial e na simulação acaba por entrar diretamente na rede de drenagem porque o modelo não permite a existência de depressões ao longo da bacia.

Nas estações hidrométricas que apresentam resultados não satisfatórios, usualmente por terem pelo menos o NSE e o PBIAS não aceitáveis são mais sensíveis aos fenómenos extremos de precipitação. Na Figura 62 verifica-se que uma precipitação de 50,75 mm de água durante o dia 11 de novembro de 1995 na estação 4108 não provoca nenhuma alteração significativa no caudal registado na estação hidrométrica, mas na simulação o caudal aumenta consideravelmente de um valor nulo para os 14,6 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. A precipitação que ocorre entre os dias 15 e 17 de novembro, induz um aumento de caudal registado pela estação hidrométrica, mas na simulação o caudal têm uma amplitude muito superior, o dia onde é registado o caudal máximo é diferente e o caudal volta a valores próximos de zero mais rapidamente.

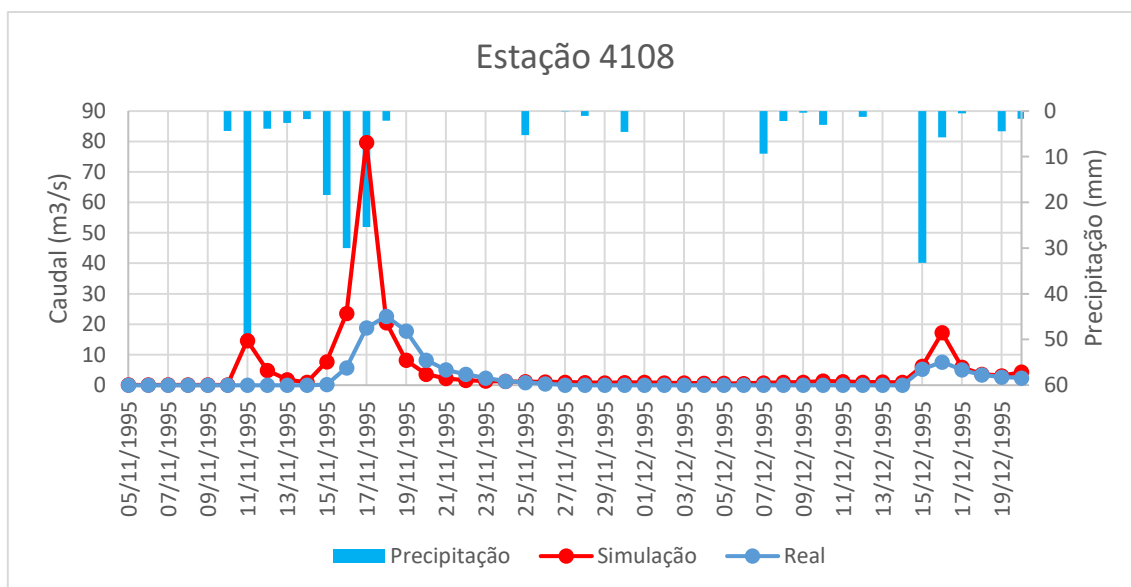


Figura 62 – Caudal na estação 4108 registado e simulado no período compreendido entre 5 de novembro e 20 de dezembro de 1995.



## 6 Conclusão

Com este trabalho pretendeu-se simular a dinâmica de água na bacia hidrográfica do Guadiana no período de tempo entre 1979 e 2014. Para desenvolver o trabalho proposto, a metodologia adotada consistiu na aplicação de um modelo matemático, MOHID-Land, à região de estudo permitindo a simulação hidrodinâmica.

A utilização deste modelo permitiu relacionar os diferentes processos do ciclo de água existentes na bacia interligando os fenómenos atmosféricos com o escoamento superficial e o escoamento subterrâneo, através dos diferentes módulos aplicados no modelo, sendo possível simular o percurso da água desde a sua precipitação na zona montante da bacia até a sua saída na foz.

Apesar da diminuição de sensibilidade devido as dimensões das células, foi necessário aplicar células de 5 km x 5 km para que os cálculos realizados em todas as células (10 200) fossem realizados com alguma rapidez, dado que com as configurações atuais, em média um mês simulado necessita cerca de 14 minutos para ser realizado, totalizando um total de 4 dias para cobrir o tempo total do estudo.

Os resultados obtidos na simulação permitem concluir que a calibração e a validação do modelo ficaram aquém do esperado. Nas estações na zona montante da bacia não se obteve calibrações e validações aceitáveis, possivelmente devido a utilização intensiva de água subterrânea existente que o modelo não considera conjugada com um perfil de solo bastante espesso (até 30 metros), que resultou numa profundidade de sol superior e com um teor superior de água acumulada que influencia a rede de drenagem e a taxa de infiltração ao longo dos meses. Estas estações hidrométricas acabam por influenciar parte das estações com influência de albufeiras, que na sua maioria obtiveram caudais superiores aos registados nas estações hidrométricas. As estações com baixas áreas de drenagem e sem influência de albufeiras, principalmente em território português apresentam os melhores resultados da simulação.

Para trabalhos futuros, é necessário a introdução de nova informação que permita a calibração aceitável do modelo nas zonas montante da bacia. É necessário modificar o módulo “*Reservoirs*” para permitir nas situações que a albufeira não tem o registo dos caudais de descarga, possa ser aplicadas diferentes regras para definir a curva de operação da albufeira, obtendo-se uma aproximação mais realista das descargas tanto nas épocas onde ocorre a maioria da precipitação como nas épocas secas.

Após modificação dos parâmetros para permitir uma calibração e validação da bacia aceitáveis, pode ser implementado no modelo os módulos *PorousMedia Properties*, *RunOff Properties*, *Sediment Quality* e *Water Quality*. Estes módulos permitem ao modelo simular os diversos parâmetros bioquímicos e os sedimentos que existem na bacia. Após calibração e validação é possível obter cenários que indiquem às entidades gestoras os efeitos que determinadas medidas que possam aplicar têm na disponibilidade e na qualidade da água da bacia ao longo dos anos.

## Referências Bibliográficas

- Abbott, M. B., & Minns, A. W. (1998). *Computacional Hydraulics*. Brookfield: Ashgate.
- AEmet. (2012). *Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT*.
- AEMET. (2018). *Agencia Estatal de Meteorología*. Obtido em 17 de Julho de 2018, de <http://www.aemet.es/es/portada>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Allen, R. P. (1998). *Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requierements. Irrigation Drain pp. 56*. Rome, Italy : FAO.
- Andreadis, K. M., Schumann, G. J.-P., & Pavelsky, T. (2013). A simple global river bankfull width and depth database. *WATER RESOURCES RESEARCH*, 7164-7168. Obtido de <http://gaia.geosci.unc.edu/rivers/>
- APA. (2016). *Plano de Gestão de Região Hidrográfica Parte 2 - Caracterização e diagnóstico*. Obtido de Agencia Portuguesa do Ambiente: [http://www.apambiente.pt/\\_zdata/Politicas/Agua/PlaneamentoGestao/PGRH/2016-2021/PTRH7/PGRH7\\_Parte2.pdf](http://www.apambiente.pt/_zdata/Politicas/Agua/PlaneamentoGestao/PGRH/2016-2021/PTRH7/PGRH7_Parte2.pdf)
- APA. (2018). *Agência Portuguesa do Ambiente*. Obtido de Coordenação entre Portugal e Espanha - 2.º Ciclo: <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=7&sub2ref=9&sub3ref=1458>
- APA. (2018). *Agência Portuguesa do Ambiente - Atribuições*. Obtido de Agência Portuguesa do Ambiente: <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=5&subref=634>
- AQUAMOD. (2018). *AGUAMOD Desenvolvimento de uma plataforma de gestão dos recursos hídricos em situação de escassez no território do SUDOE*. Obtido de <http://www.aguamod-sudoe.eu/pt/>
- Brady, N. C., & Well, R. R. (2002). *The Nature and Properties of Soils - Thirteenth edition*. Prentice Hall.
- CADC. (2014). *Comissão para a Aplicação e o Desenvolvimento da Convenção de Albufeira*. Obtido de <http://www.cadc-albufeira.eu/pt/cuencas-hidrograficas/cuenca-guadiana/>
- CADC. (2018). *Documento de coordenação elaborado durante o processo de planeamento 2016- 2021 para as bacias hidrográficas internacionais partilhadas por Espanha e Portugal*. Obtido de Agência Portuguesa do Ambiente: <https://www.apambiente.pt>
- CEH-CEDEX. (2018). *CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS*. Obtido de CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS: [http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-cdr\\_datos.asp?gr\\_cuenca\\_id=4](http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-cdr_datos.asp?gr_cuenca_id=4)
- CHG. (2018). *Comisaría de Aguas*. Obtido de Confederación Hidrográfica del Guadiana: <https://www.chguadiana.es/el-organismo/estructura-y-funciones/comisaria-de-aguas>
- Costa, J. B. (2004). *Caracterização e Constituição do Solo*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- ESDAC. (2001). *EUROPEAN SOIL DATA CENTRE*. Obtido de European Soil Database v2.0: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/datasets>
- European Environment Agency. (2017). *European environment Agency*. Obtido de Copernicus Land Monitoring Service - EU-DEM: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-eu-dem>
- Eurostat. (2016). *Eurostat Your key to European statistics*. Obtido em 12 de July de 2018, de <http://ec.europa.eu/eurostat>

- FAO. (1998). Crop Evapotranspiration. Em R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, & M. Smith, *FAO Irrigation and Drainage Paper nº 56*. Obtido de FAO IRRIGATION.
- FAO. (2000). *LAND COVER CLASSIFICATION SYSTEM*. Rome. Obtido de [http://www.fao.org/docrep/003/x0596e/X0596e00.htm#P-1\\_0](http://www.fao.org/docrep/003/x0596e/X0596e00.htm#P-1_0)
- FAO. (2009). *Harmonized World Soil Database*. Obtido de FAO - Harmonized World Soil Database : <http://www.fao.org/3/aq361e/aq361e.pdf>
- FAO. (2012\*). *FAO SOILS PORTAL*. Obtido de The Food and Agriculture Organization: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>
- FAO. (2015). *World reference base for soil resources 2014*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations .
- Gayathri, K. D., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. P. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 1001-1007.
- GEO PORTAL. (2018). *Geo Portal*. Obtido de Geoportal: [https://sig.mapama.gob.es/93/CienteWS/intranet/Default.aspx?nombre=CH\\_EST\\_ANOS\\_UTILES&claves=CLAVE&valores=4041](https://sig.mapama.gob.es/93/CienteWS/intranet/Default.aspx?nombre=CH_EST_ANOS_UTILES&claves=CLAVE&valores=4041)
- GEO PORTAL. (2018). *GEO PORTAL*. Obtido de GEO PORTAL: [https://sig.mapama.gob.es/93/CienteWS/intranet/Default.aspx?nombre=CH\\_EST\\_ANOS\\_UTILES&claves=CLAVE&valores=4055](https://sig.mapama.gob.es/93/CienteWS/intranet/Default.aspx?nombre=CH_EST_ANOS_UTILES&claves=CLAVE&valores=4055)
- Gilding, B. H. (1991). Qualitative Mathematical Analysis of the Richards Equation. *Kluwer Academic Publishers*, 651-666.
- Gleick, P. H. (1993). *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. New York: Oxford University Press.
- IPMA. (2015). *Portal do Clima - Alterações Climáticas em Portugal*. Obtido de <http://portaldoclima.pt/pt/>
- IPMA, AEMET. (2010). *Atlas Climático Ibérico*.
- J.H.M, W., Lilly, A., Nemes, A., & Bas, C. L. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Elsevier*, 169-185.
- Jackson, D. C. (2017). *Dams*. Routledge.
- JOINT RESEARCH CENTRE. (2018). *JOINT RESEARCH CENTRE*. Obtido de The European Commission's science and knowledge service: <https://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php>
- JRC. (2016). *Global Land Cover*. Obtido de EU SCIENCE HUB: <https://ec.europa.eu/jrc/en/scientific-tool/global-land-cover>
- Jury, W. A., Gardner, W. R., & Gardner, W. H. (1991). *Soil Physics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- LaL, R., & Shukla, M. K. (2004). *PRINCIPLES OF SOIL PHYSICS*. New York: Marcerl Dekker, Inc.
- Legate, D. R., & Jr., G. J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *WATER RESOURCES RESEARCH*, 233-241,.
- MARETEC. (2018). *MOHID*. Obtido de What is MOHID?: <http://www.mohid.com/pages/home/whatismohid.shtml>
- MARETEC. (2018). *MOHID Land*. Obtido de MOHID Water modeling System: [http://www.mohid.com/pages/models/mohidland/mohid\\_land\\_home.shtml](http://www.mohid.com/pages/models/mohidland/mohid_land_home.shtml)
- McCully, P. (2001). *Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams*. London: Zed Books Ltd.

- Milly, P. C., Dunne, K. A., & Vecchia, A. V. (1997). Global pattern of trends in streamflow and water. *Nature*.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 885-900.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources*, 513-522.
- Neal, J. C., Odoni, N. A., Trigg, M. A., Freer, J. E., Garcia-Pintado, J., Mason, D. C., . . . Bates, P. D. (2015). Efficient incorporation of channel cross-section geometry uncertainty into regional and global scale flood inundation models. *Journal of Hydrology*, 169-183.
- Neitsch, S. A. (2011). *Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation, Version 2009, Technical Report nº 406*. Tx, USA: Texas Water Resources Institute: College Station.
- Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *FreshWater Resources*, 1068-1072.
- Pechlivanidis, I., Jackson, B., McIntyre, N., & Wheeler, H. (2011). CATCHMENT SCALE HYDROLOGICAL MODELLING: A REVIEW OF MODEL TYPES, CALIBRATION APPROACHES AND UNCERTAINTY ANALYSIS METHODS IN THE CONTEXT OF RECENT DEVELOPMENTS IN TECHNOLOGY AND APPLICATIONS. *Global NEST*, 193-214.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Science*, 1636.
- Pestana, R., Matias, M., Canelas, R., Araújo, A., Roque, D., Zeller, E. V., . . . Heleno, S. (2013). Calibration of 2D Hydraulic Inundation Models in the floodplain region of the lower Tagus river. *ESA Living Planet Symposium*. Edinburgh: RIVERSAR .
- Quintana-Seguí, P. T.-M. (2017). *Validation of a new SAFAN-based gridded precipitation product for Spain and comparisons to Spain02 and ERA-Interim*, *Hydrol.* Obtido de <https://doi.org/10.5194/hess-21-2187-2017>
- Riad, S., Mania, J., Bouchaou, L., & Najjar, Y. (2003). Rainfall-Runoff Model Using an Artificial Neural Network Approach. *Mathematical and computer modelling*, 839-846.
- Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Galetti, M., Alamgir, M., Crist, E., . . . Laurance, W. F. (2017). World Scientists' Warning to Humanity: A Second Notice. *BioScience*, 1026-1028.
- Ritchie, J. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop within complete cover. *Water Resources Research*, 1204-1213.
- SNIRH. (2018). *Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos*. Obtido de SNIRH: <https://snirh.apambiente.pt/>
- Tombolini, I., Colantoni, A., Renzi, G., Sateriano, A., Sabbi, A., Morrow, N., & Salvati, L. (2016). Lost in convergence, found in vulnerability: A spatially-dynamic model for desertification risk assessment in Mediterranean agro-forest districts. *Elsevier*, 973-981.
- TRENBERTH, K. E., DAI, A. O., RASMUSSEN, R. Y., & PARSONS, D. B. (2003). THE CHANGING CHARACTER. *AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY*, 1205-1217.
- UNWATER. (2015). *The United Nations World Water Development Report 2015* . Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural.
- USDA-SCS. (1972). National Engineering Handbook. Em *Section 4, Table 10.1*.

- USGS. (2016). *Summary of the Water Cycle*. Obtido de The USGS Water Science School: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclesummary.html>
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science Society American Journal*, 892-898.
- WRG. (2009). *Charting our water future: Economic frameworks to inform decision-making*. Washington DC: 2030 WRG.

## Anexos

### Anexo A - Calibração de estações hidrométricas sem influência de albufeiras.

| Estação          | Registo nº anos | Caudal médio registado | Caudal médio simulado | NSE      | R2    | RMSE  | NRMSE | PBIAS     |
|------------------|-----------------|------------------------|-----------------------|----------|-------|-------|-------|-----------|
| 4004             | 7,0             | 0,719                  | 0,825                 | -61,430  | 0,027 | 2,517 | 0,867 | -14,731   |
| 4201             | 10,0            | 0,701                  | 1,314                 | -23,902  | 0,020 | 3,490 | 0,457 | -87,365   |
| 4224             | 8,7             | 0,167                  | 2,898                 | -586,059 | 0,172 | 7,103 | 2,310 | -1634,003 |
| 4108             | 9,7             | 0,464                  | 1,211                 | -1,044   | 0,830 | 1,673 | 0,131 | -160,874  |
| 4212             | 5,5             | 1,755                  | 2,307                 | 0,785    | 0,800 | 2,070 | 0,057 | -31,463   |
| 4218             | 3,6             | 2,386                  | 1,800                 | 0,505    | 0,734 | 5,761 | 0,099 | 24,557    |
| 4257             | 3,5             | 1,026                  | 1,603                 | 0,400    | 0,827 | 1,716 | 0,106 | -56,225   |
| Ponte Algalé     | 9,0             | 0,303                  | 0,136                 | 0,251    | 0,532 | 0,940 | 0,084 | 55,289    |
| Monte Pisão      | 9,0             | 0,788                  | 0,748                 | 0,739    | 0,757 | 1,000 | 0,049 | 5,112     |
| Entradas         | 10,0            | 0,151                  | 0,158                 | 0,778    | 0,787 | 0,263 | 0,043 | -4,519    |
| Monte da Ponte   | 9,8             | 2,500                  | 2,132                 | 0,753    | 0,805 | 3,335 | 0,046 | -3,993    |
| Oeiras           | 9,7             | 1,811                  | 2,158                 | 0,802    | 0,884 | 2,395 | 0,041 | -19,205   |
| Vascão           | 9,4             | 2,248                  | 2,535                 | 0,795    | 0,867 | 2,642 | 0,042 | -12,807   |
| Tenência         | 7,9             | 1,456                  | 1,382                 | 0,752    | 0,777 | 1,314 | 0,050 | 5,098     |
| Monte dos Fortes | 9,0             | 2,374                  | 1,313                 | 0,705    | 0,845 | 3,121 | 0,052 | 44,690    |

### Anexo B – Calibração de estações hidrométricas com influência de albufeiras.

| Estação        | Registo nº anos | Caudal médio registado | Caudal médio simulado | NSE      | R2    | RMSE     | NRMSE | PBIAS     |
|----------------|-----------------|------------------------|-----------------------|----------|-------|----------|-------|-----------|
| 4174           | 9,8             | 2,031                  | 7,867                 | -3,717   | 0,009 | 14,250   | 0,199 | -287,296  |
| 4214           | 6,0             | 1,490                  | 5,191                 | -1,346   | 0,646 | 6,034    | 0,182 | -248,290  |
| 4255           | 8,8             | 5,660                  | 6,171                 | 0,809    | 0,820 | 7,187    | 0,041 | -9,033    |
| Vendinha       | 10,0            | 1,008                  | 2,706                 | 0,206    | 0,854 | 3,147    | 0,082 | -168,536  |
| Rocha da Galé  | 10,0            | 51,737                 | 1799,943              | -139,763 | 0,818 | 1764,914 | 1,088 | -3379,054 |
| Pulo de Lobo   | 9,2             | 58,679                 | 1783,622              | -114,293 | 0,764 | 1737,024 | 0,988 | -2939,620 |
| Ponte Mourão   | 10,0            | 38,964                 | 1688,357              | -292,351 | 0,522 | 1657,986 | 1,570 | -4233,091 |
| Monte da Vinha | 8,4             | 22,255                 | 83,784                | -4,960   | 0,735 | 87,241   | 0,240 | -276,467  |
| Amieira        | 8,9             | 4,287                  | 4,005                 | 0,707    | 0,868 | 8,713    | 0,053 | 6,585     |

*Anexo C - Validação de estações hidrométricas sem influência de albufeiras.*

| Estação          | Registo nº anos | Caudal médio registado | Caudal médio simulado | NSE    | R2    | RMSE   | NRMSE | PBIAS    |
|------------------|-----------------|------------------------|-----------------------|--------|-------|--------|-------|----------|
| 4004             | 18,7            | 2,417                  | 3,106                 | -4,117 | 0,280 | 6,592  | 0,151 | -28,490  |
| 4201             | 15,7            | 1,816                  | 2,698                 | -6,418 | 0,127 | 6,322  | 0,198 | -48,533  |
| 4224             | 12,5            | 0,414                  | 3,873                 | -9,062 | 0,286 | 11,317 | 0,254 | -446,825 |
| 4108             | 12,1            | 1,587                  | 2,300                 | 0,736  | 0,852 | 2,129  | 0,042 | -44,866  |
| 4212             | 8,8             | 2,017                  | 1,894                 | 0,781  | 0,798 | 1,844  | 0,045 | 6,102    |
| 4218             | 9,5             | 4,597                  | 1,974                 | 0,198  | 0,350 | 7,385  | 0,081 | 56,622   |
| 4257             | 12,4            | 0,749                  | 1,804                 | -3,816 | 0,437 | 2,957  | 0,173 | -142,314 |
| Entradas         | 5,6             | 0,298                  | 0,278                 | 0,622  | 0,631 | 0,532  | 0,076 | 6,649    |
| Oeiras           | 5,4             | 3,433                  | 2,956                 | 0,892  | 0,908 | 2,512  | 0,041 | 13,910   |
| Vascão           | 4,8             | 2,623                  | 2,817                 | 0,894  | 0,898 | 1,948  | 0,042 | -7,393   |
| Monte dos Fortes | 5,3             | 3,279                  | 1,697                 | 0,550  | 0,755 | 4,841  | 0,084 | 49,118   |

*Anexo D - Validação de estações hidrométricas com influência de albufeiras.*

| Estação       | Registo nº anos | Caudal médio registado | Caudal médio simulado | NSE      | R2    | RMSE     | NRMSE | PBIAS     |
|---------------|-----------------|------------------------|-----------------------|----------|-------|----------|-------|-----------|
| 4174          | 11,3            | 3,837                  | 11,977                | -1,005   | 0,005 | 23,283   | 0,117 | -212,132  |
| 4214          | 16,0            | 5,374                  | 8,751                 | 0,649    | 0,716 | 90,030   | 0,043 | -62,831   |
| 4255          | 17,0            | 12,453                 | 8,236                 | 0,599    | 0,707 | 18,058   | 0,044 | 33,863    |
| Vendinha      | 5,1             | 1,795                  | 5,267                 | -1,535   | 0,814 | 6,915    | 0,201 | -193,372  |
| Rocha da Galé | 5,0             | 49,736                 | 1906,275              | -112,833 | 0,713 | 1890,031 | 1,389 | -3732,822 |
| Pulo de Lobo  | 4,9             | 145,796                | 1940,416              | -31,910  | 0,856 | 1817,102 | 0,735 | -1330,911 |
| Ponte Mourão  | 5,5             | 90,294                 | 1750,751              | -78,330  | 0,683 | 1676,213 | 1,088 | -1838,937 |
| Amieira       | 6,1             | 9,300                  | 8,654                 | 0,789    | 0,820 | 9,590    | 0,054 | 6,955     |

Anexo E - Propriedades de Albufeiras com dados relativos ao caudal de saída.

| Albufeira<br>(localização internacional) | Ano de<br>Início de<br>operação | Volume de<br>armazenamento<br>máximo (Hm³) | Longitude     | Latitude       |
|------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|---------------|----------------|
| Gasset (Es)                              | 1944                            | 38,9                                       | 3°56'16,07''W | 39°07'43,18''N |
| Penarroya (Es)                           | 1954                            | 50,3                                       | 3°00'24,63''W | 39°03'39,60''N |
| Cijara (Es)                              | 1958                            | 1 473,0                                    | 5°00'53,15''W | 39°22'23,34''N |
| Orellana (Es)                            | 1960                            | 782,3                                      | 5°32'16,15''W | 38°59'09,31''N |
| Garcia-Sola (Es)                         | 1962                            | 532,3                                      | 5°11'04,86''W | 39°08'39,59''N |
| Zujar (Es)                               | 1963                            | 656,4                                      | 5°28'42,60''W | 38°55'00,62''N |
| Caia (Pt)                                | 1967                            | 203,0                                      | 7°08'57,46''W | 38°59'51,93''N |
| El Vicário (Es)                          | 1978                            | 32,9                                       | 3°59'50,13''W | 39°03'33,80''N |
| Torre de Abraham (Es)                    | 1978                            | 183,4                                      | 4°15'16,30''W | 39°22'06,20''N |
| Lucefecit (Pt)                           | 1982                            | 10,2                                       | 7°24'21,66''W | 38°38'08,81''N |
| Beliche (Pt)                             | 1986                            | 48,0                                       | 7°30'33,22''W | 37°16'35,09''N |
| La Serena (Es)                           | 1989                            | 2 948,0                                    | 5°24'50,85''W | 38°54'43,60''N |
| Alange (Es)                              | 1990                            | 750,0                                      | 6°16'04,83''W | 38°47'14,53''N |
| Chanza (Es)                              | 1993                            | 339,8                                      | 7°31'14,92''W | 37°33'29,41''N |
| Horno Tejero (Es)                        | 1996                            | 23,0                                       | 6°25'59,10''W | 39°09'08,96''N |
| Los Canchales (Es)                       | 1996                            | 25,9                                       | 6°31'21,55''W | 38°57'51,01''N |
| Mollinos de Matachel (Es)                | 1996                            | 33,7                                       | 5°54'44,63''W | 38°18'49,54''N |
| Montijo (Es)                             | 1996                            | 10,8                                       | 6°25'44,10''W | 38°55'24,82''N |
| Villar del Rey (Es)                      | 1996                            | 130,0                                      | 6°51'59,87''W | 39°09'06,98''N |
| Odeleite (Pt)                            | 1997                            | 130,0                                      | 7°29'11,21''W | 37°19'51,96''N |
| Enxoê (Pt)                               | 1998                            | 10,4                                       | 7°27'54,78''W | 37°59'38,12''N |
| La Cabezuela (Es)                        | 2000                            | 42,8                                       | 3°16'36,01''W | 38°41'29,54''N |
| Vega Jabalon (Es)                        | 2000                            | 33,5                                       | 3°47'03,59''W | 38°45'35,89''N |
| Alqueva (Pt)                             | 2002                            | 4 150,0                                    | 7°29'43,22''W | 38°11'50,26''N |
| Açude de Pedrogão (Pt)                   | 2005                            | 106,0                                      | 7°37'45,42''W | 38°06'36,91''N |
| Andevalo (Es)                            | 2007                            | 634,0                                      | 7°23'55,18''W | 37°37'20,89''N |
| Cancho del Fresno (Es)                   | 2007                            | 15,0                                       | 5°23'25,33''W | 39°23'34,91''N |
| Cubilar (Es)                             | 2007                            | 6,0                                        | 5°28'35,35''W | 39,14'16,19''N |
| Gargalijas (Es)                          | 2007                            | 21,3                                       | 5°21'22,94''W | 39°11'14,21''N |
| Ruecas (Es)                              | 2007                            | 43,6                                       | 5°29'47,14''W | 39°16'03,72''N |
| Sierra Brava (Es)                        | 2007                            | 232,0                                      | 5°38'43,18''W | 39°11'34,33''N |
| La Colada (Es)                           | 2009                            | 57,4                                       | 5°00'36,27''W | 38°32'32,17''N |



*Anexo F - Propriedades de Albufeiras sem dados relativos ao caudal de saída.*

| Barragem<br>(localização<br>internacional) | Ano de<br>Construção | Volume máximo<br>de<br>armazenamento<br>(Hm <sup>3</sup> ) | Longitude     | Latitude       |
|--------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------|---------------|----------------|
| Piedra Aguda (Es)                          | 1956                 | 15,9                                                       | 7°01'18,59''W | 38°41'13,49''N |
| Valuengo (Es)                              | 1959                 | 19,6                                                       | 6°40'35,73''W | 38°18'06,80''N |
| Vigia (Pt)                                 | 1981                 | 16,7                                                       | 7°36'25,50''W | 38°32'17,16''N |
| Monte Novo (Pt)                            | 1982                 | 15,3                                                       | 7°42'35,90''W | 38°30'40,33''N |
| Nogales (Es)                               | 1991                 | 15,0                                                       | 6°44'04,24''W | 38°33'52,45''N |
| El Aguijon (Es)                            | 1995                 | 11,2                                                       | 6°55'13,36''W | 38°29'23,27''N |
| Abrilongo (Pt)                             | 2000                 | 19,9                                                       | 7°07'16,66''W | 39°05'46,79''N |
| Villaba (Es)                               | 2010                 | 106,4                                                      | 6°30'12,45''W | 38°34'52,10''N |

*Anexo G – Curva de operação utilizada na maioria das albufeiras sem caudal de descarga.*

| Curva de Operação          |                        |
|----------------------------|------------------------|
| Volume da albufeira<br>(%) | Descarga máxima<br>(%) |
| 0                          | 0                      |
| 40                         | 40                     |
| 60                         | 20                     |
| 95                         | 40                     |
| 96                         | 30                     |
| 97                         | 50                     |
| 98                         | 70                     |
| 99                         | 900                    |
| 100                        | 100                    |

*Anexo H – Diferentes propriedades do coberto vegetal na bacia do Guadiana.*

| Uso do Solo    | Dia de plantação (Dia Juliano) | LAI máximo (-) | Profundidade da raiz (m) | Temperatura óptima (°C) | Rácio Biomassa Energia (%) | Altura máxima (m) |
|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------|
| Cultivo        | 91                             | 3              | 2                        | 30                      | 33,5                       | 1                 |
| Arbórea Perene | 279                            | 5              | 3,5                      | 30                      | 15                         | 10                |
| Arbórea caduca | 91                             | 5              | 3,5                      | 30                      | 15                         | 6                 |
| Arbórea mista  | 91                             | 5              | 3,5                      | 30                      | 15                         | 6                 |
| Arbustiva      | 279                            | 2              | 2                        | 25                      | 34                         | 1                 |
| Herbácea       | -                              | 4              | 2                        | 25                      | 35                         | 0,5               |

*Anexo I – Parametrização final utilizada para os diferentes usos de solo.*

| Uso do Solo                  | Coefficiente de Manning [s.m <sup>-1/3</sup> ] | K <sub>c</sub> cultural [-] |
|------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------|
| Zona de cultivo              | 0,043                                          | 0,96                        |
| Zona arbórea de folha mista  | 0,225                                          | 0,95                        |
| Zona arbórea de folha caduca | 0,230                                          | 0,80                        |
| Zona arbórea de folha perene | 0,127                                          | 1,00                        |
| Zona herbácea                | 0,039                                          | 0,85                        |
| Zona arbustiva               | 0,058                                          | 0,90                        |
| Massa de água                | 0,035                                          | 0,00                        |

Anexo J –Propriedades das estações hidrométricas

| Estação          | Longitude     | Latitude      | Início dos Registos | último registo | Influencia de albufeiras                                                                             |
|------------------|---------------|---------------|---------------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4004             | 2°53'39,84"W  | 38°51'50,04"N | 01-10-1979          | 30-06-2014     | -                                                                                                    |
| 4201             | 3°04'33,24"W  | 39°40'22,80"N | 01-10-1979          | 30-09-2012     | -                                                                                                    |
| 4224             | 2°32'45,96"W  | 39°23'51,36"N | 01-10-1979          | 30-09-2012     | -                                                                                                    |
| 4108             | 4°22'55,56"W  | 38°54'28,80"N | 22-12-1983          | 14-06-2012     | -                                                                                                    |
| 4212             | 5°04'26,40"W  | 39°23'46,32"N | 01-10-1979          | 30-09-2012     | -                                                                                                    |
| 4218             | 5°11'35,88"W  | 39°23'35,88"N | 05-02-1988          | 30-09-2012     | -                                                                                                    |
| 4257             | 6°16'35,04"W  | 39°05'20,40"N | 01-10-1979          | 30-06-2014     | -                                                                                                    |
| Ponte Algalé     | 7°18'27,72"W  | 39°02'32,64"N | 17-02-1982          | 30-09-1994     | -                                                                                                    |
| Monte Pisão      | 7°18'57,36"W  | 39°07'57,36"N | 01-10-1981          | 30-09-1990     | -                                                                                                    |
| Entradas         | 8°01'51,60" W | 37°46'49,80"N | 01-10-1979          | 30-04-2001     | -                                                                                                    |
| Monte da Ponte   | 7°53'45,96"W  | 37°49'32,16"N | 01-10-1979          | 30-09-1997     | -                                                                                                    |
| Oeiras           | 7°43'03,36"W  | 37°38'44,88"N | 01-10-1981          | 17-06-2002     | -                                                                                                    |
| Vascão           | 7°34'22,44"W  | 37°30'50,04"N | 01-10-1981          | 30-09-2000     | -                                                                                                    |
| Tenência         | 7°29'20,76"W  | 37°22'33,60"N | 01-10-1981          | 30-04-2001     | -                                                                                                    |
| Monte dos Fortes | 7°37'41,88"W  | 37°19'52,32"N | 01-10-1979          | 30-04-2001     | -                                                                                                    |
| 4174             | 6°51'38,88"W  | 38°13'53,04"N | 01-10-1979          | 30-09-2012     | Valuengo                                                                                             |
| 4214             | 4°14'49,56"W  | 39°02'35,88"N | 01-10-1979          | 30-09-2012     | Torre de Abraham                                                                                     |
| 4255             | 6°56'58.92"W  | 38°57'19,80"N | 01-10-1979          | 30-06-2014     | Villar del Rey<br>Abrilongo                                                                          |
| Vendinha         | 7°42'52,20"W  | 38°30'01,80"N | 01-10-1981          | 30-04-2001     | Monte Novo<br>Vigia                                                                                  |
| Rocha da Galé    | 7°40'10,92"W  | 37°41'26,16"N | 01-10-1981          | 30-09-2009     | Açude de Pedrógão                                                                                    |
| Pulo de Lobo     | 7°40'30,72"W  | 37°49'45,12"N | 01-10-1981          | 28-02-2001     | Açude de Pedrógão                                                                                    |
| Ponte Mourão     | 7°24'00,00"W  | 38°24'47,88"N | 01-10-1981          | 31-07-2001     | Montijo<br>Chanchales<br>Villalba<br>Nogales Piedra<br>Aguda<br>Abrilongo<br>Caia Maior<br>Lucefecit |
| Monte da Vinha   | 7°05'5,64"W   | 38°51'40,32"N | 04-10-1979          | 26-06-2014     | Montijo<br>Chanchales<br>Villalba<br>Nogales<br>Abrilongo<br>Caia maior                              |
| Amieira          | 7°35'11,76"W  | 38°19'26,40"N | 10-10-1979          | 31-01-2002     | Monte Branco                                                                                         |

Anexo K – Parametrização final utilizada para os diferentes tipos de solo

| Parâmetro            | Regossolos | Leptosolos | Arenossolos | Fluvisolos | Cambissolos | Luvissolos | Planossolos | Vertissolos | Acrissolos |
|----------------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| $CN$<br>(-)          | 79         | 79         | 77          | 71         | 69          | 66         | 74          | 70          | 68         |
| $KS_1$<br>(cm/d)     | 200        | 18         | 550         | 22         | 70          | 85         | 85          | 6           | 85         |
| $KS_2$ (cm/d)        | 200        | 18         | 550         | 18         | 13          | 85         | 85          | 6           | 60         |
| $KS_3$ (cm/d)        | 200        | 18         | 550         | 18         | 13          | 18         | 85          | 60          | 60         |
| $\theta_{s1}$<br>(-) | 0,403      | 0,439      | 0,403       | 0,439      | 0,403       | 0,403      | 0,403       | 0,520       | 0,403      |
| $\theta_{s2}$<br>(-) | 0,350      | 0,300      | 0,350       | 0,392      | 0,392       | 0,392      | 0,481       | 0,481       | 0,481      |
| $\theta_{s3}$<br>(-) | 0,350      | 0,300      | 0,350       | 0,392      | 0,392       | 0,350      | 0,392       | 0,392       | 0,350      |
| $\theta_{r1}$<br>(-) | 0,025      | 0,010      | 0,025       | 0,010      | 0,025       | 0,025      | 0,025       | 0,010       | 0,025      |
| $\theta_{r2}$<br>(-) | 0,025      | 0,010      | 0,025       | 0,010      | 0,010       | 0,010      | 0,010       | 0,010       | 0,010      |
| $\theta_{r3}$<br>(-) | 0,025      | 0,010      | 0,025       | 0,010      | 0,010       | 0,025      | 0,010       | 0,010       | 0,025      |
| $\alpha_1$<br>(1/m)  | 3,830      | 3,140      | 3,830       | 3,140      | 3,830       | 3,830      | 3,830       | 3,670       | 3,830      |
| $\alpha_2$<br>(1/m)  | 3,830      | 3,140      | 3,830       | 2,490      | 2,490       | 2,490      | 0,198       | 0,198       | 0,198      |
| $\alpha_3$<br>(1/m)  | 3,830      | 3,140      | 3,830       | 2,490      | 2,490       | 3,830      | 2,490       | 2,490       | 3,830      |
| $n_1$<br>(-)         | 1,377      | 1,180      | 1,377       | 1,180      | 1,377       | 1,377      | 1,377       | 1,100       | 1,377      |
| $n_2$<br>(-)         | 1,377      | 1,180      | 1,377       | 1,170      | 1,170       | 1,170      | 1,086       | 1,086       | 1,086      |
| $n_3$<br>(-)         | 1,377      | 1,180      | 1,377       | 1,170      | 1,170       | 1,377      | 1,170       | 1,170       | 1,377      |
| $L$<br>(-)           | 0,500      | 0,500      | 0,500       | 0,500      | 0,500       | 0,500      | 0,500       | 0,500       | 0,500      |