



Trabalho de Projeto

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA DE INUNDAÇÕES

João Pedro Pereira Pescada

Leiria, setembro de 2019

Trabalho de Projeto

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA DE INUNDAÇÕES

João Pedro Pereira Pescada

Trabalho de Projeto de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, orientado pela Doutora Sandra Jesus Martins Mourato, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, setembro de 2019

Agradecimentos

Queria aproveitar para deixar um agradecimento especial a todas as pessoas que contribuíram em alguma forma para a concretização deste trabalho de projeto.

Primeiramente queria agradecer à minha orientadora, Doutora Sandra Jesus Martins Mourato, pela oportunidade que me foi dada de ingressar num grupo de trabalho extraordinário como foi o do Projeto FFAS e principalmente pela confiança que depositou em mim. Queria agradecer também por me transmitir os seus conhecimentos, ao longo de todos os anos da minha formação que foram um grande apoio para este trabalho.

Queria também agradecer à minha família que me deu a oportunidade de realizar uma formação académica e que estiveram sempre do meu lado quando precisei, em particular aos meus pais e avós, porque sem eles nada disto era possível.

Por fim queria agradecer a todos os meus amigos que sempre me apoiaram ao longo de todos estes anos por tudo o que me ensinaram e por todas as experiências que me proporcionaram.

Resumo

As cheias/ inundações que se têm vindo a observar nos últimos anos em Portugal, são um dos acontecimentos que mais prejuízos causa, desde perda de bens materiais a vidas humanas. O rio Águeda um dos afluentes do rio Vouga que nasce na Serra do Caramulo e que atravessa a área urbana de Águeda, apresentou em 2016 uma das maiores inundações dos últimos anos com tendência a tornarem este acontecimento cada vez mais frequente.

A bacia hidrográfica do rio Águeda é composta predominantemente por granito e xisto e apresenta uma grande impermeabilização. Os incêndios florestais que têm vindo a dizimar toda esta área e o país são uma contribuição para esta mesma impermeabilização do solo fazendo com que eventos como os de 2016 sejam cada vez mais frequentes.

Nesse sentido, foi desenvolvido um sistema que permite com dados de previsão de precipitação simular com antecedência os caudais e verificar quais as zonas inundadas na zona urbana de Águeda, permitindo assim, um aviso prévio à população de modo a mitigar todos os danos que possam ser causados por estes acontecimentos.

A parte que compete a este trabalho de projeto, foi a parte de validação e calibração dos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para que possam ser considerados e introduzidos no sistema de previsão e alerta de inundações para a zona urbana de Águeda (FFAS).

Numa fase inicial deste trabalho de projeto foi realizada a preparação e análise de grandes quantidades de dados de alturas de água em diversas estações hidrológicas e dados horários de precipitação desde 2007 a 2018.

Estes dados de entrada de precipitação e caudal observados foram utilizados na ferramenta de modelação hidrológica de modo a efetuar a sua calibração. Através dos valores de caudal observados é possível ajustar os valores de caudal simulados fazendo com que os resultados do modelo representem corretamente a realidade.

No que diz respeito à modelação hidrodinâmica, este modelo teve que ser primeiramente calibrado e só depois foram inseridos dados de caudal observados e dados de caudal simulados pela ferramenta de modelação hidrológica (após calibração) para simular certos eventos de modo a verificar qual a extensão de inundação.

Por fim fez-se uma comparação de resultados para averiguar qual o impacto que a ferramenta de modelação hidrológica apresenta nos resultados e qual o impacto do canal artificial construído na cidade de Águeda para defesa contra as inundações na zona urbana.

Palavras-chave: *Inundações, Modelação hidrológica, Modelação hidrodinâmica, Calibração e validação de modelos, Modelo Digital do Terreno*

Abstract

The floods that have been observed the last few years in Portugal, are one of the catastrophes that more damage causes since the loss of material goods to the loss of lives. Águeda river is one of the Vouga tributaries with source in Serra do Caramulo which crosses the urban area of Águeda, reported in 2016 one of the biggest floods of the last years with tendency of repeating itself more and more.

Agueda's river watershed is mainly composed of granite and schist which means that it has a great waterproofing. The wildfires that have been consuming all this area, and the country, are a contribution to this watershed waterproofing making the events from 2016 more and more common.

Thus, it was developed a system that allows with precipitation forecast data mimic with precedence the resulting flow and allows the user to check the potential flooded areas in the urban area of Águeda, allowing therefore the early warning to the population in order to mitigate all the damage that this events might cause.

The part of the system that this Master Thesis represents is the validation and calibration from the hydrologic and hydrodynamic models so they can be considered in the system of forecast and alert of floods to the urban area of Águeda (FFAS).

In a first stage of this thesis it was prepared and analyzed a big amount of data from multiple hydrologic stations and hourly data from rain stations from 2007 to 2018. This data was used in the hydrologic modeling tool in order to archive its calibration. Through the observed flow rate, it is possible to adjust the simulated values resulting on simulations that are more accurate regarding reality.

Concerning the hydrodynamic modeling tool, it had to be calibrated first and only then the observed flow data and resulting flow data from the hydrologic modeling tool (post calibration) were used in the simulation of certain events so that we can check the flooding extension in all the study area.

Finally, the results were compared to see what was the impact that the hydrologic modeling tool presents regarding the results and what impact comes from building the channel that deflects part of the flow that should go through the city of Águeda.

KeyWords: Floods, Hydrologic Modeling, Hydrodynamic Modeling, Calibration, and Validation, Digital Elevation Model

Lista de Figuras

Figura 1 Localização da zona de estudo em Portugal Continental	5
Figura 2 Regiões Hidrográficas em Portugal Continental	5
Figura 3 Incêndios Florestais na Bacia de Estudo.....	8
Figura 4 Tipos de Inundações	9
Figura 5 - Componentes de um SIG.....	10
Figura 6 - Interação dos SIG com o HEC-HMS	11
Figura 7 Localização das estações hidrométricas	16
Figura 8 Localização da estação meteorológica.....	17
Figura 9- Funcionamento do LIDAR	19
Figura 10 Tratamento e numeração dos dados de Batimetria	20
Figura 11 Mapa do Curve Number	21
Figura 12 Ciclo Hidrológico	22
Figura 13 Opções do Modelo Meteorológico	25
Figura 14 Opções de Controlo	25
Figura 15 Editor do SCS Curve Number Loss	26
Figura 16 Editor do SCS Unit Hydrograph Transform	27
Figura 17 Editor do Constant Monthly Baseflow	28
Figura 18 Editor do Lag Routing	28
Figura 19 Diferentes dimensões de células na área 2D.....	30
Figura 20 Representação na área 2D das estruturas adicionadas	30
Figura 21 MDT Bacia Hidrográfica de Águeda.....	38
Figura 22 Junção das sub-bacias de acordo com parâmetros em comum.....	46

Figura 23 Simulação apenas com os dias do evento de janeiro de 2013.....	48
Figura 24 Simulação de janeiro de 2013 com condições ideais de humidade do solo.....	48
Figura 25 Valores de SCS Curve Number Loss para cada sub-bacia	49
Figura 26 Criação de parâmetros de calibração no HEC-HMS	50
Figura 27 Atribuição dos valores máximos e mínimos da calibração do CN da bacia W1000	50
Figura 28 Valores e Calibração do “SCS Unit Hydrograph Transform”	51
Figura 29 Valores e Calibração do “Lag Routing”	51
Figura 30 Hidrograma referente a 16 a 22 de abril de 2008 na estação hidrométrica de Ribeiro	54
Figura 31 Hidrograma referente a 16 a 22 de abril de 2008 na estação hidrométrica de Ponte Redonda.....	54
Figura 32 Área 2D do caso de estudo.....	57
Figura 33 Diferentes tamanhos de malhas na zona de estudo	57
Figura 34 Correção manual das arestas de uma célula na malha 2D	58
Figura 35 Exemplo de uma BC Line.....	59
Figura 36 Break Lines inseridas na área 2D.....	59
Figura 37 MDT sem canal artificial	60
Figura 38 MDT com canal artificial.....	60
Figura 39 Localização da estação hidrométrica de Alhandra.....	61
Figura 40 Valores de altura de água simulados com diferentes coeficientes de Manning Vs altura de água observado em Ponte Águeda (2009)	63
Figura 41 Valores dos indicadores seleccionados para cada um dos coeficientes de rugosidade de Manning para o evento de 2009	63
Figura 42 Valores de altura de água simulados com diferentes coeficientes de rugosidade de Manning Vs altura de água observado em Alhandra (2018).....	64

Figura 43 Valores dos indicadores selecionados para cada um dos coeficientes de rugosidade de Manning para o evento de 2018	64
Figura 44 Extensão da inundação no MDT sem canal com valores de caudal observados	66
Figura 45 Extensão da inundação na zona urbana no MDT sem canal com valores de caudal observados.....	67
Figura 46 Extensão da inundação no MDT com canal com valores de caudal observados.....	68
Figura 47 Extensão da inundação na zona urbana no MDT com canal com valores de caudal observados.....	69
Figura 48 Extensão da inundação no MDT sem canal com valores de caudal simulados	70
Figura 49 Extensão da inundação na zona urbana no MDT sem canal com valores de caudal simulados.....	71
Figura 50 Extensão da inundação no MDT com canal com valores de caudal simulados	72
Figura 51 Extensão da inundação na zona urbana no MDT com canal com valores de caudal simulados.....	73
Figura 52 Simulação com valores observados Versus Simulação com valores simulados no modelo hidrológico HEC-HMS com MDT com canal para Ponte de Águeda	74
Figura 53 Simulação com valores observados Versus Simulação com valores simulados no modelo hidrológico HEC-HMS com MDT com canal na Zona Urbana.....	74
Figura 54 Comparação dos valores de altura de utilizando dados observados em Ponte de Águeda para o MDT com e sem canal	75
Figura 55 Comparação dos valores de altura de água simulados no modelo hidrológico HEC-HMS em Ponte de Águeda para o MDT com e sem canal.....	75
Figura 56 Comparação dos valores de altura de água utilizando dados de caudal observados na Zona Urbana para o MDT com e sem canal.....	76
Figura 57 Comparação dos valores de altura de água simulados no modelo hidrológico HEC-HMS na Zona Urbana para o MDT com e sem canal	76

Lista de Siglas

FFAS - Sistema de Previsão e Alerta de Inundação para a Zona Urbana de Águeda;

EU - União Europeia;

RCP4.5 - *Representative Concentration Pathways*;

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas;

INAG - Instituto Nacional da Água;

APA - Agência Portuguesa do Ambiente;

SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos;

MDT - Modelo Digital do Terreno;

HEC-HMS - *Hydrology Engineering Center - Hydrologic Modeling Systems*;

NSE - *Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient*;

HEC-RAS - *Hydrology Engineering Center - River Analysis System*;

EMA - Erro Médio Absoluto;

R - Correlação de Pearson;

R² - Coeficiente de Determinação;

RH4 - Região Hidrográfica 4;

BH - Bacia Hidrográfica;

SIG - Sistemas de Informação Geográfica;

IFOV - *Instantaneous Field of View ou Campo de Visão Instantânea*;

SRTM Plus - *Shuttle Radar Topography Mission v 3.0*;

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*;

NGA - *National Geospatial-Intelligence Agency*;

DLR - *Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt*;

ASI - *Agenzia Spaziale Italiana*;

ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*;

HEC-GeoHMS - *Geospatial Hydrologic Modeling Extension*;

HEC-GeoRAS – *Geospatial River Analysis System Extension*;

GDEM2 - *Global Digital Elevation Model 2*;

USGS – *United States Geological Survey*;

GMTED - *Global Multi-resolution Terrain Elevation Data*;

NED - *National Elevation Dataset*;

LIDAR - *Light Detection and Ranging*;

GPS - *Global Positioning System*;

CN - *Curve Number*;

SCS - *Soil Conservation Service*;

PRF 484 - *Peak Rate Factor 484*;

TIN - *Triangulated Irregular Network*;

Kc - *Coeficiente de Compacidade*;

K_L - *Índice de Alongamento Equivalente*;

K_f - *Fator de Forma*;

T_c - *Tempo de Concentração*;

Índice

<u>AGRADECIMENTOS</u>	V
<u>RESUMO</u>	VI
<u>ABSTRACT</u>	VIII
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	X
<u>LISTA DE SIGLAS</u>	XIII
<u>1 INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	4
<u>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	5
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	5
2.2 BACIA HIDROGRÁFICA	7
2.3 INCÊNDIOS FLORESTAIS	8
2.4 CHEIAS/INUNDAÇÕES.....	9
2.5 FERRAMENTAS SIG.....	10
2.6 MODELOS HIDROLÓGICOS	12
2.7 MODELOS HIDRODINÂMICOS.....	15
<u>3 METODOLOGIA</u>	16
3.1 RECOLHA DE INFORMAÇÃO	16
3.1.1 DADOS HIDROMÉTRICOS	16
3.1.2 DADOS METEOROLÓGICOS	17
3.1.3 DADOS DO TERRENO (MDT)	18
3.1.4 USO DO SOLO	21
3.1.5 MODELO HIDROLÓGICO.....	22

3.1.4	MODELO HIDRODINÂMICO.....	29
3.1.5	CALIBRAÇÃO	35
4	<u>CASO DE ESTUDO.....</u>	38
4.1	CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA BACIA	38
4.1.1	ÁREA DE DRENAGEM.....	38
4.1.2	FORMA DA BACIA	39
	<u>CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS</u>	45
5.1	EVENTOS CONSIDERADOS	45
5.2	CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO.....	46
5.3	CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	57
5.4	EXEMPLO DE APLICAÇÃO	65
5.4.1	SIMULAÇÃO COM DADOS DE CAUDAL OBSERVADOS	66
5.4.2	SIMULAÇÃO COM DADOS DE CAUDAL OBTIDOS PELO MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS.....	70
5.4.3	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	74
6	<u>CONCLUSÕES</u>	77
	<u>BIBLIOGRAFIA.....</u>	80
	<u>ANEXOS</u>	84
	ANEXO 1 FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO HEC-GEORAS.....	85
	ANEXO 2 CURVAS DE VAZÃO.....	86
	ANEXO 3 TABELAS DE COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING	87
	ANEXO 4 VALORES INICIAIS E CALBRADOS PARA CADA PARÂMETRO	90
	ANEXO 5 VALORES DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA CADA SIMULAÇÃO	91
	ANEXO 6 VALORES DE TODOS OS PARÂMETROS INICIAIS E CALBRADOS DA CAL2	92
	ANEXO 7 VALORES DO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING PARA ESTRADAS, ÁRVORES, CASAS, MUROS E BETÃO	93
	ANEXO 8 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA TODOS OS VALORES SELECIONADOS DO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING.....	95

1 Introdução

1.1 Enquadramento

As alterações climáticas são um fenómeno à escala global que catalisam a frequência e a intensidade de fenómenos extremos como as inundações. Ainda que se reconheça que a incerteza associada à caracterização dos cenários de alterações climáticas é ainda significativa, existe um consenso da relevância que os impactos das alterações climáticas representam no contexto do estudo das cheias e inundações. A magnitude e frequência das inundações não depende apenas de fatores meteorológicos e climáticos, mas também depende de fatores humanos. Estes podem ir desde mudanças na morfologia do rio, o acumular de entulho nas margens, alterações do uso do solo, até aos incêndios florestais que influenciam o escoamento superficial e a capacidade de drenagem.

As grandes cheias e inundações podem causar um vasto leque de problemas desde perdas de vidas a danos materiais, bem como danos a património cultural e ambiental. Ao longo dos últimos anos estes eventos têm vindo a verificar-se cada vez com maior frequência e intensidade por toda a Europa. Em resposta a este risco de incidente cada vez maior a União Europeia (UE) adotou em outubro de 2007 a Diretiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. Esta diretiva apresentou vários aspetos positivos, mas a falta de verba apresenta um grande entrave neste processo. Todos os países pertencentes à UE já começaram a implementar os Planos de Gestão de Riscos de Inundação, mas estes precisam de melhorias constantes.

Em menos de duas semanas em maio e junho de 2016 as inundações mataram 18 pessoas e custaram mais de 3700 milhões de euros a vários países da UE. Em maio e junho de 2013 ocorreram eventos semelhantes onde se registaram 26 mortes e custos acima de 13000 milhões de euros. Entre 1980 e 2017 os custos relacionados com inundações ascendeu aos 166000 milhões de euros e estima-se que estes prejuízos aumentem 20000 milhões de euros por ano até 2020's, 46000 milhões de euros por ano até 2050's e 98000 milhões de euros por ano até 2080's. (Ciabatti et al., 2018)

Segundo o portal do clima, comparando a precipitação observada em Portugal desde 1971 até 2000 com a esperada num cenário correspondente a um patamar de estabilização intermediário RCP4.5 (*Representative Concentration Pathways* referem-se a porção dos patamares de concentração que se prolongam até 2100, para os quais os modelos de avaliação integrada produzem cenários de emissões correspondentes [IPCC, 2013]), de 2011 até 2040, é possível verificar que a precipitação média anual passou de 882,1mm para uma estimada de 966,3mm, um aumento que torna cada vez mais propício a ocorrência destes eventos.

Em Portugal, o Instituto Nacional da Água (INAG) é o organismo com jurisdição sobre todo o território nacional e está inserido na Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Assim a direção de serviços de recursos hídricos do INAG têm como objetivo, garantir o funcionamento do “Sistema de Vigilância e Alerta de Cheias” integrado no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). O SNIRH é um sistema de monitorização dos recursos hídricos nacionais que é suportado por uma base de dados preparada para armazenar e divulgar publicamente dados hidro-meteorológicos e de qualidade de água superficial e subterrânea, recolhidos na rede de monitorização de recursos hídricos do Ministério do Ambiente.

Para dar resposta a estes incidentes surge a necessidade de ferramentas que permitam ajudar a minimizar estes efeitos. Com recurso a este tipo de softwares de modelação hidrológica e hidrodinâmica devidamente calibrados, é possível serem usados quer como ferramentas de estudo de cenários para futuras intervenções (obras), quer para prever com antecedência e com precisão futuros eventos de modo a mitigar os danos que possam vir a ser causados.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho de projeto, baseia-se na calibração e validação dos modelos hidráulicos e hidrológicos de modo a que possam ser considerados no FFAS. Para além deste objetivo principal existem também outras metas a atingir, como conhecer e compreender a frequência das inundações na área urbana de Águeda e tentar averiguar quais as medidas de mitigação do risco que já foram tomadas ou que podem vir a ser tomadas e perceber de que forma é que os incêndios florestais agravam este fenómeno (cheias/inundações).

Numa primeira fase do projeto, foram analisados e tratados os dados de altura de água em diversos pontos e valores de precipitação ao longo dos anos hidrológicos de 2007 a 2018, com o propósito de conhecer para os vários eventos a relação entre a precipitação e os hidrogramas de cheias de modo a calibrar o modelo para que este seja o mais preciso possível. Esta calibração está limitada, visto que os dados obtidos do SNIRH, apresentam algumas falhas e erros de medição e sendo estes dados de entrada no modelo, este está à sua mercê.

Numa segunda fase do projeto, foi efetuado trabalho de pré processamento do Modelo Digital do Terreno (MDT) com auxílio da ferramenta ArcGis, de modo a ser inserido no software de modelação hidrológica *Hydrology Engineering Center - Hydrologic Modeling Systems* (HEC-HMS), onde foi desenvolvida e calibrada toda a parte hidrológica do modelo. No caso da calibração do modelo hidrológico, o HEC-HMS permite que a calibração seja efetuada de uma forma automática, utilizando como função objetivo para análise dos resultados o *Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient* (NSE).

Numa terceira fase foi trabalhado e calibrado o modelo hidráulico recorrendo ao software de modelação hidrodinâmica *Hydrology Engineering Center - River Analysis System* (HEC-RAS). No caso do HEC-RAS a calibração foi feita manualmente e foi apoiada em quatro funções objetivo, *Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient* (NSE), o Erro Médio Absoluto (EMA), a correlação de Pearson (R) e o coeficiente de determinação (R^2) para determinar qual a melhor parametrização.

1.3 Organização do Trabalho

O presente trabalho é composto por 6 capítulos, o segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica onde são abordados algumas temáticas e conceitos base necessários à realização deste trabalho de projeto, como o conceito de bacia de estudo, os incêndios que afetaram a mesma, as ferramentas SIG utilizadas no desenvolvimento deste projeto bem como uma abordagem aos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos. Seguidamente no terceiro capítulo é feita uma recolha de informação no que diz respeito a dados hidrométricos e meteorológicos, funcionamento e composição dos Modelos Digitais do Terreno utilizados, os tipos de uso do solo na bacia em estudo, uma abordagem mais aprofundada no que diz respeito ao funcionamento das ferramentas de modelação utilizadas e a calibração efetuada. O quarto capítulo apresenta o caso de estudo, onde é caracterizada toda a bacia hidrográfica. No Capítulo cinco, é apresentado de que maneira os modelos hidrológico e hidrodinâmico foram calibrados e comparados exemplos de aplicação. Por fim o sexto capítulo apresenta as conclusões obtidas e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Considerações Gerais

Os recursos hídricos apresentam um papel importantíssimo de modo a assegurar o desenvolvimento do território em todas as suas vertentes. A zona de estudo representada na Figura 1 é banhada pelo rio Águeda, principal afluente do rio Vouga, e está inserido na Região Hidrográfica 4 (RH4) como representado na Figura 2. O rio Águeda é um rio que nasce na Serra do Caramulo, concelho de Oliveira de Frades mais precisamente na localidade de Varzielas e que conflui no rio Vouga.

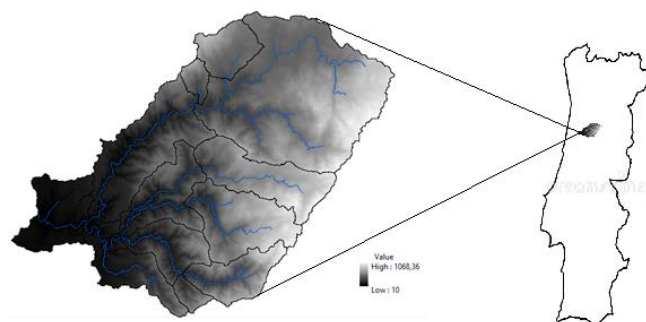


Figura 1 Localização da zona de estudo em Portugal Continental

Departamento Regional da APA (Água)	Região Hidrográfica	Bacias Hidrográficas
NORTE	RH1	Minho / Lima
	RH2	Cávado/ Ave/ Leça
	RH3	Douro
CENTRO	RH4	Vouga/ Mondego/ Lis
		Ribeiras do Oeste
TEJO	RH5	Tejo
ALENTEJO	RH6	Sado / Mira
ALGARVE	RH7	Guadiana
	RH8	Ribeiras do Algarve

Figura 2 Regiões Hidrográficas em Portugal Continental

A zona de Águeda é uma zona gravemente afetada por cheias e inundações, tendo praticamente todos os anos ocorrências relatadas de danos materiais, danos a imóveis, bem como estradas cortadas, terrenos agrícolas submersos e culturas destruídas devido a estes eventos. Os cenários de alterações climáticas projectão o agravamento destes problemas tornando estes eventos cada vez mais frequentes e com maior intensidade aumentando a destruição.

A capacidade de adaptação às alterações climáticas consiste na capacidade de implementação de medidas de adaptação de modo a minimizar os seus impactes. Esta capacidade advém de fatores sociais, económicos, políticos, ambientais, entre outros, que de alguma forma podem influenciar a implementação dessas medidas. Se esta capacidade de adaptação às alterações climáticas for reduzida, os impactes nos recursos hídricos podem tornar-se num grave problema de saúde pública e de sustentabilidade das próprias populações que tenham como principal setor de atividade a produção animal e agrícola. (Gomes, 2016)

As previsões apontam para que a precipitação seja menor no outono, primavera e verão e que os dias de inverno (estação chuvosa) sejam menores, mas com fenómenos de precipitação mais intensos o que potencia a ocorrência de cheias e inundações cada vez mais avassaladoras. Com estas alterações os dias de verão serão menos e com elevada tendência de secas o que potencia os incêndios florestais. Estes vão mais tarde acabar por contribuir para as estas cheias e inundações que se vão fazer sentir durante o inverno, pois aumentam o escoamento superficial e dificultam a infiltração, a matéria que não é completamente carbonizada vai para os rios e pode potenciar obstruções ao fluxo, agravando as consequências que destes advêm.

Por isso, é necessário estudar todos estes componentes que afetam a bacia hidrográfica de modo a conseguir dar uma resposta a eventos futuros. É através de acontecimentos passados e recorrendo a ferramentas de modelação hidrológica e hidrodinâmica que se pretende atingir este objetivo.

2.2 Bacia Hidrográfica

Entende-se por Bacia Hidrográfica (BH), a área drenada por um rio e seus afluentes, formada nas regiões mais altas do relevo por divisores de água, onde as águas das chuvas, ou escoam superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltram no solo para formação de nascentes e do lençol freático. As águas superficiais escoam para as partes mais baixas do terreno, formando riachos e rios, sendo que as cabeceiras são formadas por riachos que brotam em terrenos íngremes das serras e montanhas e à medida que as águas dos riachos descem, juntam-se a outros riachos, aumentando o volume e formando os primeiros rios, esses pequenos rios continuam seus trajetos recebendo água de outros tributários, formando rios maiores até desembocarem no oceano. (Teodoro et al., 2007)

As bacias hidrográficas podem ser divididas em sub-bacias, que são áreas de drenagem dos tributários do curso de água principal. No que toca a este termo, não existem uma opinião consensual no que diz respeito às áreas que as definem. Alguns autores defendem que as sub-bacias têm de apresentar áreas entre um conjunto de valores em km², outros apresentam esta mesma convicção, mas o intervalo de valores é definido em hectares e não km² e outros defendem que as bacias podem ser desmembradas num número qualquer de sub-bacias, dependendo do ponto de saída considerado ao longo do seu eixo-tronco ou canal coletor. Cada bacia hidrográfica interliga-se com outra de ordem hierárquica superior, constituindo, em relação à última, uma sub-bacia. (Teodoro et al., 2007)

2.3 Incêndios Florestais

Os incêndios florestais estão no cerne de vários acontecimentos que potenciam os riscos de cheia e de inundação. Após a destruição dos estratos arbóreos que servem de primeira proteção contra as gotas de chuva e dos estratos arbustivos e herbáceos que atuam como agentes fixadores do terreno e potenciam a infiltração, a resistência ao escoamento que anteriormente ao incêndio existia, desaparece. Isto resulta numa diminuição da infiltração da água no solo fazendo com que o escoamento superficial seja cada vez maior e em locais de elevada inclinação, por vezes este acumular de água que circula à superfície com o declive do terreno ganha caudal e velocidade arrastando para jusante cinzas, troncos, ramos, raízes e todo o tipo de compostos que não foram consumidos pelas chamas na totalidade. Em locais onde a largura do canal é reduzida, como é o caso de algumas pontes que obstruem parcialmente o canal com os seus suportes, estes sólidos levados em suspensão vão começando a ficar retidos até obstruírem por completo a passagem de água fazendo com que se inundem as zonas circundantes ao canal.

Na bacia em estudo deflagraram três grandes incêndios florestais, em 2013, em 2016 e em 2017 como se pode verificar na Figura 3 . Em 2013 arderam perto de 123 km² de área florestal, em 2016 houve um aumento desta área de cerca de 11% para os 136 km² sensivelmente. Em 2017 este número aumentou para uns assustadores 710 km².

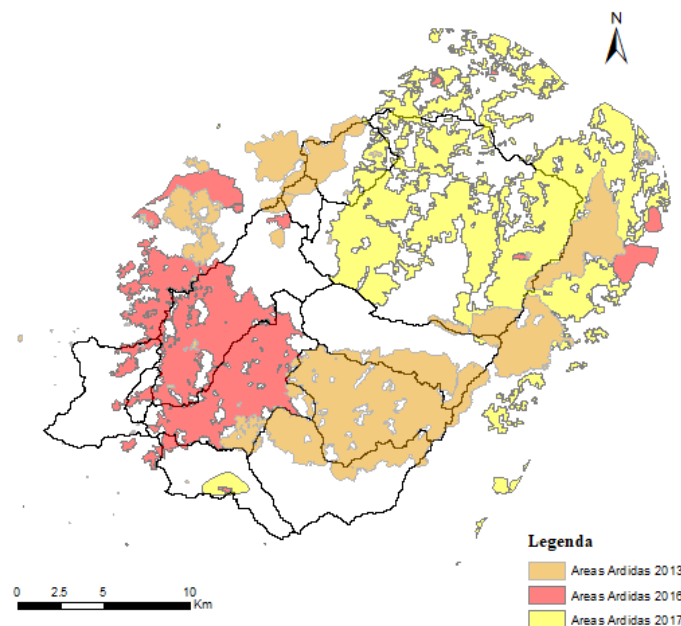


Figura 3 Incêndios Florestais na Bacia de Estudo

2.4 Cheias/Inundações

Cheias e Inundações são termos muitas vezes utilizados como sinónimos, o que não é correto, pois cheias podem originar inundações, mas nem todas as inundações se devem às cheias. As cheias são um fenómeno hidrológico extremo, de frequência variável, natural ou induzido pela ação humana, que ocorrem devido a uma precipitação muito intensa num curto espaço de tempo, fazendo com que o caudal do rio seja elevado excessivamente saindo da área do seu caudal normal e conseqüentemente inundando as suas margens. Estas, apresentam grande velocidade e enorme capacidade destruidora.

As Inundações, de acordo com o Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de outubro, são “a cobertura temporária por água de uma parcela do terreno fora do leito normal, resultante de cheias provocadas por processos naturais como a precipitação, incrementando o caudal dos rios, torrentes de montanha e cursos de água efémeros correspondendo estas a cheias fluviais, ou de sobrelevação do nível das águas do mar nas zonas costeiras”.

As inundações podem apresentar várias causas e podem ser divididas em vários tipos como é possível ver na Figura 4.(Ramos, 2009)

Tipo	Causa
Cheias	<ul style="list-style-type: none">• chuvas abundantes e/ou intensas• fusão da neve ou do gelo• efeito combinado da chuva com o efeito das marés e/ou de “<i>storm surge</i>” *• obstáculos ao escoamento fluvial ou derrocada dos obstáculos
Inundações de Depressões Topográficas	<ul style="list-style-type: none">• subida da toalha freática (natural ou artificial)• retenção da água da precipitação por um solo ou substrato geológico de permeabilidade muito reduzida• cheias
Inundações Costeiras	<ul style="list-style-type: none">• “<i>storm surge</i>” *• tsunamis ou maremoto• subida eustática do nível do mar• sismos com fenómenos de subsidência tectónica
Inundações Urbanas	<ul style="list-style-type: none">• chuva intensa com sobrecarga dos sistemas de drenagem artificiais• subida da toalha freática (natural ou artificial)• cheias

Figura 4 Tipos de Inundações

2.5 Ferramentas SIG

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são sistemas multidisciplinares de apoio à decisão, que armazenam, gerem, manipulam e permitem visualizar informação georreferenciada, ou seja, é um conjunto de ferramentas que manipula dados do mundo real para determinados propósitos. (González et al., 2012)

Os SIG, como Sistema de Informação, como se pode ver na Figura 5, apresentam cinco componentes essenciais que são o *hardware*, o *software*, os dados, os métodos e os utilizadores como componente humana.



Fonte: <https://www.geoaplicada.com/blog/sig-e-suas-aplicacoes/componentes-do-sig/>

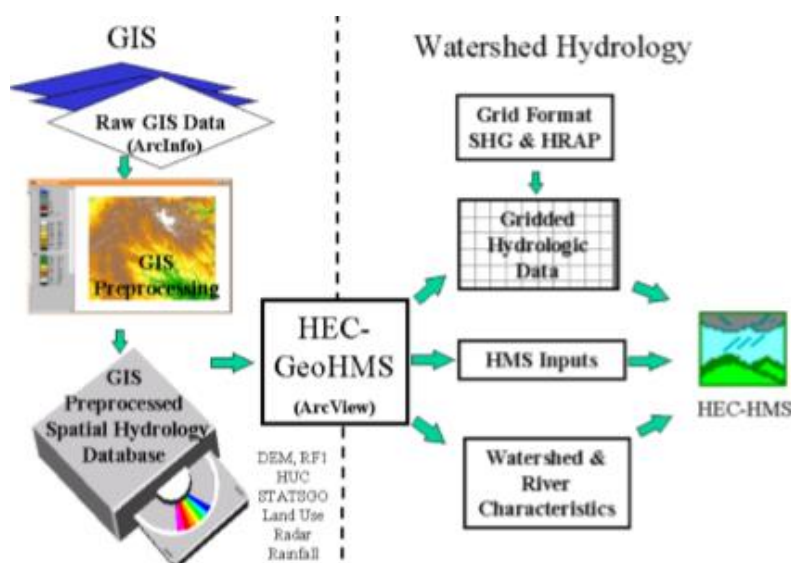
O *hardware*, como componente tem vindo a sofrer um grande avanço tecnológico ao longo dos últimos anos existe agora a possibilidade de um aumento da capacidade de armazenamento de dados e aumento da capacidade de leitura dos mesmos. O *software* que complementa o *hardware*, vai permitir manipular, gerir e analisar os dados que, aliado à melhoria do *hardware* e à diminuição dos preços destes, levou a uma expansão dos programas SIG. (González et al., 2012)

Os dados que contêm a informação georreferenciada como terceiro componente são os que implicam maior investimento, estimando-se que 70% dos custos de um projeto SIG provêm da aquisição de informação georreferenciada. Por sua vez, os métodos são o conjunto de práticas, procedimentos e de análises em SIG, que possibilitam obter resultados mais consistentes e admissíveis a partir de um SIG (González et al., 2012).

Por fim a componente humana é a que apresenta maior instabilidade em termos de sucesso/insucesso, isto porque depende de vários fatores como a experiência, área de formação e disponibilidade, entre outros.

A ferramenta SIG utilizada neste caso de estudo foi o ArcGis 10.5.1. Este *software* foi utilizado na primeira fase do projeto e com o auxílio da extensão *Geospatial Hydrologic Modeling Extension* (HEC-GeoHMS), que permite garantir a conectividade hidrológica, de modo a desenvolver o modelo hidrológico como ilustra a Figura 6. Para além desta extensão foi utilizada a extensão *Geospatial River Analysis System Extension* (HEC-GeoRAS) que permite processar dados geoespaciais para posterior utilização no *software* HEC-RAS, permitindo que o utilizador possa importar para o HEC-RAS dados obtidos a partir do MDT. No Anexo 1 está representado um fluxograma do funcionamento desta extensão.

Figura 6 - Interação dos SIG com o HEC-HMS



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/The-relationship-between-GIS-HEC-GeoHMS-and-HEC-HMS_fig1_229035685

2.6 Modelos Hidrológicos

Segundo Filho et al. (2012) a compreensão dos processos hidrológicos é essencial para os estudos de inundações, na gestão dos recursos hídricos e em projetos de obras hidráulicas. A modelação hidrológica é utilizada como ferramenta para obtenção de conhecimento aprofundado a respeito dos fenômenos físicos envolvidos e na construção de cenários.

A modelação advém da representação de um sistema físico através de equações, ou seja, neste caso de estudo em concreto, de que modo é que a bacia se vai comportar quando sujeita a determinadas quantidades de precipitação ao longo de um determinado período de tempo. Estas ferramentas de análise revelam-se importantes, porque podem ser usadas para entender processos hidrológicos, analisar o desempenho de práticas de gestão bem como avaliar os riscos e benefícios advindos de diferentes tipos de uso do solo.

O objetivo de um modelo hidrológico é determinar de forma precisa e eficaz, quais os componentes do ciclo hidrológico numa determinada bacia hidrográfica, e estimar o comportamento e a magnitude que a água representa nesta. Este pode ser representado matematicamente através do fluxo de água e dos seus constituintes sobre a bacia hidrográfica em estudo.

Os modelos hidrológicos podem ser classificados sob diferentes aspetos. Segundo o tipo de variáveis utilizadas na modelação podem ser classificados como estocásticos ou determinísticos e de acordo com tipo de relações entre essas variáveis podem ser classificados como empíricos ou conceituais. A forma de representação dos dados determina se são discretos ou contínuos, a existência ou não de relações espaciais determina se são concentrados ou distribuídos e por fim a existência de uma dependência temporal indica se são estacionários ou dinâmicos. (Filho et al., 2012)

Modelos Estocásticos e Determinísticos

Um modelo estocástico é um modelo que apresenta pelo menos uma das suas variáveis com comportamentos aleatórios, por exemplo um nível de água futuro de uma bacia hidrográfica é um exemplo de uma variável aleatória. Caso esta não seja considerada durante a elaboração do modelo, este será determinístico. No entanto o modelo pode ter uma variável de entrada aleatória e mesmo assim ser determinístico, desde que cada valor de entrada produz um único valor de saída.

Modelos Conceituais e Empíricos

Os modelos conceituais, consistem na representação dos processos físicos que envolvem o evento estudado e podem ser divididos em semi-conceituais e fisicamente baseados. Os semi-conceituais relacionam as características físicas do processo com conhecimentos gerais na definição dos parâmetros, já os fisicamente baseados aproximam-se bastante da física do sistema. Os modelos empíricos não apresentam nenhuma relação com os processos físicos, apenas utilizam funções que são baseadas em análises estatísticas.

Modelos Discretos e Contínuos

Os modelos hidrológicos discretos são aqueles que pretendem modelar períodos isolados de uma série, com o intuito de representar eventos de cheia ou recessão. Os modelos contínuos buscam representar longos períodos da série, examinando épocas de comportamentos hidrológicos diferentes, gerando modelos mais detalhados e desenvolvidos de modo a simular com maior exatidão todas as fases do ciclo hidrológico.

Modelos Concentrados e Distribuídos

Os modelos hidrológicos concentrados são aqueles que não têm em conta a variabilidade espacial das variáveis hidrológicas do processo, onde a principal variável é o tempo. Nestes modelos todas as variáveis como a precipitação, evaporação, infiltração, etc. são avaliadas em termos médios espaciais. Os modelos distribuídos, permitem representar a variabilidade espacial das características físicas da bacia, onde as variáveis e os parâmetros envolvidos dependem do tempo e do espaço. Normalmente estes modelos aplicam a lei da conservação da massa em escala local e apresentam uma grande quantidade de dados de entrada.

Modelos Estacionários e Dinâmicos

Os modelos hidrológicos estacionários são aqueles que apenas descrevem um fenômeno em determinado momento e onde os parâmetros não variam com o tempo ao contrário dos modelos dinâmicos.

O *software* de modelação hidrológica utilizado neste projeto foi o HEC-HMS, disponível em <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>, que pode ser caracterizado como:

- Estocástico, pois apresenta dados aleatórios de entrada, como é o caso da precipitação;
- Semi-conceitual, devido a relacionar algumas características físicas do processo com conhecimentos gerais para definir parâmetros;
- Discreto, visto que visa analisar períodos de tempo específicos onde se verificaram cheias;
- Distribuído, porque representam a variabilidade espacial das características físicas da bacia;
- Dinâmico, pois os parâmetros variam ao longo do tempo;

O HEC-HMS como todos os *softwares*, apresenta limitações. Algumas das limitações desta ferramenta remetem para a representação simplificada do escoamento. Esta simplificação dos modelos é uma limitação, mas por outro lado permite que os processos computacionais sejam eficientes. (Scharffenberg, W., 2016)

2.7 Modelos Hidrodinâmicos

Para determinar a extensão de inundação e a altura de água na zona inundada para diferentes eventos foi utilizada a ferramenta de modelação hidrodinâmica desenvolvida pelo *Hydrologic Engineering Center*, HEC-RAS, disponível em <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>. Este software é um modelo matemático que permite simular escoamento em canais naturais ou artificiais em condições de escoamento supercrítico, subcrítico ou misto.

O termo simulação refere-se ao processo de representação do comportamento de um sistema, assim a simulação do comportamento hidráulico através de modelos computacionais revelou-se uma prática comum porque esta ferramenta automatiza os cálculos iterativos, permitindo ao utilizador focar-se em grande parte nas decisões do projeto, considerando a complexidade dos cálculos reais dando uma maior confiança ao modelo e conseguindo assim que o modelo se comporte devidamente. Além disso, a facilidade e a velocidade com a qual estes modelos podem ser usados dão ao utilizador a possibilidade de explorar muitas alternativas sob várias condições, resultando num menor custo/benefício e em projetos mais robustos. (Neves, 2007)

Na modelação hidrodinâmica, existem dois tipos de modelos, os unidirecionais (1D) e bidirecionais (2D). Deve ser feita uma distinção entre estes dois modelos, pois os modelos 1D processam o escoamento tanto no canal como na zona inundante somente no eixo dos x 's, ou seja, longitudinalmente. As equações para modelar em 1D, derivam das equações da conservação da massa e da conservação do momento que se realizam entre os perfis transversais. Já os modelos 2D utilizam iterações ao longo da profundidade do canal e zona inundável, para obter valores médios de velocidade, que são resolvidos à base de equações matemáticas adequadas. (Cook, A.,2008)

Regra geral, se a proporção entre o comprimento e a largura da área em estudo for maior que 3:1, pode possivelmente vir a ser usado um modelo 1D, caso contrário o modelo 2D é o mais adequado. Por exemplo, se um rio tem 10000 m de comprimento e uma área inundada de 100 m de largura, o rácio é de 100:1, o que significa que um modelo 1D pode ser utilizado. Para um rio com 1000 m de comprimento, mas com uma área inundada de 5000 de largura, a proporção já é de 2:1 o que significa que o modelo 2D é o mais adequado. (Goodell, 2019)

3 Metodologia

3.1 Recolha de informação

3.1.1 Dados hidrométricos

Após analisadas todas as estações hidrométricas existentes na bacia, verificou-se que apenas as estações de Ribeiro, Ponte Redonda e Ponte Águeda, representadas na Figura 7, apresentavam séries de dados horários que permitiam ser usadas na modelação.

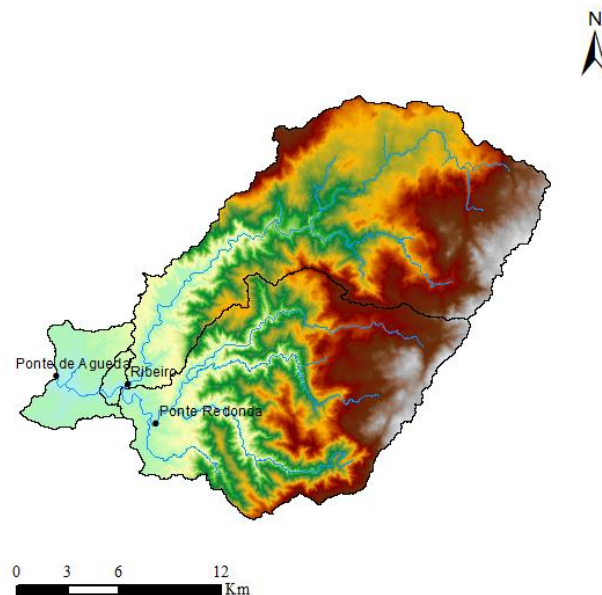


Figura 7 Localização das estações hidrométricas

Recolheram-se, através do site do SNIRH (<https://snirh.apambiente.pt/>) os dados horários dos níveis hidrométricos das 3 estações, para o período de 2007 a 2018. Apresentam-se no Anexo 2 as curvas de vazão para cada uma das estações. Com recurso a estas curvas de vazão é possível passar os dados de altura de água para valores de caudal que serão os dados necessários no HEC-HMS para calibração.

3.1.2 Dados meteorológicos

Os dados horários de precipitação foram obtidos da estação meteorológica de Varzeelas representada na Figura 8, que regista os valores de precipitação de uma forma contínua através de um udógrafo. Esta estação meteorológica foi selecionada, pois está instalada na nascente do rio Águeda.

Estes dados foram posteriormente tratados, pois como a informação está a ser enviada digitalmente para um servidor, podem e existem alguns lapsos no que diz respeito à regularidade dos dados, faltando por vezes valores em certas horas ou até mesmo não apresentar alguns períodos.

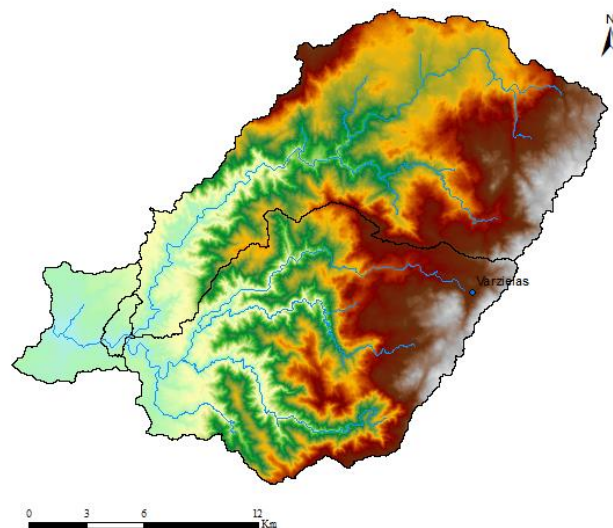


Figura 8 Localização da estação meteorológica

3.1.3 Dados do Terreno (MDT)

Os Modelos Digitais de Terreno (MDT's) constituem um modelo topográfico altimétrico resultantes de diversos tipos de informação geográfica tridimensional com especial destaque para dados altimétricos e hidrográficos. Estes são gerados digitalmente e representam a superfície ao nível do terreno, com a particularidade de não considerarem os valores altimétricos de edifícios, vegetação ou outros “obstáculos” do espaço digitalizado. A sua integração em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica proporciona grandes vantagens na execução de processos de análise e visualização da conjugação dessa informação com outra informação geográfica.

Cada MDT é representado por forma de estruturas matriciais e apresenta uma determinada resolução espacial. Este pode ser obtido através de um sensor a bordo de uma aeronave que com auxílio a uma matriz de pixéis (menor elemento que o sensor pode medir) representa a superfície em causa. O tamanho dos pixéis é a projeção geométrica do IFOV (*Instantaneous Field of View* - Campo de Visão Instantânea) e varia em função do ângulo de observação.

Para a modelação hidrológica foi utilizado o MDT à escala 1:25000 obtido através do *Shuttle Radar Topography Mission v 3.0 (SRTM Plus)*, desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em colaboração com a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), a *Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt* (DLR) e a *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI). Esta versão 3.0 vem corrigir a versão anterior do SRTM, incorporando dados topográficos que estavam em falta recorrendo ao *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), *Global Digital Elevation Model 2* (GDEM2), *USGS Global Multi-resolution Terrain Elevation Data* (GMTED) 2010 e *USGS National Elevation Dataset* (NED).

Para o modelo hidrodinâmico foi utilizado um modelo mais detalhado recorrendo ao *Light Detection and Ranging* (LIDAR) e a Batimetria. Através de um voo de uma aeronave equipada com um dispositivo emissor de um feixe de raios laser, que à medida que este se desloca oscila e emite impulsos laser para a superfície terrestre, ao atingir cada ponto da superfície, é refletido e captado novamente pelo dispositivo, onde o intervalo de tempo entre a emissão e a receção do feixe, multiplicado pela velocidade da luz, fornece a dupla distância que existe entre o dispositivo emissor e o ponto à superfície (Almeida, 2015). Através do *Global Positioning System* (GPS) equipado na aeronave consegue-se assim, determinar a cada momento, a posição espacial do emissor e a orientação do feixe de luz, para que assim se possa determinar as coordenadas tridimensionais de cada ponto à superfície, gerando assim o MDT como mostra a Figura 9.

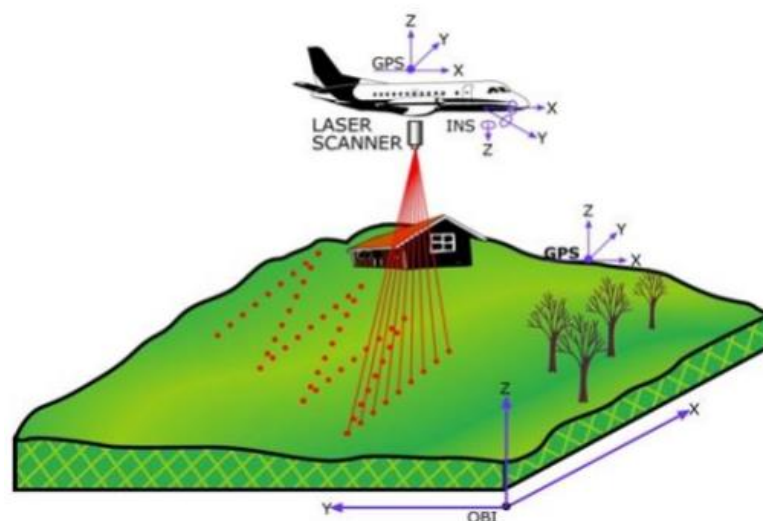


Figura 9- Funcionamento do LIDAR

Fonte: <http://www.xp-detectors.co.uk/wp-content/uploads/2015/10/lidar-1.jpg>

Para melhorar MDT recorreu-se à batimetria, pois sem esta não era possível obter o relevo do fundo do rio com precisão. A batimetria é a determinação e representação gráfica de relevo de fundo de áreas submersas como rios, mares e lagos. É expressa cartograficamente por curvas batimétricas que unem pontos com a mesma profundidade. O equipamento utilizado para obter esta informação é o ecobatímetro, que utiliza um emissor para originar ondas de radar e um relógio interno para medir o intervalo entre o momento de emissão e o seu retorno. Com o auxílio de um GPS consegue-se em tempo real obter o local exato com a profundidade desse mesmo ponto. No caso de estudo, foram medidos pontos de uma forma perpendicular ao sentido do rio de modo a formar perfis que foram posteriormente numerados de uma maneira específica para que possa ser incorporado no MDT final (MDT com LIDAR e Batimetria) como representado na Figura 10.



Figura 10 Tratamento e numeração dos dados de Batimetria

3.1.4 Uso do solo

Na modelação hidrológica o uso do solo foi considerado através do mapa de número de escoamento (*Curve Number* - CN) fornecido pela APA (<https://apambiente.pt/>) representado na Figura 11.

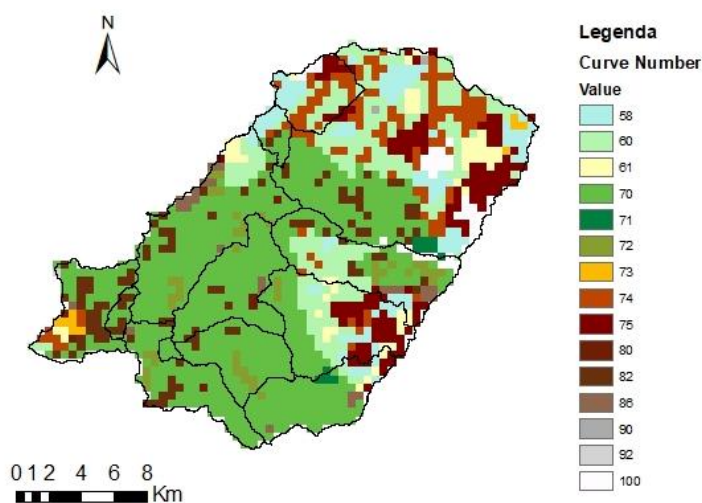


Figura 11 Mapa do Curve Number

A metodologia considerada no modelo hidrológico foi o método do *Soil Conservation Service* (SCS) desenvolvido pelo departamento da agricultura dos Estados Unidos, que processa o escoamento direto através de equações que necessitam como dados de entrada a precipitação e os números de escoamento (CN). Os CN representam o potencial de escoamento que uma determinada área de terreno. Para a modelação hidrodinâmica o uso do solo é considerado através do coeficiente de rugosidade de Manning Strickler.

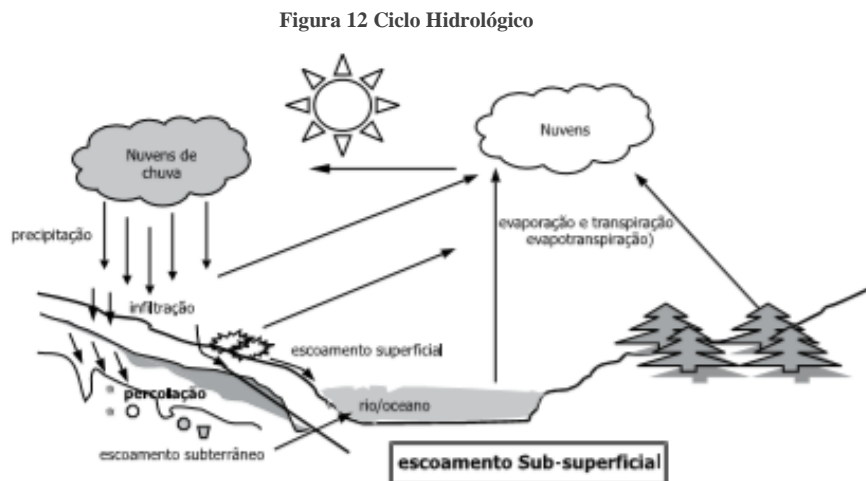
Os coeficientes de rugosidade representam a resistência que é oferecida à passagem de água num canal ou numa zona inundante. Os resultados da fórmula de Manning apresentam diversas aplicações na gestão do risco de inundações, criação de pontes e estradas que atravessam canais entre outros.

O mapa de uso do solo foi obtido através do processamento de dados de LiDAR, imagens aéreas e cartografia. As imagens aéreas foram usadas para produzir ortofotografias e a cartografia para produzir as delimitações dos edifícios em formato *raster*. Os valores atribuídos ao coeficiente de rugosidade Manning (Chow, 1959) estão tabelados de acordo com os fatores que afetam a rugosidade do canal e podem ser consultados nas tabelas no Anexo 3.

3.1.5 Modelo Hidrológico

Como os modelos hidrológicos podem ser designados como uma interpretação matemática do escoamento de água, e dos seus constituintes, sobre uma parte da superfície terrestre faz sentido mencionar o ciclo que a água percorre, o ciclo hidrológico.

Segundo Schiavetti e Camargo (2002) o ciclo hidrológico é um fenómeno natural que se baseia na circulação de água entre a superfície terrestre e a atmosfera (principalmente troposfera), que é dirigido pelo sol e está associado à gravidade e à rotação terrestre (Figura 12).



Fonte: *Schiavetti and Camargo, 2002 p.53*

Nestes últimos anos os avanços realizados nos Sistemas de Informação Geográfica geraram várias oportunidades para aperfeiçoar os modelos hidrológicos. Com a ajuda da internet e da partilha de informação por parte dos governos, vendedores comerciais e companhias privadas é possível integrar os SIG's nesta modelação com a fim de estudar as bacias hidrográficas.

Os modelos hidrológicos evoluíram também no sentido de ter em conta a precipitação e utilizam técnicas avançadas para modelar a bacia hidrográfica com um sistema de *grid* ou grelha. A precipitação e a infiltração podem ser processadas célula a célula o que faz com que o modelo apresente em relação a outras técnicas mais tradicionais um maior detalhe.

O HEC-GeoHMS foi um conjunto de ferramentas geoespaciais hidrológicas desenvolvido que permite ao utilizador visualizar a informação do terreno, documentos e características da bacia hidrográfica, realizar análises ao terreno, delinear sub-bacias e linhas de água e construir *inputs* para os modelos hidrológicos. Através do HEC-GeoHMS, inserido no ArcGis, é possível criar os ficheiros de output que podem ser usados diretamente no HEC-HMS da seguinte forma:

1. Obtenção de Dados:

Com a quantidade gigantesca de dados que existe atualmente, é necessário realizar um controlo para o que se pode e não pode usar no projeto. Utilizando os dados espaciais por exemplo, estes podem vir em diferentes formatos, resoluções, medidas entre outras, e neste sentido é preciso ter em especial atenção se os dados utilizados não apresentam propriedades diferentes. Existem outro tipo de fatores, como por exemplo o fator económico, a viabilidade do projeto pode ser arruinada se a obtenção de certos dados cruciais para o mesmo se revelar insustentável, por isso muitas das vezes os dados utilizados são comprados e nesse caso é sempre bom ter *metadata* para assegurar a fiabilidade da utilização de tais dados no projeto.

2. Conversão de Dados:

Os SIG podem utilizar uma grande quantidade diferente de dados e os utilizadores normalmente precisam de converter alguns ficheiros para um formato que lhe seja mais confortável. Isto permite que diferentes *layers* com o mesmo sistema de coordenadas possam ser sobrepostas e trabalhadas em simultâneo.

3. Pré-processamento do Terreno:

Usando o ficheiro do terreno (MDT) como *input* no projeto é necessário todo um processo para que se origine a rede de drenagem necessária. Este processo consiste em determinar a direção do escoamento, a acumulação da água, definição dos rios e a delimitação da bacia hidrográfica.

4. Criar um projeto HMS:

Este processo permite ao utilizador a criação de ficheiros que serão utilizados no HEC-HMS. O utilizador pode definir um ponto de saída da bacia que pretende realizar e o programa irá criar a partir desse ponto toda a bacia envolvente a montante.

5. Processamento da Bacia:

Após concluído o processo anterior, o utilizador tem ao seu dispor uma série de ferramentas interativas que lhe permite realizar modificações à bacia criada de acordo com as necessidades do projeto.

6. Atribuição das características da rede hidrológica:

Quando o processamento da bacia se encontra concluído, o utilizador pode extrair características físicas da mesma. Por exemplo, para um rio, as características físicas são o comprimento, declive, e elevações do ponto mais a montante e o ponto mais a jusante. Estas características são armazenadas e podem ser exportadas e utilizadas no HEC-HMS.

7. Definição de Parâmetros Hidrológicos:

Para além do utilizador poder extrair características físicas, pode também estimar valores iniciais de vários parâmetros hidrológicos, como o *Curve Number* (CN), que neste caso em particular foi fornecido numa *shapefile*, percentagem de áreas impermeáveis, uso do solo, tempo de concentração (tc) entre outros.

8. Ficheiros a importar para o HEC-HMS:

Assim que os processos anteriores tiverem sido concluídos, o Hec-GeoHMS compila uma série de ficheiros que podem ser exportados diretamente para o HEC-HMS.

Uma vez criado o projeto no HEC-HMS é necessário criar várias componentes. Após importar a bacia é necessário criar o **Modelo Meteorológico**. Este é um dos componentes principais do projeto, porque determina as condições meteorológicas dentro dos limites da bacia como mostra a Figura 13. As unidades do sistema são as unidades métricas e para o hietograma foi selecionada a opção “*Specified Hyetograph*”, que permite ao utilizador seleccionar o período exato de dados que pretende usar. Resolveu seleccionar-se esta opção visto que os dados de precipitação foram tratados à parte e foram importados sem quaisquer alterações para o programa.

Field	Value
Met Name	Met 1
Description	
Unit System	Metric
Shortwave	--None--
Longwave	--None--
Precipitation	Specified Hyetograph
Evapotranspiration	--None--
Snowmelt	--None--
Replace Missing	Abort Compute

Figura 13 Opções do Modelo Meteorológico

De seguida cria-se as **Opções de Controlo**, estas têm como principal objetivo, como o próprio nome indica, controlar quando é que a simulação começa e quando é que essa mesma termina bem como qual o intervalo de tempo que é usado para a simulação como ilustra a Figura 14.

Field	Value
Name	Control 1
Description	
*Start Date (ddMMYYYY)	27Jan2019
*Start Time (HH:mm)	00:00
*End Date (ddMMYYYY)	03Feb2019
*End Time (HH:mm)	23:00
Time Interval	1 Hour

Figura 14 Opções de Controlo

Os modelos hidrológicos necessitam quase sempre de blocos de dados em função do tempo. No caso dos dados de precipitação para estimar uma média que é precipitada na bacia durante um certo intervalo de tempo.

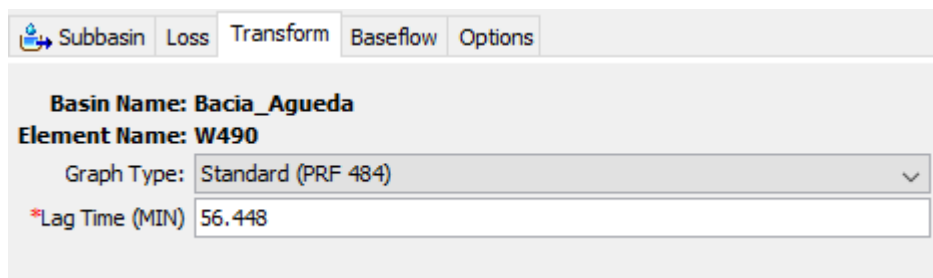
Para calibrar e otimizar o modelo os caudais observados tornam-se num dado bastante importante, visto que vão ser o termo de comparação com os valores simulados de modo a ajustar o modelo para que este seja uma representação da realidade o mais fiável possível. Para isso cria-se dentro da opção “*Time-Series Data*”, os “*Precipitation Gages*” e os “*Discharge Gages*”. Nos “*Precipitation Gages*” são introduzidos os dados de precipitação e nos “*Discharge Gages*” os dados de caudal observado em cada uma das estações de medição seleccionadas (Ponte Águeda, Ponte Redonda e Ribeiro) para que assim seja possível comparar os dados de caudal simulados aos dados de caudal observados.

Para além destes componentes, o modelo precisa de alguns parâmetros iniciais, que mais tarde vão ser submetidos à calibração. O primeiro é o “*SCS Curve Number Loss*” que implementa no modelo a metodologia do CN como representa a Figura 15. O programa processa incrementos de precipitação durante o período seleccionado, sendo estes recalculados ao fim de cada intervalo. A infiltração durante cada intervalo de tempo é a diferença de volume no fim de dois intervalos de tempo adjacentes.

Subbasin	Loss	Transform	Baseflow	Options
Basin Name: Bacia_Agueda				
Element Name: W410				
Initial Abstraction (MM)	<input type="text"/>			
*Curve Number:	<input type="text" value="58.732"/>			
*Impervious (%)	<input type="text" value="0.0"/>			

Figura 15 Editor do SCS Curve Number Loss

Outro parâmetro utilizado foi o “*SCS Unit Hydrograph Transform*” que define um hidrograma unitário curvilíneo através de definir primeiramente a percentagem do escoamento que ocorre antes do pico de cheia. O hidrograma normal apresenta um escoamento de cerca de 37.5% antes do pico de cheia. Esta definição corresponde ao *Peak Rate Factor 484* (PRF 484), que incorpora a percentagem de escoamento do hidrograma unitário antes do pico de cheia e todas as conversões unitárias quando se aplicam as equações com o sistema unitário dos Estados Unidos (Figura 16).



Subbasin	Loss	Transform	Baseflow	Options
Basin Name: Bacia_Agueda				
Element Name: W490				
Graph Type:		Standard (PRF 484) ▾		
*Lag Time (MIN)		56.448		

Figura 16 Editor do SCS Unit Hydrograph Transform

A percentagem de escoamento verificada antes do pico de cheia não é sempre a mesma para todas as bacias, pois varia consoante o comprimento das linhas de água, o declive e outras propriedades das bacias em causa.

No caso do *baseflow* foi selecionada a opção “*Constant Monthly*” que permite ao utilizador especificar um *baseflow* constante para cada mês do ano como ilustrado na Figura 17. É utilizada maioritariamente para simulações contínuas em sub-bacias onde o *baseflow* se aproxima de um valor relativamente constante ao longo de todo o mês.

Month	Baseflow (M3/S)
*January (M3/S)	2
*February (M3/S)	2
*March (M3/S)	2
*April (M3/S)	2
*May (M3/S)	0.65
*June (M3/S)	0.65
*July (M3/S)	0.65
*August (M3/S)	0.65
*September (M3/S)	0.65
*October (M3/S)	0.65
*November (M3/S)	0.65
*December (M3/S)	2

Figura 17 Editor do Constant Monthly Baseflow

Por fim, para o parâmetro do *Routing* foi utilizado o “*Lag Routing*”, que representa e traduz as ondas de cheia. Este parâmetro representa o tempo (em minutos) que o hidrograma inicial demora a ser traduzido. O caudal de entrada (*inflow*) do rio é deferido (em minutos) por uma quantidade igual ao “*Lag*” especificado que depois se torna em caudal de saída (*outflow*). É utilizado para segmentos pequenos de rio, com um tempo de trajeto previsível e que não varie com a profundidade. O editor deste parâmetro está representado na Figura 18.

*Lag (MIN)	33.449
------------	--------

Figura 18 Editor do Lag Routing

3.1.4 Modelo hidrodinâmico

O HEC-GeoRas é um conjunto de procedimentos, utilidades e ferramentas, que se encontra inserida no ArcGIS, desenhada para processar dados geoespaciais e utilizá-los no *software* HEC-RAS. Para produzir um ficheiro que possa ser utilizado no HEC-RAS, este deve conter um MDT num formato de *Triangulated Irregular Network* (TIN) ou GRID, podendo o utilizador escolher que tipo de *layers* (pontos, linhas ou polígonos) quer utilizar no projeto.

O formato TIN é um modelo vetorial que define as estruturas representando-as como uma rede de polígonos e que permite armazenar informação extra em áreas de elevada complexidade, sem necessitar de utilizar uma grande quantidade de dados redundantes. Consequentemente este formato só permite que sejam armazenados dados relativos a cumes, linhas de água e outras características topológicas principais, que possam ser digitalizadas à precisão requerida.

O formato GRID é um método que pode utilizar tanto uma rede triangular como é o caso do TIN, como também uma rede quadrada. Utilizando uma rede quadrada é possível armazenar dados de uma maneira mais fácil, normalmente com coordenadas de altura (z) ao longo do eixo dos x's e y's, com um ponto de partida específico e um tamanho de célula definido, o que simplifica a criação de um MDT.

No HEC-RAS é possível fazer uma análise com um modelo 1D, híbrido (1D/2D) e 2D. Optou por se realizar uma análise 2D, pois revelou ser um método muito mais eficaz, intuitivo, estável e simples em relação aos outros. Apesar de possuímos dados das *Cross-Sections* do terreno, criadas no ArcGis o modelo a 1D torna-se muito mais conflituoso em alguns casos, como por exemplo, em conflitos entre *cross-sections* de diferentes canais onde o software não reconhecia o sentido do escoamento ou simplesmente não conseguia interpretar a passagem de água por esse mesmo canal.

O MDT resultante da junção da informação do LIDAR e da Batimetria apresentava uma resolução de 5 cm, no entanto, por uma questão de economia de tempo visto que o objetivo final deste modelo é entrar num programa de alerta é importante que estas simulações demorem o menor tempo possível sem comprometer os resultados. Para verificar qual o tamanho do pixel ótimo foi feito uma análise de sensibilidade com 20 cm, 40 cm, 80 cm e 100 cm de célula. Após testar o tempo de simulação de cada um destes MDT's com estes

tamanhos de células, concluiu-se que o MDT com 40 cm era o ideal apresentando um bom detalhe e um tempo de simulação acessível.

Uma vez importado o MDT necessário para o modelo hidrodinâmico, é necessário criar uma geometria associada ao mesmo. Este processo passou pela criação de um modelo totalmente em 2D onde foi delimitada área da zona de estudo com células quadradas de 50mX50m, o rio foi delineado com uma malha mais pequena (5mX5m) para dar maior precisão ao processo como ilustra a Figura 19.

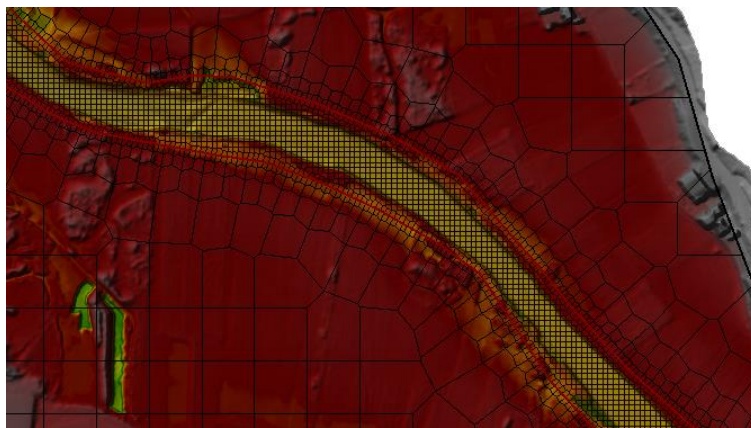


Figura 19 Diferentes dimensões de células na área 2D

Foram também adicionadas algumas estruturas que impedem alguns pontos de verterem água de modo a corrigir certos lapsos do terreno no MDT como ilustrado na Figura 20. Foram também inseridos os valores de coeficiente de rugosidade de Manning para os tipos de cobertura do solo presentes que foram posteriormente calibrados à medida que se efetuaram simulações, até se obter uma simulação satisfatória.

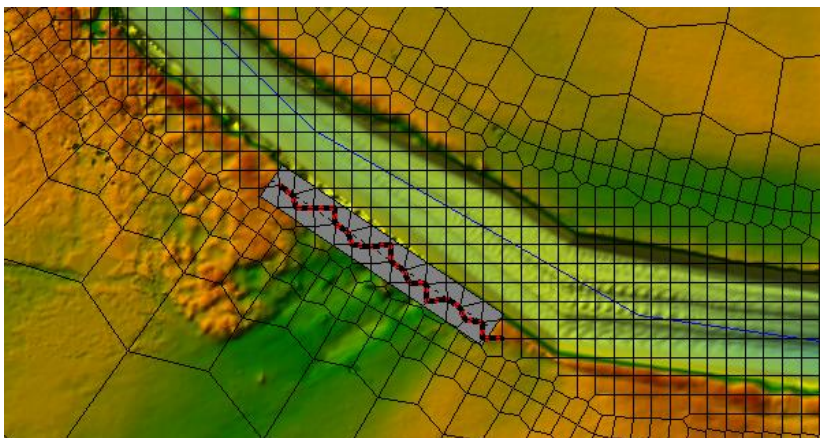


Figura 20 Representação na área 2D das estruturas adicionadas

Para que se efetuem cálculos é necessário adicionar condições de fronteira (*Boundary Conditions*). Estas condições de fronteira identificam a zona de início e de fim da área de estudo e as suas condições de escoamento. Na condição de fronteira a montante é utilizado o *Unsteady Flow*, onde é colocado o caudal que aflui ao ponto inicial da área de estudo (Confluência de Ribeiro com Ponte Redonda, este caudal é resultado da simulação do HEC HMS), na condição de fronteira a jusante foi utilizado o *Normal Depth*, (considerando um regime uniforme) que permite ao utilizador decidir um declive e o HEC-RAS utiliza a equação de Manning os cálculos.

Criando um plano de “*Unsteady Flow Data*” é possível decidir o intervalo de tempo que se pretende analisar, e onde o utilizador pode seleccionar se pretende que o programa faça:

- *Geometric Preprocessor* processa os dados geométricos com as tabelas hidráulicas e curvas de vazão. Isto permite acelerar a simulação sem ser necessário calcular as variáveis hidráulicas para cada *cross-section* como é o caso do modelo 1D.
- *Unsteady Flow Simulation* é um processo de três fases. A primeira fase é ler os dados introduzidos e converter para o intervalo selecionado pelo utilizador, seguidamente corre o programa **RasUnsteady.exe**, que interpreta as tabelas hidráulicas que foram processadas no *Geometric Preprocessor*, como também as *Boundary Conditions* e os dados de caudal inseridos. Por fim na última fase é corrido um programa chamado **RasDSSWriter.exe** que retira os resultados do **RasUnsteady.exe** onde processa e apresenta os dados num ficheiro HEC-DSS. (existe uma opção de analisar o transporte de sedimentos, mas não foi utilizada neste projeto)
- *Post-Processor* processa informação hidráulica detalhada para um período definido pelo utilizador, durante o período do *Unsteady Flow Simulation*.
- *Floplain Mapping* permite criar mapas de inundação estáticos (opção não utilizada no projeto).

Existem também *Computation Settings* que permitem seleccionar o intervalo de computação, o intervalo do *output* do hidrograma, o intervalo do *output* do *RAS Mapper* e o *Detailed Output Interval* que permite escrever perfis de elevação da superfície da água num determinado intervalo de tempo.

Para além disto como se está a trabalhar com um modelo em 2D existem opções de computação adicionais e tolerâncias. Uma das funções que é possível utilizar é o Efeito de Coriolis, que não foi tido em consideração e que tem em conta na solução apresentada os efeitos da rotação da Terra. Para isto ser possível deve ser conhecida a Latitude do ponto central da Área 2D (em graus).

Os outros parâmetros são:

- Theta(0.6 – 1.0): Este é o fator implícito que é usado para medir as derivadas espaciais usadas para resolver as diferenças finitas que provêm da fórmula de St. Venan também conhecida como “*Dynamic Routing Equation*”. A equação de St. Venan acata alguns pressupostos:
 - O escoamento é unidimensional;
 - A pressão hidrostática é única e não existem acelerações verticais;
 - A curvatura do canal é mínima;
 - O declive do fundo do canal é mínimo;
 - As equações de Manning e de Chezy são usadas para descrever a resistência provocada ao escoamento;
 - O fluido é incompressível;
 - Os limites do canal são considerados fixos e não sofrem erosão ou deterioração;

O valor padrão é de 1 que apresenta as soluções mais estáveis, mas à custa de alguma precisão, já com 0.6 apresenta uma solução mais precisa, mas o modelo revela-se mais instável. Após a realização de alguns testes o valor padrão revelou-se uma solução melhor e por isso foi o valor utilizado ao longo de todo o processo.

- *Theta Warm-up* (0.6 -1.0): Este é o valor de Theta usado para os tempos de “*Warm Up*” ou “*Ramp Up*” do modelo. Foi mantido o valor tanto para o “*Warm Up*” como para a simulação.

- *Water Surface Calculation Tolerance* (max = 0.06 m): Tolerância para o valor final das iterações. Se a solução numérica das equações for menor que o valor definido, então fica resolvido com esse intervalo de tempo. Caso isto não se verifique e o valor final seja superior ao valor definido, o programa volta a iterar para obter um valor melhor. Estas iterações apresentam um máximo e são definidas pelo utilizador. Valor padrão e utilizado de 0.03.
- *Volume Tolerance* (m): Este parâmetro funciona do mesmo modo que o anterior, mas neste caso para o volume da massa de água. Optou por se deixar no valor padrão igual ao valor do *Water Surface Calculation Tolerance*, 0.03.
- *Maximum Iterations* (0 – 40): Iteração máximas que o utilizador define para resolver ou tentar resolver o conjunto de equações com valores satisfatórios para o utilizador. Optou por se deixar no valor padrão, 20 iterações.
- *Equation Set* (Onda Difusa): Este parâmetro permite ao utilizador a escolha de equação *Diffusion Wave* ou equação *Full Momentum*. Foi utilizada a equação de Onda Difusa por se revelar mais estável e correr mais rapidamente.
- *Initial Condition Ramp up Time* (hrs): Este parâmetro permite que quando a simulação inicie o modelo já se encontre húmido e não completamente seco, o chamado “Warm Up” do modelo, o que permite que a simulação corra de um modo mais fluído. Foi definido um intervalo de 48hrs para o aquecimento para todas as simulações após a realização de alguns testes.

- *Initial Conditions Ramp up Fraction (0 -1)*: Permite inserir uma fração das condições iniciais do parâmetro anterior que será utilizado para aumentar as condições da área 2D em estudo de seco para o *inicial flow* da simulação definido.
- *Number of Time Silences (Integer Value)*: Permite ao Utilizador seleccionar uma fração do intervalo de tempo do intervalo de simulação. Por exemplo se o intervalo de computação da simulação é de 10 mins e o valor inserido neste campo for de 5, faz com que o intervalo de computação para a área 2D seja de 1/5 ou seja 2 mins. Neste caso de estudo em particular o valor deste parâmetro é igual ao valor de simulação, ou seja, 1.
- *Eddy Viscosity Transverse Mixing Coefficient*: Permite adicionar a opção de turbulência no escoamento. Turbulência é a transferência de momento através de movimentos caóticos das partículas da água ao longo da superfície e objetos por que passam. Este parâmetro no HEC-RAS é modelado através do “coeficiente de viscosidade de Eddy” e necessita de ser calibrado. No caso de estudo não foi utilizado, visto que o escoamento é considerado uniforme.
- *Boundary Condition Volume Check*: Esta opção é utilizada para verificar potenciais erros de volume quando se conectam zonas 1D com 2D. Como no caso de estudo o modelo é totalmente 2D, esta opção não foi utilizada.
- *Latitude for Coriolis*: Esta opção só se usa quando se utiliza a equação *Full Momentum*, o que basicamente viabiliza o efeito de rotação da Terra no modelo. Quando é utilizado, devem ser inseridas as coordenadas de latitude do centro da área 2D em graus que varia de -90 a 90 graus, sendo que valores negativos apontam para locais no hemisfério sul e valores positivos para o hemisfério norte. Esta opção não foi considerada no presente caso de estudo.

3.1.5 Calibração

A calibração começa com a estimativa de um determinado parâmetro inicial e ajusta-a à medida que se vai efetuando simulações até se obter um resultado o mais perto do observado possível. As funções objetivo utilizadas no processo de calibração foram, o *Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient* (NSE), o Erro Médio Absoluto (EMA), a Correlação de Pearson (R) e o Coeficiente de Determinação (R^2).

O NSE é utilizado para avaliar o poder de previsão de um modelo hidrológico. Varia entre $-\infty$ e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 melhor é o poder de previsão do modelo e é calculado através da seguinte fórmula:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \overline{Q_0})^2}$$

Onde:

Q_0 é a média das descargas observadas;

Q_m é a descarga modelada;

Q_0^t é a descarga observada a um tempo t .

O Erro Médio Absoluto é a diferença entre duas variáveis contínuas, X e Y que expressam o mesmo fenómeno. É calculado através da seguinte fórmula:

$$EMA = \frac{|Obs.-Sim.}|}{Obs.}$$

Onde:

- Obs. representa os valores de altura de água observados;
- Sim. representa os valores de altura de água simulados;

O Coeficiente de Correlação de Pearson é um índice sem dimensão situado entre -1.0 e 1.0 inclusive e reflete a extensão de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. É calculado através da seguinte fórmula:

$$r = \frac{\Sigma(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x-\bar{x})^2(y-\bar{y})^2}}$$

Onde:

- x representa a matriz de valores observados;
- \bar{x} representa a média da matriz de valores observados;
- y representa a matriz de valores simulados;
- \bar{y} representa a média da matriz de valores simulados;

O Coeficiente de Determinação consiste numa modelação estatística linearizada em relação aos valores observados, variando entre 0 e 1, onde 0 é 0% e 1 é 100%, indicando o quanto o modelo se consegue ajustar à amostra. É calculado através da seguinte fórmula:

$$R^2 = \text{Coeficiente de Pearson}^2$$

Assim, o modelo hidrológico foi calibrado automaticamente através da ferramenta “*Optimization Trial*” que permite otimizar os parâmetros para cada troço de rio, bem como para todas as sub-bacias. No caso dos rios o que é calibrado é o *Lag* (diferença de tempo entre o pico máximo de precipitação e o pico máximo de caudal) e nas sub-bacias é o *Curve Number* bem como *Lag*.

Depois de tantos eventos de cheias repetidos na zona de Águeda, foi construído em 2015 um canal artificial com início a montante da cidade e fim logo a jusante da ponte velha, com o intuito de canalizar o excedente de água por outro caminho e reduzir assim as inundações na cidade. Por isso a partir de 2015 não é possível utilizar para o modelo hidrológico os dados fornecidos pelo SNIRH para a estação hidrométrica de Ponte de Águeda pois parte do caudal estará a ser desviado pelo canal. Para eventos de 2015 a 2018 foi feita uma soma dos valores de caudal das estações hidrométricas de Ribeiro e Ponte Redonda para efeitos de comparação.

No caso do modelo hidrodinâmico a calibração foi feita apenas para o coeficiente de rugosidade de Manning. Para além desta calibração foi feita uma análise de sensibilidade ao tempo que o modelo precisa para humidificar o solo de modo a que aquando do começo da simulação o modelo já se encontre com o solo devidamente humidificado. Os valores do coeficiente de rugosidade de Manning foram calibrados através dos indicadores supracitados, *Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient*, o Erro Médio Absoluto, a correlação de Pearson e o coeficiente de determinação.

4 Caso de Estudo

4.1 Caracterização Fisiográfica da Bacia

4.1.1 Área de Drenagem

A Bacia Hidrográfica é uma determinada área de terra delimitada que drena as águas superficiais a um ponto comum, ou seja, é um conjunto de águas superficiais que convergem em direção a um determinado local. A Figura 21 representa a bacia hidrográfica do caso de estudo.

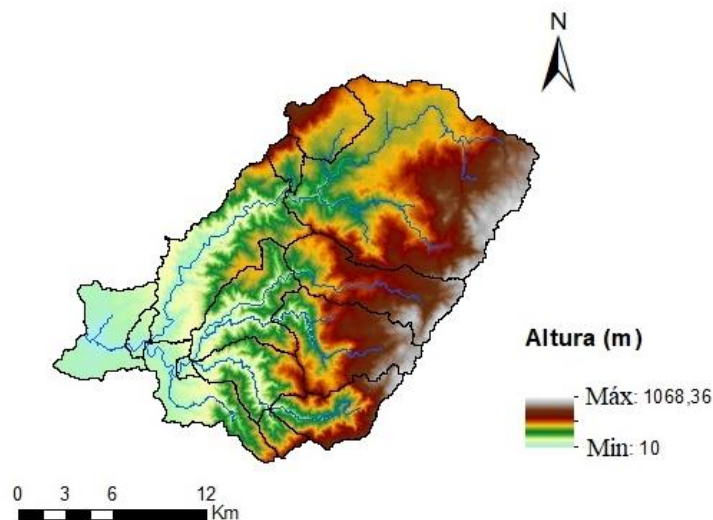


Figura 21 MDT Bacia Hidrográfica de Águeda

Esta bacia hidrográfica apresenta as seguintes características fisiográficas:

- Área de Drenagem: 407,89 km²;
- Perímetro: 140,00 km;
- Comprimento Rio Águeda: 29,54 km;
- Comprimento Rio Alfusqueiro: 41,53 km;
- Comprimento Confluência até Ponte de Águeda: 5,67 km;
- Área de Drenagem do Rio Alfusqueiro (Ribeiro): 205,39 km²;
- Área de Drenagem do Rio Águeda (Ponte Redonda): 151,52 km²;

- Área de Drenagem Alhandra: 384,55 km².

Para caracterizar a bacia em estudo, foram calculados alguns parâmetros, nomeadamente, o coeficiente de compacidade (K_c), o índice de alongamento equivalente (K_L), fator de forma (K_f) e o tempo de concentração (t_c).

4.1.2 Forma da Bacia

Coeficiente de Compacidade (K_c):

O coeficiente de compacidade ou índice de Gravelius, valor adimensional, relaciona a forma da bacia com um círculo e define-se como a relação que existe entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de área igual à da bacia (Guimarães, 2017).

O K_c varia com a forma da bacia, sendo 1 o valor mais baixo que pode apresentar onde o perímetro da bacia é igual ao perímetro do círculo com área igual ao da bacia. Quanto maior for o K_c menos compacta a bacia é e apresenta uma maior tendência para ocorrência de cheias.

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \pi * R^2 \Leftrightarrow R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \\ K_c = \frac{P}{2\pi * R} \Leftrightarrow K_c = \frac{P}{2\pi * \left(\frac{\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}}\right)} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow K_c = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \Leftrightarrow K_c = 0,28 * \frac{140,000}{\sqrt{407,890}} = 1,940: \end{array} \right.$$

Onde:

A é a área da bacia em km²;

P é o perímetro da bacia em km;

R é o raio da circunferência em km.

O valor que a bacia em estudo apresenta em relação ao coeficiente de compacidade é de 1,940. O valor da unidade e consequentemente o valor mais baixo que se pode obter e que representa uma bacia circular onde a tendência à enchente será tanto maior quanto mais

próximo da unidade for este coeficiente. Logo através deste valor podemos concluir que esta bacia não está sujeita a grandes enchentes.

Índice de Alongamento Equivalente (K_L):

Considerando um retângulo equivalente à área da bacia em estudo, este fator representa a relação entre o comprimento (L_{eq}) e a largura (b_{eq}) desse mesmo retângulo, onde se considera uma bacia alongada a partir de valores superiores a 2.

Este parâmetro só se verifica se $P^2 \geq 16 * A$, então:

$$\begin{cases} P^2 = 140,00^2 = 19600,000 \\ 16 * A = 16 * 407,89 = 652,624 \\ P^2 \geq 16A \end{cases}$$

$$\begin{cases} P = 2 * (L_{eq} + b_{eq}) \\ A = L_{eq} * b_{eq} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} L_{eq} = \frac{P}{4} + \sqrt{\frac{P^2}{16} - A} \\ b_{eq} = \frac{P}{4} - \sqrt{\frac{P^2}{16} - A} \end{cases} \Leftrightarrow K_L = \frac{L_{eq}}{b_{eq}} = \frac{63,585}{6,415} = 9,912$$

Onde:

P é o perímetro da bacia em km;

A é a área da bacia em km²;

L_{eq} é o comprimento de um retângulo de área equivalente à da bacia;

b_{eq} é a largura de um retângulo de área equivalente à da bacia.

É por isso possível concluir, que como a bacia apresenta um valor de índice de alongamento equivalente de 9,912, e sendo este superior a 2, considera-se uma bacia alongada.

Fator de Forma (Kf):

O Fator de forma é a relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia (da foz ao ponto mais longínquo a montante). Uma bacia com Kf baixo encontra-se menos sujeita à ocorrência de cheias, que outra do mesmo tamanho, mas com um Kf maior, já que numa bacia mais alongada a probabilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo toda bacia é mais pequena, o que leva a que a probabilidade de ocorrerem cheias seja menor.

$$Kf = \frac{A}{Lx^2}$$

Onde:

A é a área da bacia em km²;

Lx é o Comprimento Axial da bacia em km.

Em baixo é apresentado o cálculo dos vários fatores de forma para as diferentes sub-bacias que apresentam o ponto de desaguamento em:

- Ponte Águeda: $Kf = \frac{407,89}{33,93^2} = 0,351$
- Ponte Redonda: $Kf = \frac{151,52}{19,34^2} = 0,405$
- Ribeiro: $Kf = \frac{205,39}{24,19^2} = 0,354$
- Alhandra: $Kf = \frac{384,55}{29,17^2} = 0,452$

Em relação ao fator de forma, foi realizado o cálculo deste parâmetro para as sub-bacias dos rios tributários podendo verificar-se que como confirmou o valor do coeficiente de compacidade todas estas sub-bacias estão pouco sujeitas a enchentes.

Tempo de Concentração (tc):

Existe um intervalo de tempo que uma gota de água demora desde o seu ponto de queda no solo, no ponto hidráulicamente mais afastado da bacia, até que chegue à secção de saída. É considerado como uma característica constante da bacia, independentemente das características da precipitação. O tempo máximo que a gota de água demora a fazer este percurso é definido como tempo de concentração.

A fórmula utilizada para determinar o tempo de concentração da bacia em estudo, foi a fórmula de Giandotti, pois é possível ser aplicada para bacias de pequenas e grandes dimensões (170 a 70 000 km²).

$$Tc = \frac{4*\sqrt{A}+1,5*L}{0,80*\sqrt{H}}$$

Onde:

Tc é o tempo de concentração em horas;

A é a área da bacia em km²;

L é o comprimento da linha de água principal em km;

\bar{H} é a altura média da bacia em metros;

- Ponte Águeda: $Tc = \frac{4*\sqrt{407,89}+1,5*47,20}{0,80*\sqrt{420,40}} = 14,8h$

- $L = 41,53 + 5,67 = 47,20 \text{ km}$

- Ponte Redonda: $Tc = \frac{4*\sqrt{151,52}+1,5*41,53}{0,80*\sqrt{420,40}} = 6,80h$

- Ribeiro: $Tc = \frac{4*\sqrt{205,39}+1,5*29,54}{0,80*\sqrt{420,40}} = 6,19h$

- Alhandra: $Tc = \frac{4*\sqrt{384,55}+1,5*43,58}{0,80*\sqrt{420,40}} = 8,77h$

- $L = 41,53 + 2,051 = 43,58 \text{ km}$

Capítulo 5 – Apresentação de Resultados

5.1 Eventos Considerados

A estação meteorológica utilizada para obter os dados de precipitação, como já referido anteriormente, foi a estação de Varzielas. Foram selecionados vários eventos, de 2007 até 2018, onde se verificou uma elevada quantidade de precipitação num curto espaço de tempo, podendo por isso haver variações significativas no caudal do rio. Os dados fornecidos são dados de precipitação horários e foram depois analisados e tratados para correção de eventuais lapsos.

Para as estações hidrométricas, os dados foram novamente obtidos através do SNIRH desde 2007 até 2018. As estações de Ribeiro, Ponte Redonda e Ponte Águeda, fornecem dados hidrométricos instantâneos e foram as que permitiram reduzir o número de eventos que foram selecionados a partir da quantidade de informação que foi disponibilizada. Os períodos de dados selecionados foram aqueles que garantiam valores em todas as estações hidrométricas em simultâneo, pois não é possível comparar os resultados sem valores observados.

Os eventos selecionados foram os seguintes:

- 1 de junho a 26 junho de 2007 (jun07);
- 1 novembro a 31 dezembro de 2007 (nov07);
- 1 a 30 de abril de 2008 (abr08);
- 24 abril a 15 junho de 2009 (abr09);
- 1 dezembro de 2009 a 5 janeiro de 2010 (dez09);
- 1 janeiro a 25 janeiro 2010 (jan10);
- 18 fevereiro a 8 março de 2010 (fev10);
- 15 abril a 1 maio de 2010 (abr10);
- 1 a 31 de outubro de 2010 (out10);
- 15 janeiro a 15 fevereiro de 2013 (jan13);
- 25 janeiro a 25 de fevereiro de 2015 (jan15);
- 1 abril a 10 de maio de 2015 (abr15);
- 1 a 15 de janeiro de 2016 (jan16);

5.2 Calibração do modelo Hidrológico

A representação da bacia hidrográfica no modelo hidrológico foi pré-processada no HEC-GeoHMS. É necessário juntar sub-bacias que partilham características semelhantes, como o uso do solo e as áreas aridas que afetaram a bacia.

A Figura 22 representa os processos de junção que foram efetuados, a negrito o aspeto final da bacia que foi inserida no HEC-HMS e as outras áreas com diversas cores representam todas as sub-bacias iniciais.

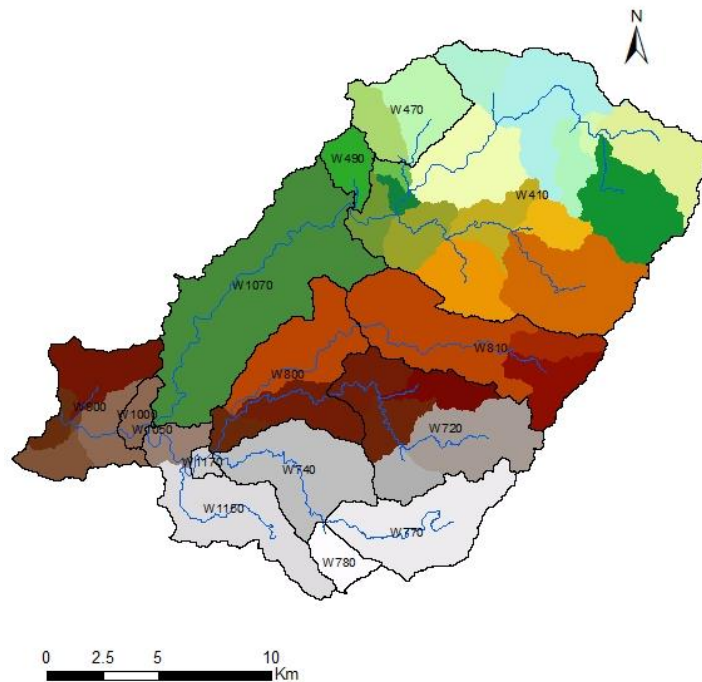


Figura 22 Junção das sub-bacias de acordo com parâmetros em comum

Das 39 sub-bacias existentes inicialmente originaram 16 sub-bacias que serão calibradas. Nestas 16 sub-bacias estão inseridas todas as estações hidrométricas nomeadamente a W1170 é a sub-bacia onde se localiza a jusante da estação hidrométrica de Ponte Redonda, a W1050 é a sub-bacia localizada a jusante estação hidrométrica de Ribeiro e por fim a W900 é a sub-bacia localizada a jusante estação hidrométrica de Ponte Águeda.

Está também inserida nestas 16 sub-bacias a estação meteorológica de Varzielas e está localizada a montante da sub-bacia W810. Por fim o ponto da confluência dos dois tributários do rio Águeda localiza-se na sub-bacia W1010, onde se obtêm os dados de caudal que vão ser utilizados, como dados de entrada, no modelo hidrodinâmico.

A criação destas bacias passou por um processo exaustivo onde surgiram vários problemas. Algumas sub-bacias não permitiam a junção por não possuírem a mesma confluência apesar de partilharem o mesmo tipo de uso do solo e de serem afetadas pelos mesmos incêndios. Assim teve de se contornar o problema através da abrangência de algumas sub-bacias de menor dimensão até fazer a ligação à sub-bacia desejada (W490 e W470).

A partir de 2015 devido à criação de um canal artificial, que tem início um pouco antes da cidade de Águeda e que volta a ingressar no rio principal já depois do final da cidade, não é possível utilizar os valores observados na estação hidrométrica de Ponte Águeda para o modelo hidrológico, porque parte da água sofre um desvio antes de chegar a esta estação hidrométrica. A bacia W1010, foi uma bacia que foi criada por necessidade de logo a jusante à junção do rio Alfusqueiro com o rio Águeda, ter um ponto que correspondesse à condição de fronteira de montante do modelo hidrodinâmico.

Após o pré processamento e definição de todos os aspetos hidrológicos, as simulações foram efetuadas com um passo de cálculo de 1 hora com dados horários tanto para os valores de precipitação como para os valores de caudal. As simulações efetuadas são simulações muito rápidas, visto que a quantidade de dias analisados de cada vez não é muito elevada, o que resulta num tempo de simulação de apenas alguns segundos. Isto torna-se bastante importante, para o projeto FFAS, visto que a necessidade de alertar a população o quanto antes é muito importante e simular eventos em apenas alguns segundos é uma grande vantagem.

Realizada a primeira simulação, como se pode ver na Figura 23 a linha preta representa os valores observados e a linha azul representa os valores simulados. É possível verificar que em bora os dois gráficos não sejam exatamente iguais, apresentam o mesmo aspeto, isto é, os valores simulados aumentam nos mesmos pontos que os observados.

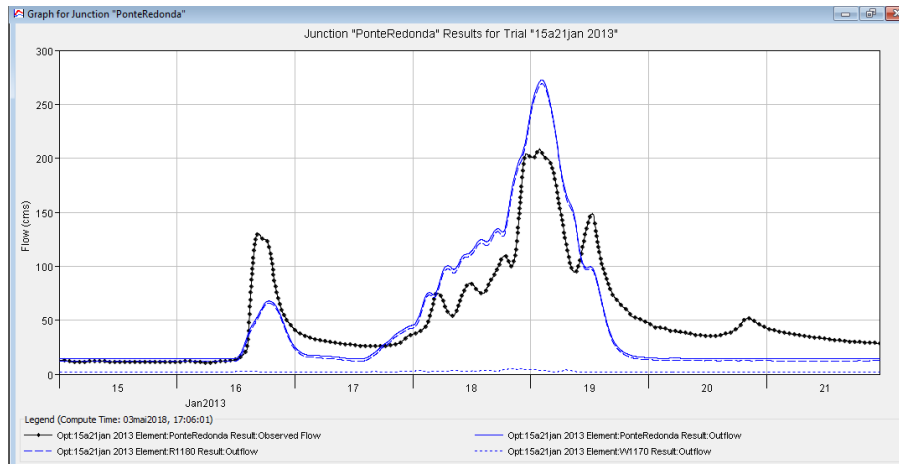


Figura 23 Simulação apenas com os dias do evento de janeiro de 2013

Para que os dois gráficos se aproximem o mais possível foram realizados uma série de testes onde o objetivo era analisar o tempo de resposta do modelo, isto é, se se podia começar a simulação no dia em que se verificava o evento ou se era necessário aumentar o tempo de simulação para criar condições de humidade do solo, que permitisse simular mais corretamente o evento. Após esses testes, concluiu-se que o tempo ótimo para que o modelo conseguisse estabelecer condições de humidade do solo ideais era de 7 dias.

Como se pode verificar na Figura 24 os valores simulados já se enquadram muito melhor nos observados, representando muito melhor os dois picos de cheia.

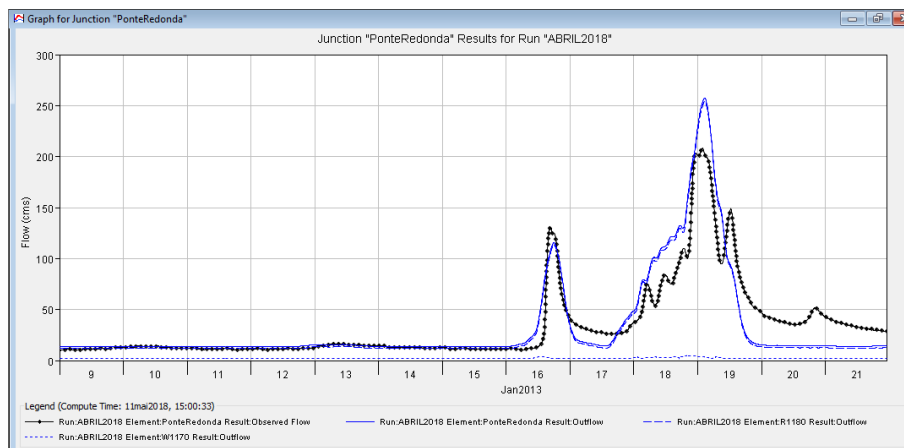


Figura 24 Simulação de janeiro de 2013 com condições ideais de humidade do solo

Os intervalos de tempo dos dados inseridos (precipitação e caudal) também foram testados, sendo usados dados de 6 em 6 horas, 1 em 1 hora, 30 em 30 minutos e 15 em 15 minutos. Como era de esperar os dados com o maior intervalo de tempo revelaram-se dados menos pormenorizados e gerando por vezes um valor de NSE mais satisfatório. No entanto os dados com o período mais reduzido mostraram-se dados com maior pormenor e melhor representação gráfica em relação aos observados.

A solução ótima revelou ser dados de precipitação e caudal horários, 3 dias de “aquecimento” do modelo e os 5 dias de evento, o que resulta num total de 8 dias de simulação.

Após serem resolvidos estes problemas, foram calibrados através do módulo de calibração automático todos os componentes do HEC-HMS através da calibração determinística que como já foi referido, que começa com a estimativa do valor do parâmetro inicial e realizam-se diversas simulações até o valor estagnar (melhor valor possível).

Os parâmetros a calibrar são o “*SCS Curve Number Loss*”, “*SCS Unit Hydrograph Transform*”, “*Constant Monthly Baseflow*” e “*Lag Routing*”. O “*SCS Curve Number Loss*”, é calibrado para cada uma das sub-bacias como representa a Figura 25.

Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number
W1070		60.858
W490		56.448
W410		58.732
W470		59.976
W720		58.212
W810		60.858
W740		60.858
W800		61.740
W780		60.858
W770		61.155
W1170		60.858
W1150		61.740
W1050		60.858
W1010		70
W1000		75.143
W900		74.272

Figura 25 Valores de SCS Curve Number Loss para cada sub-bacia

A calibração é feita sub-bacia a sub-bacia criando para cada uma um parâmetro de calibração no HEC-HMS como mostra a Figura 26.



Figura 26 Criação de parâmetros de calibração no HEC-HMS

Seguidamente é atribuído para qualquer um dos parâmetros a calibrar um valor máximo e um valor mínimo para fazer o valor inicial variar até este atingir o valor ótimo como exemplificado na Figura 27. Os valores máximos e mínimos são atribuídos consoante os valores iniciais e podem ser alterados a qualquer momento da calibração se o valor tender para valores que não se insiram nesse intervalo previamente definido. Por fim quando este valor se verificar constante pode bloquear-se esse mesmo parâmetro e continuar a calibrar os outros que ainda não atingiram valores relativamente constantes.

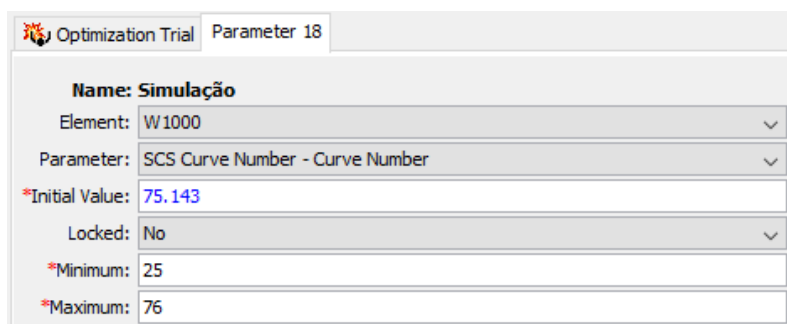


Figura 27 Atribuição dos valores máximos e mínimos da calibração do CN da bacia W1000

Para o “*SCS Unit Hydrograph Transform*” o procedimento é o mesmo. É calibrado para todas as sub-bacias e ajustado como foi referido anteriormente como ilustra a Figura 28. Na figura podemos observar no lado direito os valores definidos de *Lag Time* para todas as sub-bacias e do lado esquerdo o parâmetro a calibrar para a respetiva sub-bacia.

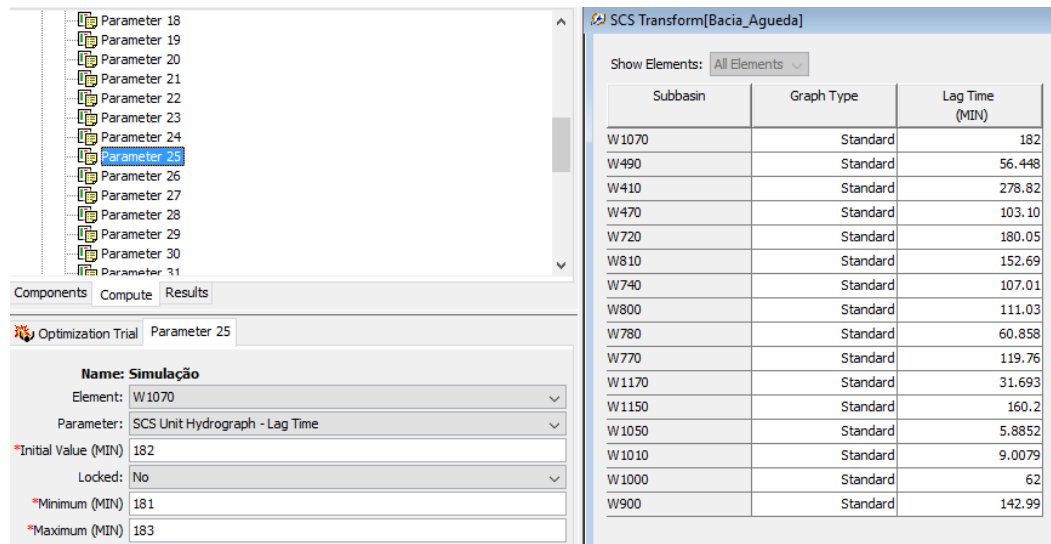


Figura 28 Valores e Calibração do “SCS Unit Hydrograph Transform”

No que diz respeito ao “*Lag Routing*” o procedimento volta novamente a ser o mesmo, mas em vez de ser calibrado para cada sub-bacia é para cada troço de rio como ilustra a Figura 29.

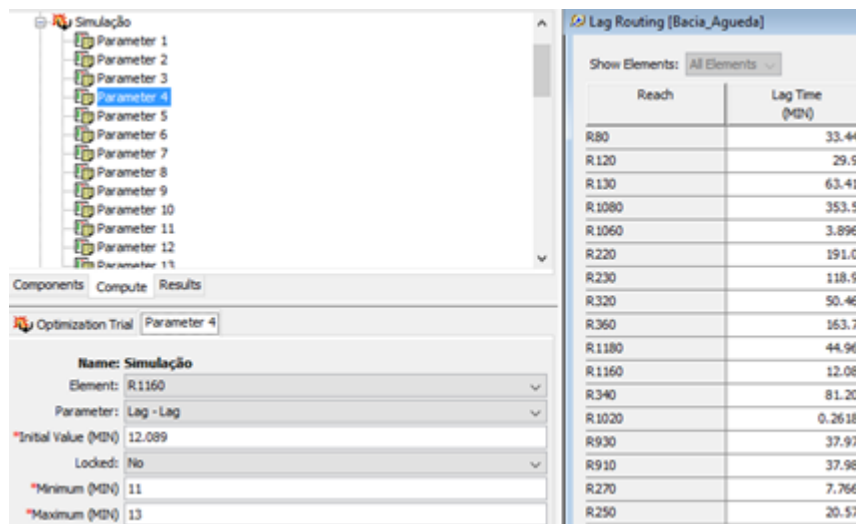


Figura 29 Valores e Calibração do “Lag Routing”

Por fim e devido à falta de informação no que diz respeito ao “*Constant Monthly Baseflow*”, não foi possível fazer a distinção de valores entre as diversas sub-bacias. Por isso, foram atribuídos valores constantes fazendo apenas distinção entre os meses de inverno e verão. Para os meses de inverno (janeiro, fevereiro, março, abril, novembro e dezembro) foi atribuído o valor de “*Constant Monthly Baseflow*” de 2 m³/s e para os meses de verão (maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro) foi atribuído o valor de “*Constant Monthly Baseflow*” de 0,65 m³/s.

A seleção dos “melhores” parâmetros foi feita através da comparação dos dados registados com os dados obtidos pela simulação do HEC-HMS, quanto mais próxima for a relação dos dados simulados relativamente aos observados, maior será a sua credibilidade e rigor a prever eventos futuros.

Recorreu-se ao *Nash-Sutcliffe Efficiency Coeficiente* que como já foi referido é um coeficiente que consegue descrever de uma forma quantitativa a precisão dos resultados do modelo para seleccionar os melhores períodos de simulação. Este indicador pode ser usado para descrever a precisão de outros modelos desde que haja dados observados para possível comparação.

Dos períodos selecionados previamente no ponto 5.1 foram selecionados períodos mais curtos com cerca de sensivelmente 8 dias. Estes períodos foram depois simulados e os gráficos de observados *versus* simulados e os valores de NSE foram analisados. Por um lado, é importante obter valores altos de NSE, mas também é importante verificar a parte gráfica do processo. A parte gráfica permite verificar se os picos de caudal estão desfasados ou não, se é preciso ajustar parâmetros como o *baseflow* ou *Lag*.

Os períodos selecionados foram os seguintes:

- 7 a 12 de abril de 2008;
- 16 a 22 de abril de 2008;
- 21 a 27 de dezembro de 2009;
- 27 de dezembro de 2009 a 2 de janeiro de 2010;
- 12 a 18 de janeiro de 2010;
- 20 a 26 de fevereiro de 2010;
- 26 de fevereiro a 2 de março de 2010;
- 15 a 21 de janeiro de 2013;
- 30 de janeiro a 5 de fevereiro 2015;
- 1 a 7 de janeiro de 2016;

Os valores iniciais e otimizados para cada um dos parâmetros calibrados são apresentados no Anexo 4.

Exemplificando com o período de 16 a 22 de abril de 2008, com a calibração já efetuada, podemos verificar na Figura 30 e Figura 31 que na estação hidrométrica de Ribeiro apresenta um valor da função objetivo NSE de 0.877 e na estação hidrométrica de Ponte Redonda um NSE de 0.796, valores que podem ser considerados muito bons.

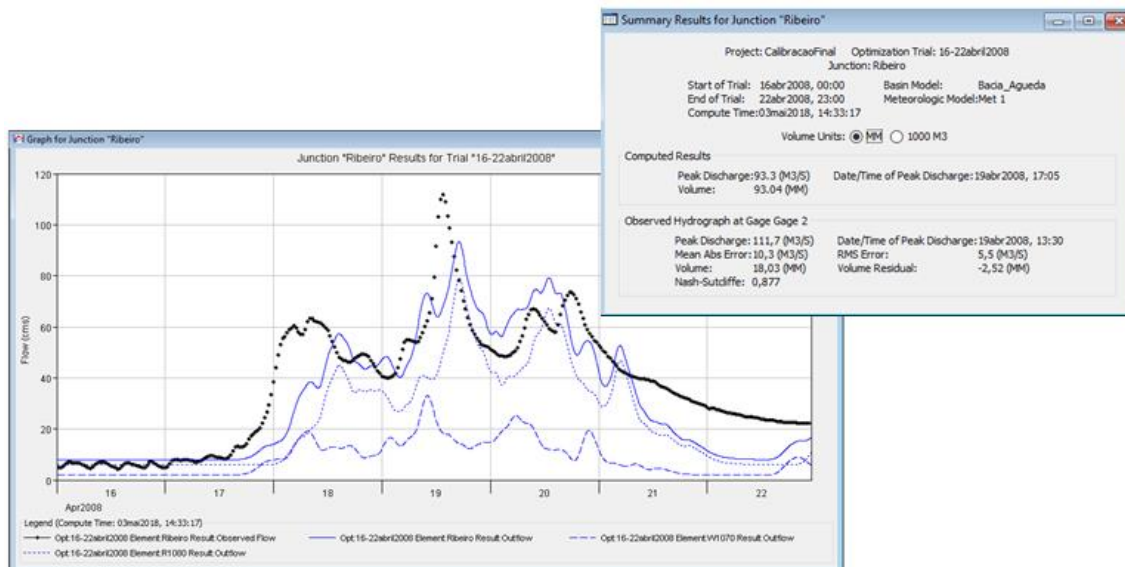


Figura 30 Hidrograma referente a 16 a 22 de abril de 2008 na estação hidrométrica de Ribeiro

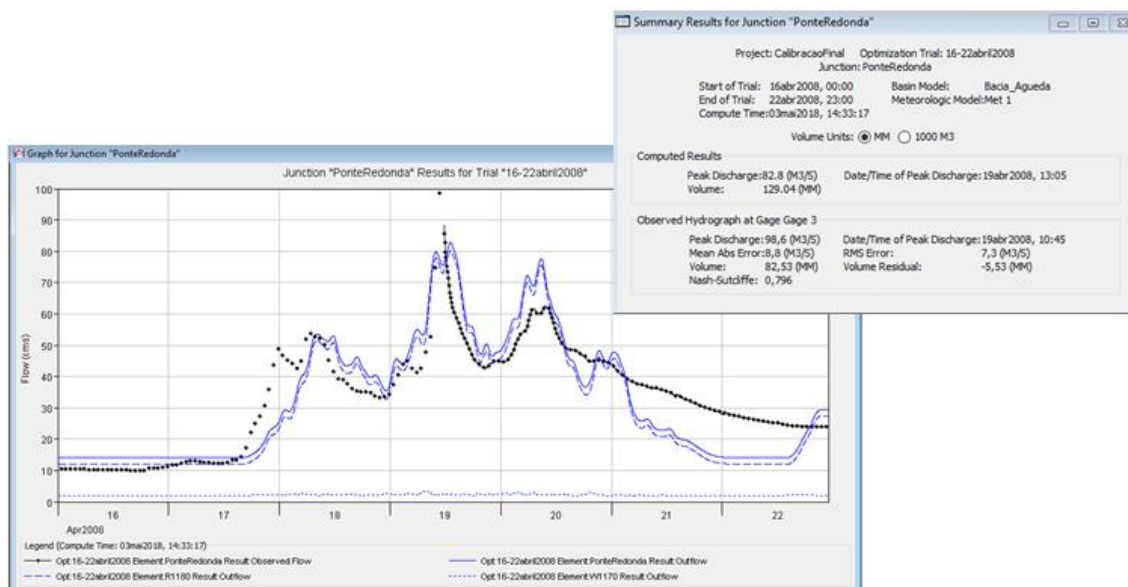


Figura 31 Hidrograma referente a 16 a 22 de abril de 2008 na estação hidrométrica de Ponte Redonda

Podemos verificar que o “Lag” está muito bem calibrado visto que os picos estão representados quase na perfeição, o “Baseflow” está um pouco elevado em Ponte Redonda, mas não é significativo. O caudal máximo simulado é um pouco diferente do observado com

o simulado em Ribeiro nos 93.9 m³/s e o observado de 111.7 m³/s. Em Ponte Redonda o caudal simulado é de 82.8 m³/s e o observado é de 98.6 m³/s.

Em geral os gráficos são muito idênticos e mostra que os valores simulados são uma boa representação dos dados observados.

Como o modelo hidrológico HEC-HMS utiliza o NSE como função objetivo, esta foi a que foi considerada no que diz respeito ao modelo hidrológico. As simulações que após a calibração apresentaram um melhor ajustamento do parâmetro NSE e que consequentemente mostram que o hidrograma simulado é mais próximo do observado foram selecionados.

- 7 a 12 de abril de 2008 (cal 1);

Para este período os valores da função objetivo NSE foram de 0.877 e 0.679 para a estação hidrométrica de Ribeiro e de Ponte Redonda respectivamente.

- 16 a 22 de abril de 2008 (cal 2);

Para este período os valores da função objetivo NSE foram de 0.786 e 0.796 para a estação hidrométrica de Ribeiro e de Ponte Redonda respectivamente.

- 1 a 7 de janeiro de 2016 (cal 3);

Para este período os valores da função objetivo NSE foram de 0.943 e 0.648 para a estação hidrométrica de Ribeiro e de Ponte Redonda respectivamente.

Os outros 10 períodos foram novamente simulados com todos os valores otimizados dos parâmetros de cada uma das calibrações supracitadas (cal1, cal2 e cal3). Os valores dos parâmetros de cada uma destas calibrações foram aplicados a todos os outros eventos, de modo a verificar qual destas apresenta no maior número de eventos possível os melhores resultados. Os resultados da calibração do modelo hidrológico estão apresentados no Anexo 5.

Todas as 10 datas selecionadas para a calibração, apresentam o NSE inicial das estações hidrométricas de Ribeiro e Ponte Redonda, que é comparado com NSE resultante da simulação dos respectivos períodos de calibração. É também comparado o pico de cheia simulado como o observado de modo a perceber se estes se encontram desfasados e se esse for o caso de quanto tempo se trata. Isto é importante visto que é importante informar a população o mais antecipadamente possível, logo se o pico de cheia se encontrar muito desfasado do pico observado significa que o modelo prevê o pico de cheia tarde de mais o que pode fazer a diferença aquando do alerta da população.

Comparando os valores dos parâmetros das três calibrações utilizadas em todos os restantes períodos, a que apresenta os melhores valores de NSE na maior parte dos casos é a Cal2. Os valores otimizados desta calibração vão, portanto, ser utilizados como os valores que melhor representam a realidade e serão os utilizados para os eventos futuros. No Anexo 6 está representada a tabela com os valores de todos os parâmetros originais da Cal2 e os valores finais após calibração.

5.3 Calibração do Modelo Hidrodinâmico

A abordagem seguida na modelação hidrodinâmica foi a da construção de um modelo 2D. Na Figura 32 está representada a área 2D criada para o caso de estudo. Esta área tem 5.1643 km² e é representada através de 38544 células, o rio apresenta um comprimento de cerca de 10.5 km e o canal artificial tem um comprimento de cerca de 740m. O ponto mais a montante (lado direito da imagem) corresponde à secção de referência da bacia W1010.

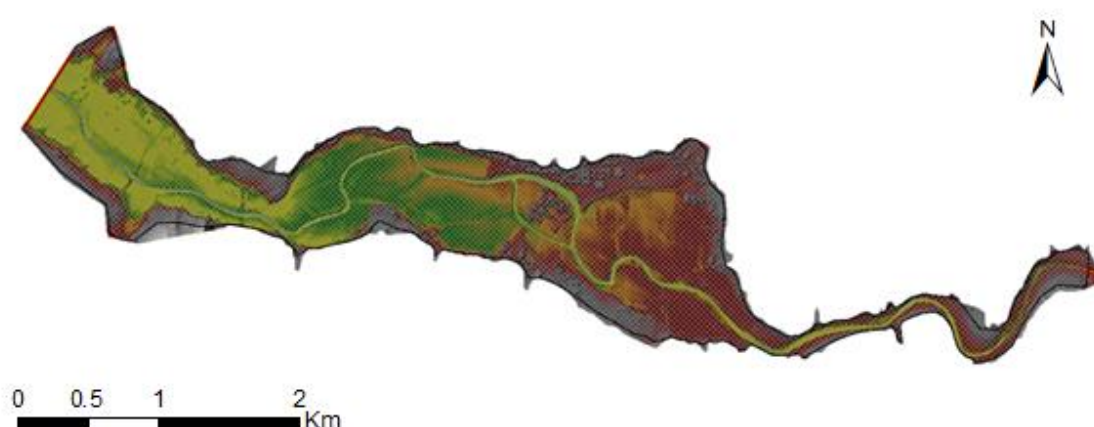


Figura 32 Área 2D do caso de estudo

Esta área 2D foi posteriormente melhorada com a adição de “*Refinement Regions*”, que são zonas onde a malha 2D é mais pormenorizada e conseqüentemente com uma célula menor e que foram exclusivamente utilizadas para o rio e para o canal artificial. A área 2D normal é formada por uma malha de 50X50 metros, já as “*Refinement Regions*” são de 5X5 metros como ilustra a Figura 33.

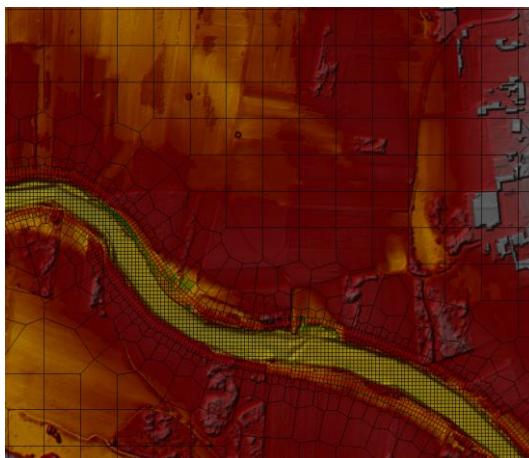


Figura 33 Diferentes tamanhos de malhas na zona de estudo

As criações destas zonas mais detalhadas apresentaram alguns problemas. Como a área 2D é formada automaticamente pelo software em que a única coisa que o utilizador especifica são as suas dimensões (50X50 metros), por vezes criam-se algumas células com mais de 8 arestas.

O HEC-RAS só permite que uma célula apresente no máximo 8 arestas e para resolver este problema é necessário editar manualmente a área 2D. Ao editar a área 2D manualmente é possível separar uma célula em duas ou mais, fazendo com que as arestas da célula anteriormente em conflito sejam reduzidas e ficando assim a cumprir os requisitos de ter 8 ou menos arestas.

Na Figura 34 é possível verificar que a célula inicial (seleccionada a vermelho) apresentava mais que 8 arestas e foi necessário dividi-la para que cumprisse os requisitos do software.

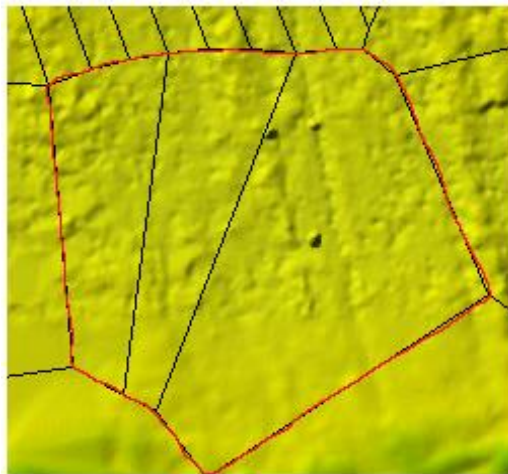


Figura 34 Correção manual das arestas de uma célula na malha 2D

Para além das “*Refinement Regions*” foram adicionados também “*2D Areas BC Lines*” que são estruturas criadas manualmente com o objetivo de corrigir alguns erros no MDT.

A Figura 35 representa uma *BC Line*, a linha a cinzento representa o terreno e as linhas que cruzam a imagem as células. A linha horizontal nos 7 metros de altura é a altura da estrutura criada, impedindo assim a fuga de água pela depressão no terreno.

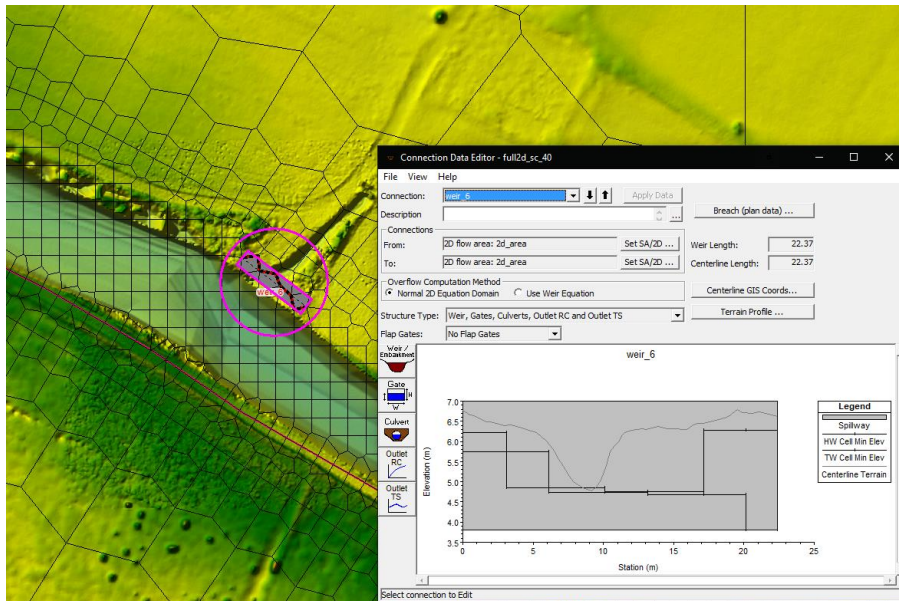


Figura 35 Exemplo de uma BC Line

Foram também adicionadas “*Break Lines*” como ilustra a Figura 36 para adicionar mais detalhe a certas áreas em que é preciso realçar o terreno, maioritariamente estradas que atravessam a zona inundante e vão ser uma obstrução ao escoamento, bem como alguns pilares de pontes, que apesar de ser possível criar a estrutura completa da ponte no HEC-RAS não existiam dados suficientes para o fazer. Neste caso em particular as “*Break Lines*” foram adicionadas após a criação da área 2D o que faz com que as células envolventes à “*Break Line*” se modifiquem, pois, o tamanho em relação à área 2D é menor (5X5 metros).

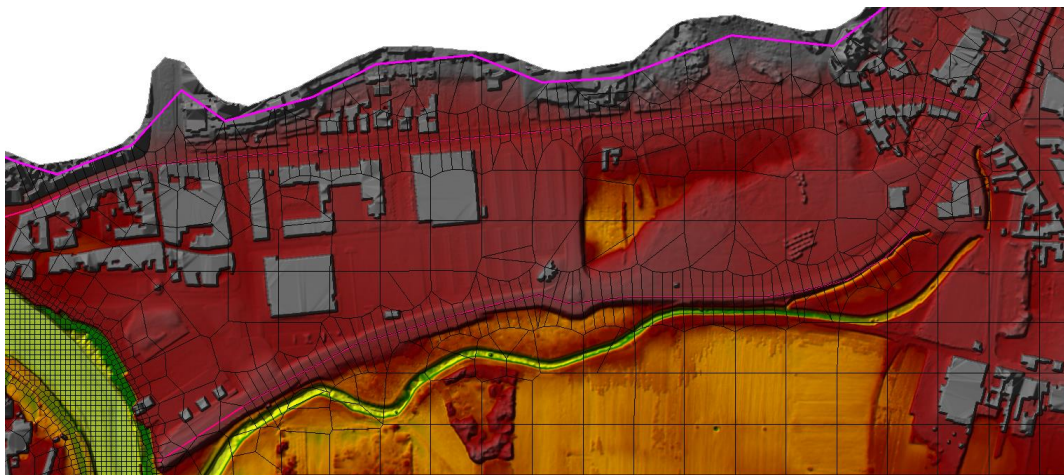


Figura 36 Break Lines inseridas na área 2D

Para a calibração, foram formulados dois projetos no HEC-RAS diferentes, um sem o canal artificial para simular eventos anteriores a 2015 como ilustra a Figura 37 e um com o canal artificial criado em 2015 para simular eventos que ocorreram depois desse ano como ilustra a Figura 38.

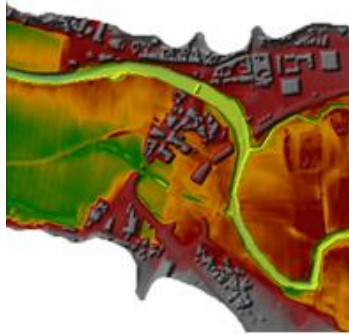


Figura 37 MDT sem canal artificial

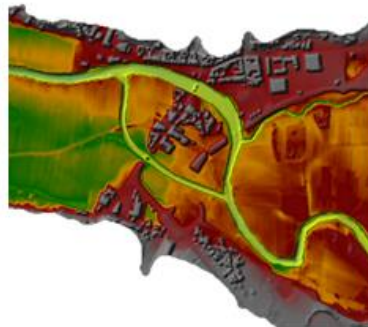


Figura 38 MDT com canal artificial

Assim, para todos os eventos até 2018 a estação hidrométrica utilizada na calibração é a estação de Ponte Águeda, mas a partir desse ano foi possível também utilizar outra estação hidrométrica que foi inserida na zona de Alhandra no âmbito do projeto FFAS como ilustra a Figura 39.

Para os eventos de 2018 em diante foi possível utilizar as duas estações hidrométricas, conseguindo não só, valores de altura de água em dois pontos distintos, mas também a possibilidade de comparar valores entre as duas estações hidrométricas.



Figura 39 Localização da estação hidrométrica de Alhandra

Na calibração do modelo hidrodinâmico, também foi utilizado o período de “aquecimento”. Este período serve para atenuar o choque que o modelo sofre quando o canal que inicialmente está seco recebe um grande volume de água logo no início da simulação. No caso do HEC-RAS não é necessário aumentar o período que se seleciona para a simulação, pois este permite adicionar através das opções de “*Unsteady Computation Options and Tolerances*” um “*Inicial Condition Time*”, ou uma condição inicial.

Esta condição inicial passa por adicionar um certo período de tempo em horas, para que no começo da simulação o modelo já se encontre húmido. O tempo estabelecido para este “aquecimento” foi de 48 horas, o que resulta num total de 5 dias (3 dias de simulação com 48 horas de “aquecimento”).

O único parâmetro a calibrar no modelo hidrodinâmico HEC-RAS foi o Coeficiente de rugosidade de Manning. Para os diferentes tipos de uso do solo que existem na área de estudo foi atribuído um valor ao coeficiente de rugosidade de Manning de acordo com o Anexo 3.

Os valores do coeficiente de rugosidade de Manning são apresentados por categoria, sub-categorias e valores mínimos, normais e máximos. Foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo a estes valores, que consistiu em variar o valor do coeficiente de rugosidade de Manning de um tipo de cobertura do solo de cada vez para a mesma simulação.

Assim foi possível verificar o impacto que esta variação de valores tinha nos resultados. Como só se pode utilizar um único valor para cada categoria resolveu proceder-se a uma média aritmética (Anexo 7) e depois fazer várias simulações em que o valor do parâmetro varia entre o valor máximo e mínimo e verificar os resultados das simulações em função da alteração de cada um desses valores.

Os únicos pontos de validação de que dispúnhamos eram as alturas de água nas estações hidrométricas de Ponte de Águeda e de Alhandra, por isso optamos por apenas fazer a calibração do valor do coeficiente de rugosidade de Manning na linha de água.

Foram seleccionados os seguintes 6 valores para a calibração:

- $N=0.025$ (valor mínimo);
- $N=0.035$;
- $N=0.055$;
- $N=0.085$;
- $N=0.115$;
- $N=0.150$ (valor máximo);

As funções objetivo utilizadas para avaliar a performance da calibração do valor do coeficiente de rugosidade de Manning foram o *Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient*, o Erro Médio Absoluto, o Coeficiente de Correlação de Pearson e o Coeficiente de Determinação e os resultados estão apresentados no Anexo 8.

De seguida estão apresentados dois exemplos de simulações, um com MDT sem canal e um com MDT com canal onde cada simulação demora cerca de 45 minutos a ser efetuada. Estas simulações foram efetuadas com um *Computation Interval* de 10 segundos, um *Mapping Output Interval*, um *Hydrograph Output Interval* e um *Detailed Output Interval* de 1 hora, numa máquina com um processador Intel Core i5-8600k, 3.60GHz, 16 Gb de memória RAM, um GPU *GeForce GTX 1070* 8Gb e como sistema operativo *Windows 10 Pro*.

Para o evento de 22 a 24 de janeiro de 2009 (MDTsem canal), estão representados na Figura 40 os valores de altura de água simulados com os diferentes valores de coeficiente de rugosidade de Manning para a linha de água e os valores de altura de água observados na estação hidrométrica de Ponte de Águeda.

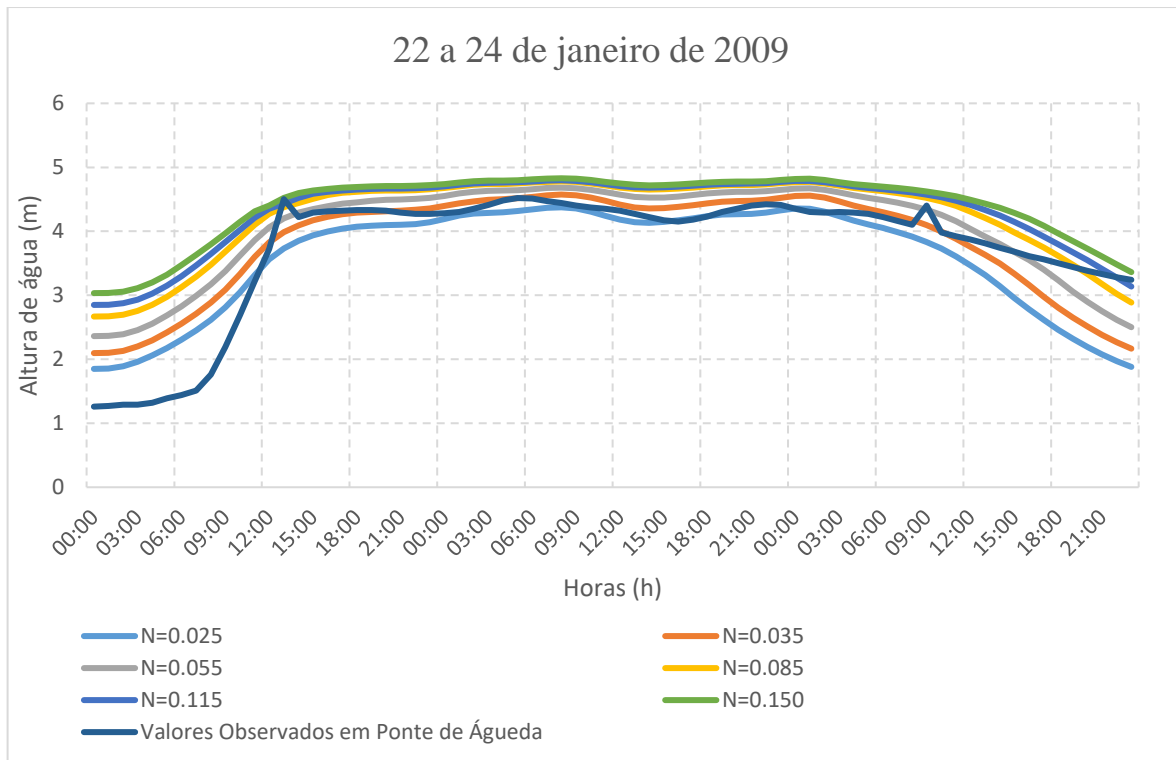


Figura 40 Valores de altura de água simulados com diferentes coeficientes de Manning Vs altura de água observado em Ponte Águeda (2009)

Na Figura 41 estão os valores de todos os indicadores considerados na calibração para cada um dos valores do coeficiente de rugosidade de Manning utilizados.

Avaliando os valores dos indicadores selecionados para cada um dos valores do coeficiente de rugosidade de Manning como ilustra a Figura 41, podemos verificar que o que apresenta um valor de NSE maior é o $N=0.035$, com um valor de 0.76, mas em comparação com o $N=0.055$, apesar deste apresentar um valor de NSE inferior (0.69), os restantes indicadores apresentam resultados muito melhores, por isso o valor selecionado foi o $N=0.055$.

Janeiro 2009	Designação	Indicador	N=0.025	N=0.035	N=0.055	N=0.085	N=0.115	N=0.150
	Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient	NSE	0.72	0.76	0.69	0.51	0.40	0.27
	Mean absolute error	MAE	0.37	0.33	0.41	0.53	0.59	0.66
	Correlação Pearson	R	0.86	0.88	0.89	0.91	0.92	0.93
	Coefficiente de Determinação	R2	0.75	0.77	0.80	0.83	0.85	0.86

Figura 41 Valores dos indicadores selecionados para cada um dos coeficientes de rugosidade de Manning para o evento de 2009

Para o evento de 15 a 17 de dezembro de 2018 (MDT com canal), estão também representados na Figura 42 os valores de altura de água simulados com os diferentes valores de coeficiente de rugosidade de Manning para as linhas de água e os valores de altura de água observados nas estações hidrométricas de Ponte de Águeda e de Alhandra.

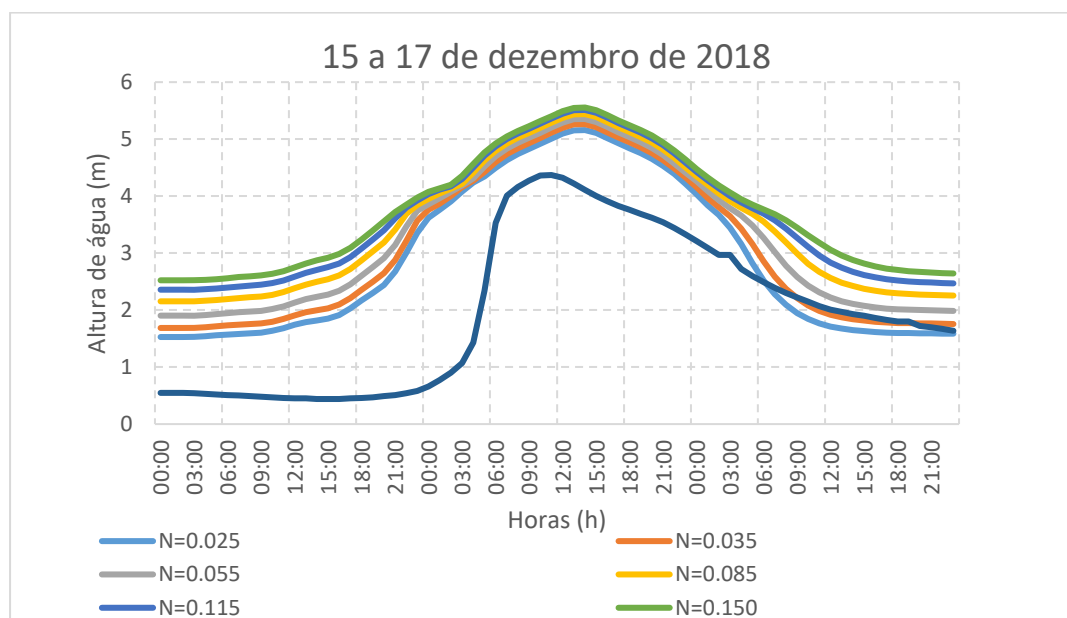


Figura 42 Valores de altura de água simulados com diferentes coeficientes de rugosidade de Manning Vs altura de água observado em Alhandra (2018)

Avaliando os valores dos indicadores selecionados e ilustrados na Figura 43, podemos ver que o melhor valor de NSE é no $N=0.025$. Comparando com o $N=0.055$, podemos observar que apresenta um valor de NSE inferior e até negativo com um MAE superior, mas com valores de Correlação de Pearson e do Coeficiente de Determinação melhores. Apesar de neste caso particular os valores de coeficiente de rugosidade de Manning de 0.025 produzirem melhores resultados, só podemos utilizar um valor final para o modelo. Esse valor é o que melhor se ajustar ao longo de todas as simulações.

15-17 Dezembro 2018	Designação	Indicador	N=0.025	N=0.035	N=0.055	N=0.085	N=0.115	N=0.150
	Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient	NSE	0.11	-0.04	-0.25	-0.52	-0.77	-0.97
	Mean absolute error	MAE	1.03	1.11	1.28	1.48	1.64	1.76
	Correlação Pearson	R	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.82
	Coeficiente de Determinação	R2	0.61	0.62	0.64	0.65	0.67	0.68

Figura 43 Valores dos indicadores selecionados para cada um dos coeficientes de rugosidade de Manning para o evento de 2018

Assim analisando todas as simulações realizadas com e sem canal, o valor selecionado foi o $N=0.055$ para coeficiente de rugosidade de Manning na linha de água.

5.4 Exemplo de Aplicação

Neste ponto dispomos de um modelo hidrológico e hidrodinâmico calibrado. Foram realizadas algumas simulações para verificar qual o impacto que o software de modelação hidrológica HEC-HMS apresenta nos resultados, bem como através da comparação dos dois MDT's com e sem canal, avaliar qual o impacto do canal artificial construído em 2015.

Os resultados vão ser apresentados de acordo com o seguinte esquema:

Teste 1 - Simulação com dados de caudal observados

Teste 1.1 –Utilizando o MDT sem canal na modelação hidrodinâmica;

Teste 1.2 –utilizando o MDT com canal na modelação hidrodinâmica;

Teste 2 - Simulação com dados de caudal obtidos pelo modelo hidrológico HEC-HMS

Teste 2.1 –utilizando o MDT sem canal na modelação hidrodinâmica;

Teste 2.2 –utilizando o MDT com canal na modelação hidrodinâmica;

5.4.1 Simulação com dados de caudal observados

O teste 1.1 foi realizado com um MDT sem canal artificial e os dados de altura de água observados nas estações hidrométricas de Ribeiro e Ponte Redonda de 12 a 14 de fevereiro de 2016, retirados do SNIRH e posteriormente convertidos em caudal através das curvas de vazão.

Com estes dados de caudal foi possível fazer a simulação no modelo hidrodinâmico onde foram retirados os valores de altura de água na mesma localização onde se encontra a estação hidrométrica de Ponte de Águeda.

Para se ter uma noção da variação do nível de água junto a habitações, que é diferente do ponto selecionado na linha de água (estação hidrométrica de Ponte Redonda), foi analisado outro ponto localizado na zona urbana de Águeda.

Na Figura 44 é possível verificar a extensão máxima da inundação de 2016 que se verificou no dia 12 de fevereiro pelas 17:00 horas. O ponto vermelho representa a localização da estação hidrométrica de Ponte de Águeda onde foram retirados os valores que foram utilizados no teste 1.1.

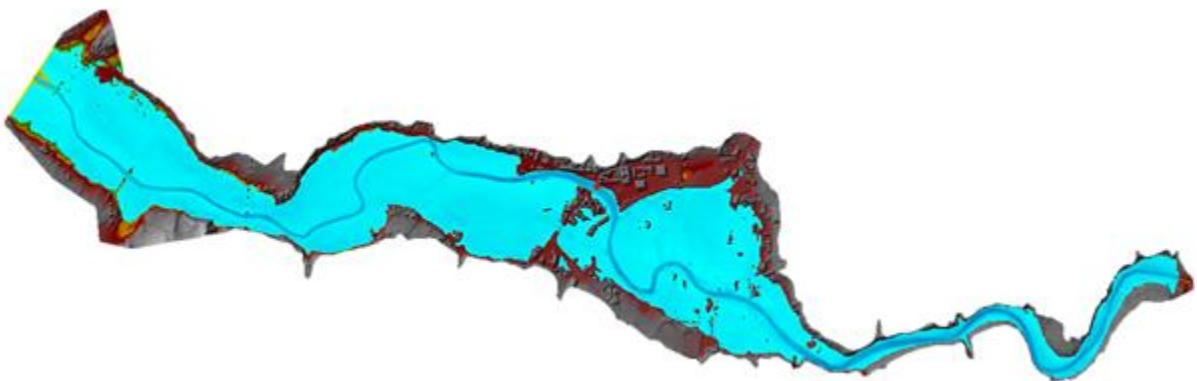


Figura 44 Extensão da inundação no MDT sem canal com valores de caudal observados

Na Figura 45 está representado com mais detalhe a zona urbana e a extensão de inundação também referente ao dia 12 de fevereiro de 2016 pelas 17:00 horas. O ponto vermelho representa o local onde foram retirados os valores referentes ao teste 1.1.

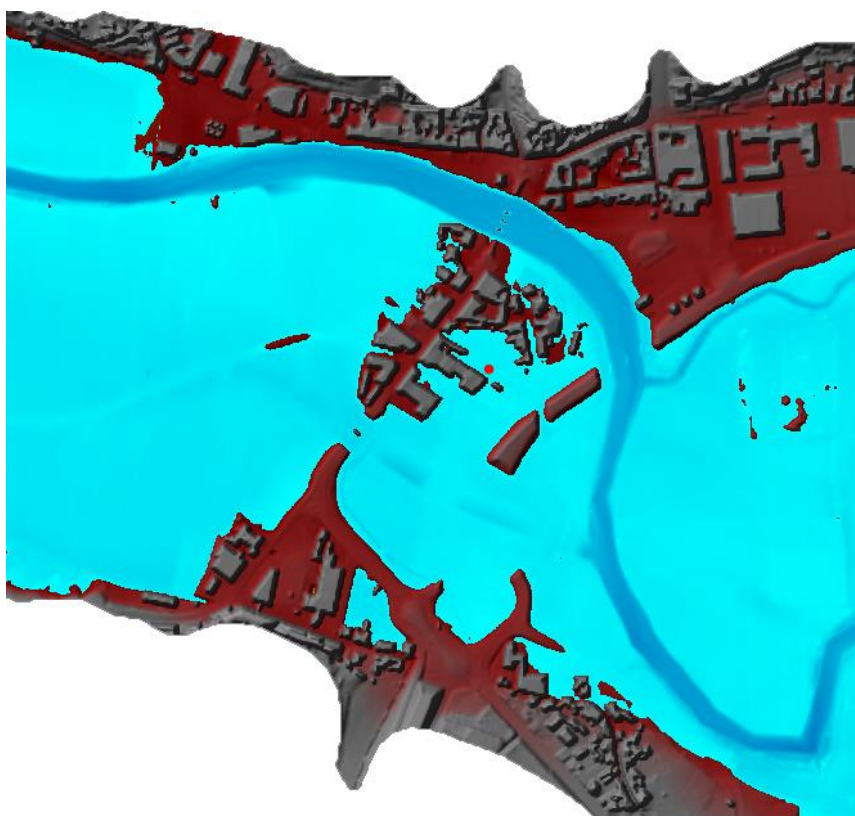


Figura 45 Extensão da inundação na zona urbana no MDT sem canal com valores de caudal observados

Como no teste 1.1, o teste 1.2 foi realizado com os dados de altura de água observados nas estações hidrométricas de Ribeiro e Ponte Redonda de 12 a 14 de fevereiro de 2016, retirados do SNIRH e posteriormente convertidos em caudal através das curvas de vazão. A única diferença entre o teste 1.1 e 1.2 está no MDT utilizado, onde o teste 1.2 utiliza um MDT com canal artificial.

Com estes dados de caudal e recorrendo à simulação efetuada no modelo hidrodinâmico foi possível obter valores de altura de água na mesma localização onde se encontra a estação hidrométrica de Ponte de Águeda e na zona urbana de Águeda.

Na Figura 46 está representada a extensão máxima de inundação referente ao período de 12 a 14 de fevereiro de 2016, que se verificou dia 12 de fevereiro pelas 17:00 horas. O ponto vermelho representa a localização da estação hidrométrica de Ponte de Águeda onde foram retirados os dados de altura de água para realizar o teste 1.2.

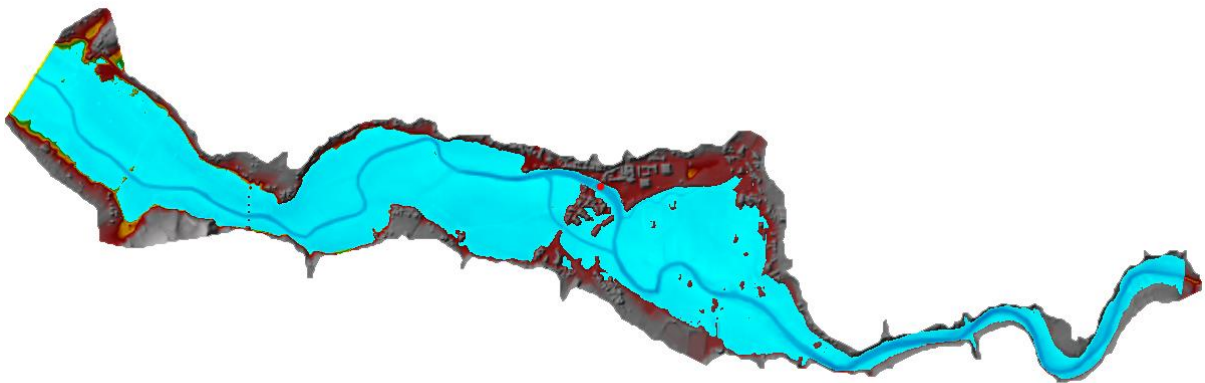


Figura 46 Extensão da inundação no MDT com canal com valores de caudal observados

Na Figura 47 está representado com mais detalhe a zona urbana e a extensão de inundação também referente ao dia 12 de fevereiro de 2016 pelas 17:00 horas. O ponto vermelho representa o local onde foram retirados os valores observados na zona urbana referentes ao teste 1.2.

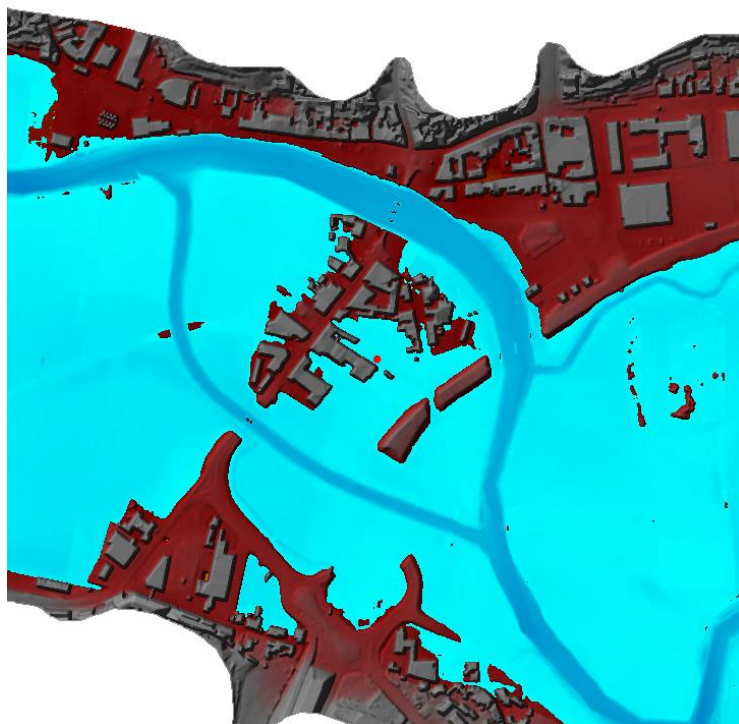


Figura 47 Extensão da inundação na zona urbana no MDT com canal com valores de caudal observados

5.4.2 Simulação com dados de caudal obtidos pelo modelo hidrológico HEC-HMS

O teste 2.1 foi realizado com dados de caudal simulados pelo modelo hidrológico HEC-HMS logo após a confluência dos dois tributários que representa o início do MDT utilizado para o modelo hidrodinâmico. Os dados utilizados no modelo hidrológico foram os dados de precipitação fornecidos pelo SNIRH.

O período de simulação volta a ser o mesmo, ou seja, de dia 12 a 14 de fevereiro de 2016.

Na Figura 48 está representada a extensão máxima de inundação verificada a 13 de fevereiro de 2016 pelas 20:00 horas. O ponto vermelho representa a localização da estação hidrométrica de Ponte de Águeda onde foram retirados os dados de altura de água para realizar o teste 2.1.

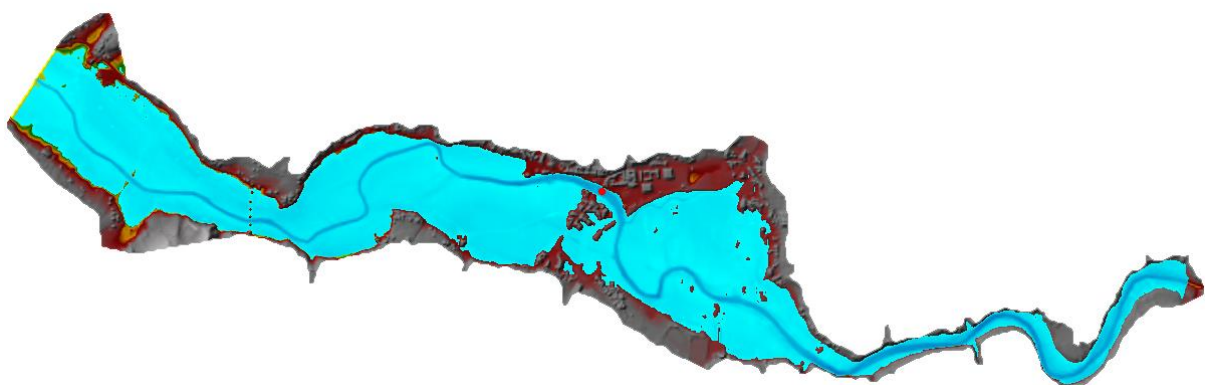


Figura 48 Extensão da inundação no MDT sem canal com valores de caudal simulados

Na Figura 49 está representado com mais detalhe a zona urbana e a extensão de inundação referente ao dia 13 de fevereiro de 2016 pelas 20:00 horas. O ponto vermelho representa o local onde foram retirados os valores da zona urbana referentes ao teste 2.1.

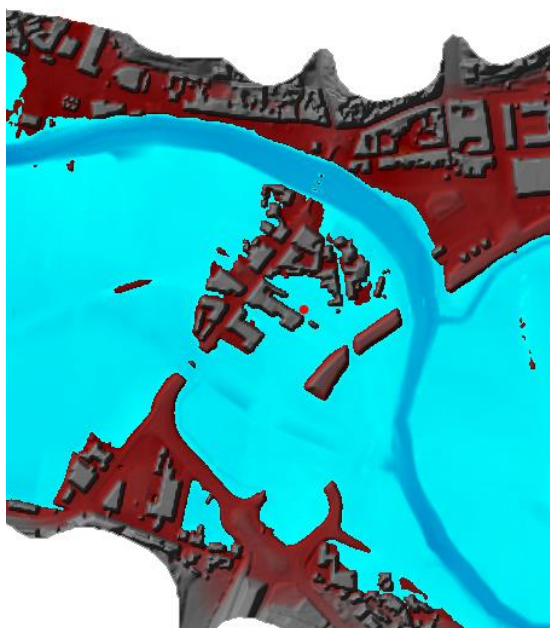


Figura 49 Extensão da inundação na zona urbana no MDT sem canal com valores de caudal simulados

Tal como no teste 2.1, o teste 2.1 foi realizado com dados de caudal simulados pelo modelo hidrológico HEC-HMS logo após a confluência dos dois tributários que representa o início do MDT utilizado na modelação hidrodinâmica, com a diferença de que no teste 2.2 o MDT utilizado já contém o canal artificial.

Na Figura 50 está representada a extensão máxima de inundação verificada a 13 de fevereiro de 2016 pelas 20:00 horas. O ponto vermelho representa a localiza o da estac o hidrométrica de Ponte de  gueda onde foram retirados os dados de altura de água para realizar o teste 2.2.

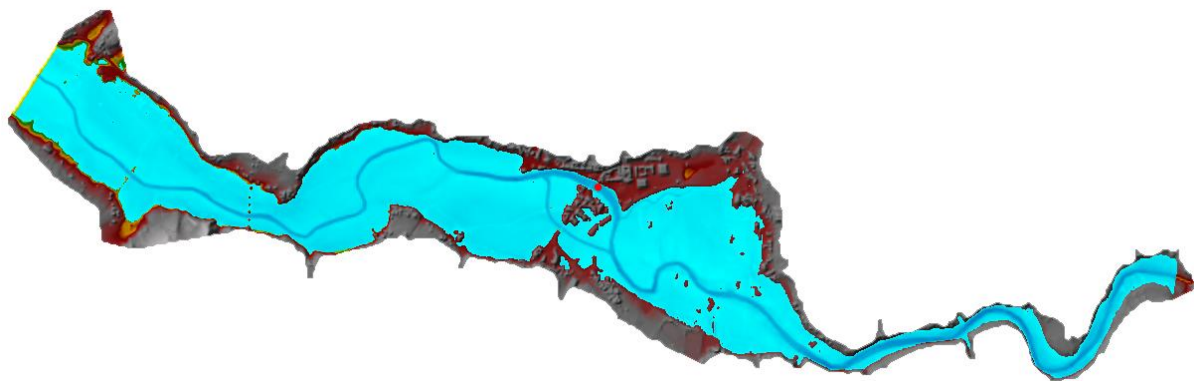


Figura 50 Extensão da inunda o no MDT com canal com valores de caudal simulados

Na Figura 51 está representado com mais detalhe a extensão de inundação na zona urbana referente ao dia 13 de fevereiro de 2016 pelas 20:00 horas. O ponto vermelho representa a localização de onde foram retirados os valores referentes à zona urbana para o teste 2.2.

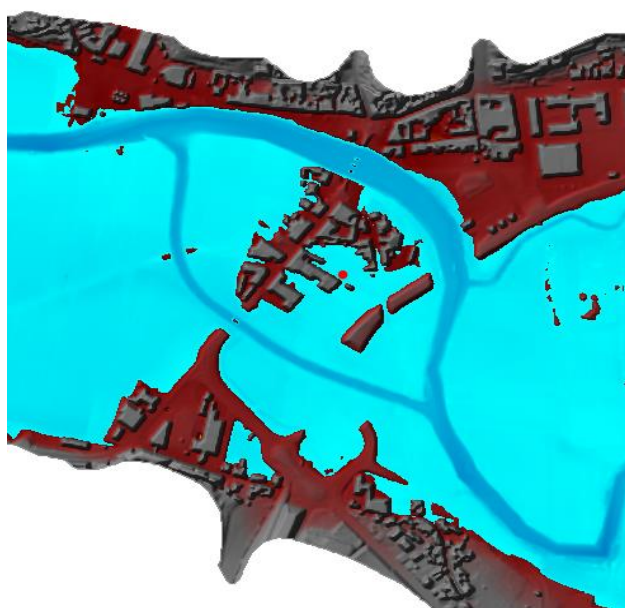


Figura 51 Extensão da inundação na zona urbana no MDT com canal com valores de caudal simulados

5.4.3 Comparação de resultados

Na Figura 52 é possível verificar o impacto que o modelo hidrológico HEC-HMS apresenta em relação aos valores observados. É possível verificar que o primeiro pico de cheia é muito bem representado, bem como o segundo. Apesar do segundo pico de cheia ser 27cm mais alto que o observado o hidrograma simulado em geral representa muito bem o hidrograma observado.

Em relação ao ponto selecionado na zona urbana, podemos ver que como não se trata num ponto localizado na linha de água, mas sim perto de habitações as subidas de água apesar de serem muito menores que as registadas na zona da estação hidrométrica de Ponte de Águeda são muito mais significantes. Na Figura 53 podemos ver que os picos de cheia se encontram desfasados cerca de 3 horas e com o segundo pico de cheia a ser 30cm superior nos valores simulados que nos valores observados. Este desvio pode estar relacionado com o parâmetro do “Lag” que pode ser futuramente ajustado.

Com estes resultados podemos verificar que os dados observados estão muito semelhantes aos valores que foram simulados na ferramenta de modelação hidrológica HEC-HMS, refletindo a confiança que pode ser depositada neste modelo.

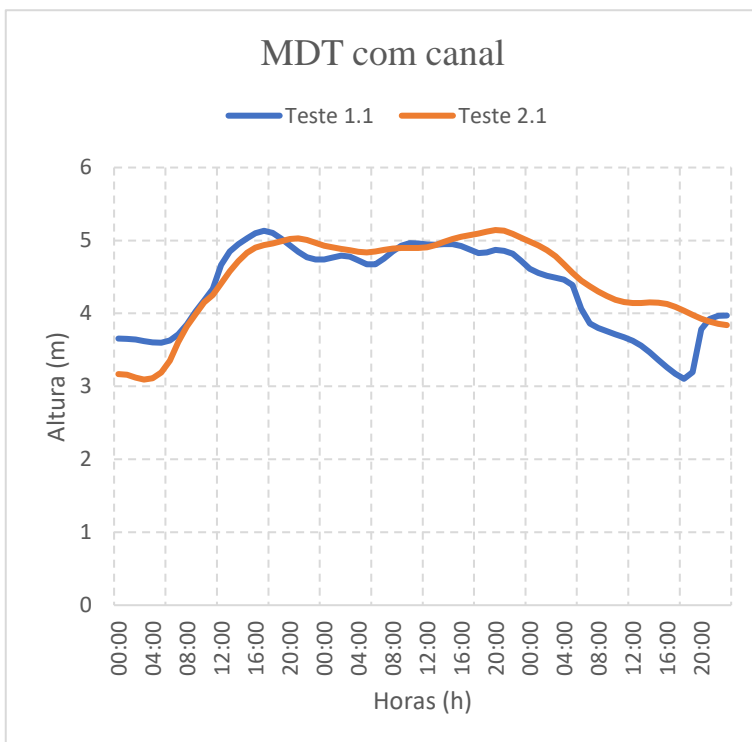


Figura 52 Simulação com valores observados Versus Simulação com valores simulados no modelo hidrológico HEC-HMS com MDT com canal para Ponte de Águeda

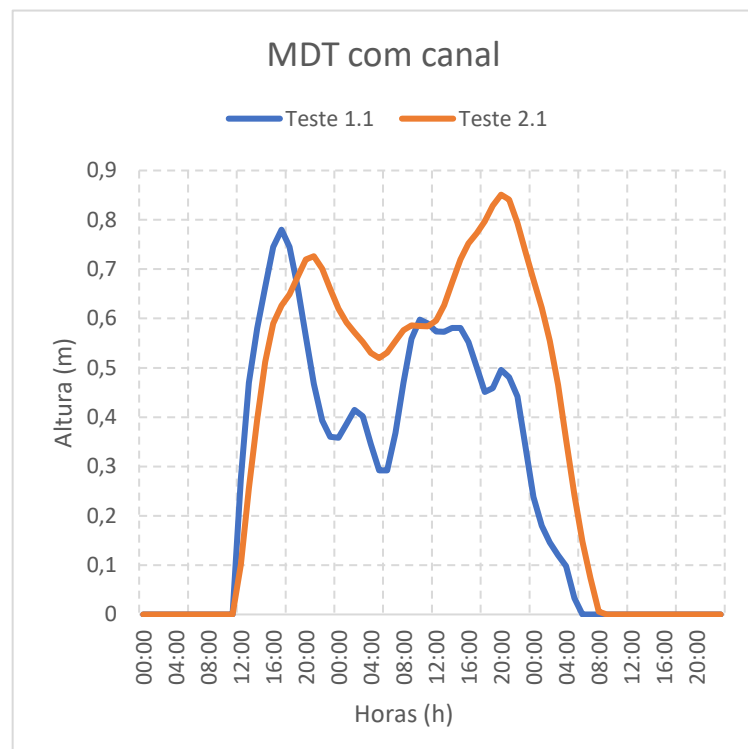


Figura 53 Simulação com valores observados Versus Simulação com valores simulados no modelo hidrológico HEC-HMS com MDT com canal na Zona Urbana

Em relação ao canal artificial criado em 2015 também é possível tirar algumas conclusões. Podemos verificar tanto na Figura 54 como na Figura 55 que em relação aos valores retirados na linha de água (estação hidrométrica de Ponte Redonda) o nível de água no MDT com canal apenas reduziu a altura de água em média 15cm. Ora um investimento elevado para a construção de num canal artificial apenas reduziu 15cm de altura de água o que não é muito significativo.

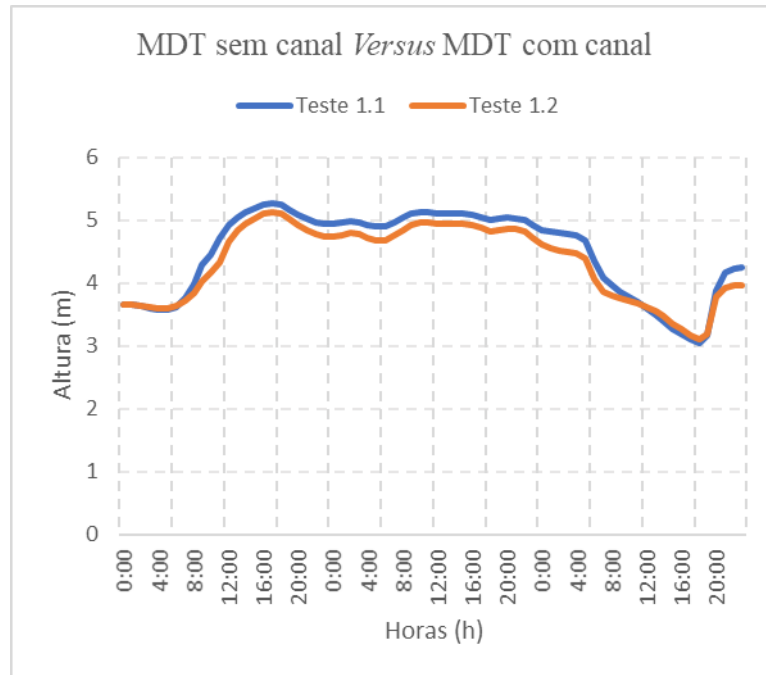


Figura 54 Comparação dos valores de altura de utilizando dados observados em Ponte de Águeda para o MDT com e sem canal

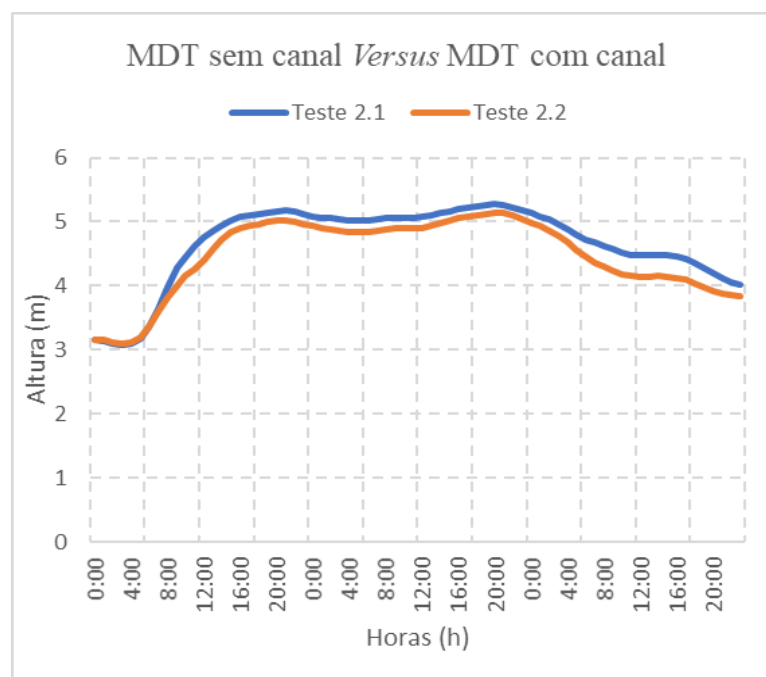


Figura 55 Comparação dos valores de altura de água simulados no modelo hidrológico HEC-HMS em Ponte de Águeda para o MDT com e sem canal

No caso das Figura 56 e Figura 57 que representam a zona urbana os resultados são semelhantes, sendo os valores de altura de água no caso do modelo com canal são inferiores em média 7.5 cm, o que volta a não ser relevante. O que seria de esperar com a construção deste canal era que no caso da zona urbana pelo menos não existisse água.

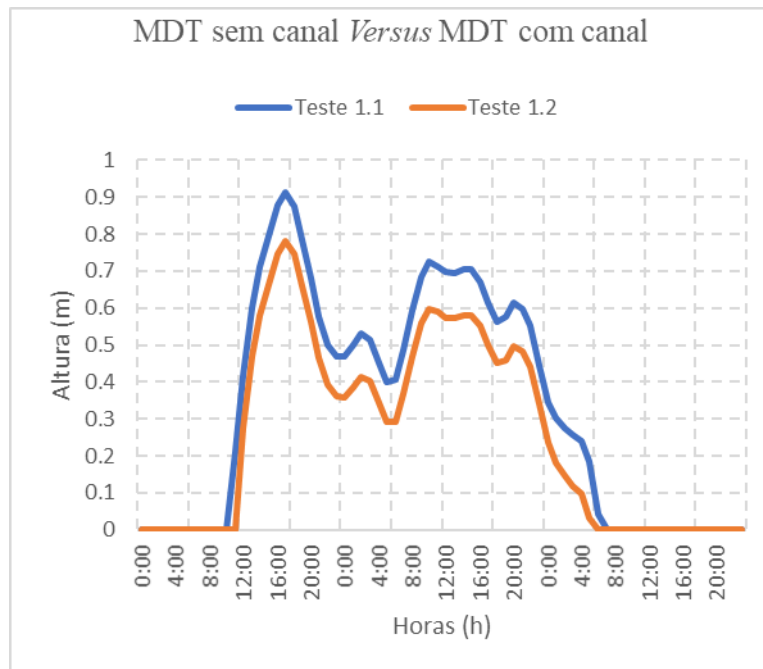


Figura 56 Comparação dos valores de altura de água utilizando dados de caudal observados na Zona Urbana para o MDT com e sem canal

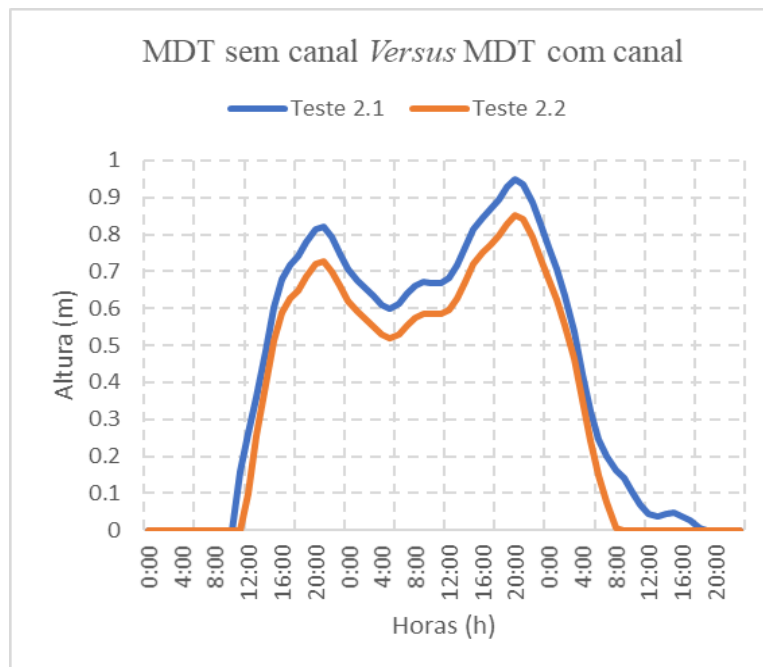


Figura 57 Comparação dos valores de altura de água simulados no modelo hidrológico HEC-HMS na Zona Urbana para o MDT com e sem canal

6 Conclusões

Os dados de entrada são a base de todo este trabalho de projeto e são os dados mais importantes para que no fim os resultados sejam os mais fidedignos possível. No que diz respeito aos dados de precipitação retirados da estação meteorológica de Varzielas, se estes não representarem os eventos de uma forma real e viável, então estaremos a utilizar dados de que nada nos valem, visto que como o objetivo é prever eventos futuros e para calibrar os modelos de modo temos de nos basear em representações corretas de eventos passados.

O mesmo se aplica aos dados de altura de água, caso estes não representem os eventos passados com coerência e com a devida precisão estaremos a incorrer num erro que se vai propagar ao longo do processo. Os dados de caudal são calculados através dos dados de altura de água recorrendo às respetivas curvas de vazão. Se os dados de altura de água não estiverem corretos, mais uma vez a calibração dos modelos não será a correta e consequentemente as simulações não apresentam fiabilidade.

Outro aspeto a ter em conta é o MDT, este é das partes mais importantes do projeto, visto que representa toda a área em estudo e de que maneira é que a água que chega a esta área se vai comportar. Quanto mais detalhe for introduzido no MDT maior é a resolução, o que resulta numa melhor representação do terreno e consequentemente se traduz em melhores resultados, como alturas de água, velocidade, zonas inundadas, etc...

Este pormenor foi condicionado pelo facto deste trabalho de projeto ser integrado num sistema de alerta e previsão e para isso, os tempos de simulação contam muito na medida em que se tem de dar uma resposta o mais depressa possível à população. Por isso o MDT utilizado no caso da modelação hidrodinâmica teve de ser ajustado a uma resolução maior (menos detalhe) continuando, contudo, com boas simulações, mas demorando muito menos tempo.

O uso do solo é outro componente fundamental, relacionada com a maior ou menor possibilidade de escoamento superficial de uma determinada área de terreno. Estes valores que se encontram tabelados podem ser ajustados e calibrados para que os resultados dos modelos se ajustem melhor aos valores observados. O caso dos incêndios florestais que demonstrou ser um acontecimento em grande escala na bacia em estudo neste trabalho de projeto foi tido em conta, pois fazem com que os valores do potencial de escoamento sejam alterados devido à impermeabilização do solo e aumento do escoamento superficial.

No que diz respeito ao modelo hidrológico HEC-HMS, este foi calibrado recorrendo à calibração automática que o mesmo permite, fazendo com que com os dados obtidos através do pré processamento da bacia no ArcGis para cada sub-bacia, sejam calibrados através de um intervalo que o utilizador pode definir. O indicador utilizado na avaliação de resultados foi o NSE, onde os dados de entrada mais uma vez são cruciais, neste caso os dados de precipitação e dados observados de caudal calculados através dos dados de altura de água com as curvas de vazão para cada estação hidrométrica.

Os valores de NSE para as simulações efetuadas com os parâmetros da Cal1 para todos os outros eventos variam na estação hidrométrica de Ribeiro de 0.073 a 0.875 e na estação hidrométrica de Ponte Redonda de -3.72 a 0.815. Para a Cal2 os valores de NSE na estação hidrométrica de Ribeiro variam de 0.0804 a 0.816 e na estação hidrométrica de Ponte Redonda de -3.614 a 0.804. Por fim na Cal3 os valores de NSE variaram na estação hidrométrica de Ribeiro de 0.059 a 0.873 e na estação hidrométrica de Ponte Redonda de -3.668 a 0.816. Assim, apesar do intervalo de valores da Cal2 não ser o melhor, pois a Cal3 apresenta um valor mínimo e máximo superior, a Cal2 é a que apresenta resultados mais satisfatórios num maior número de eventos e foi a calibração selecionada.

Na modelação hidrodinâmica o papel do MDT nos dados de entrada é ainda mais importante. É um MDT obtido através do Lidar e da Batimetria com uma elevada resolução (5cm). Como já foi referido este MDT teve de ser ajustado a uma resolução um pouco maior de cerca de 40cm, devido à necessidade de se criar um modelo que consiga dar resposta num curto espaço de tempo, com vista a ser utilizado num sistema de previsão e alerta. O MDT com a menor resolução demorava várias horas para simular e por isso teve de se optar pelo MDT com 40cm de resolução para obter simulações a rondar os 40 a 50 minutos com um *Computation Interval* de 10 segundos, um *Mapping Output Interval*, um *Hydrograph Output Interval* e um *Detailed Output Interval* de 1 hora.

Foi criado um modelo completamente em 2D que se revelou muito estável e robusto. É muito intuitivo e *user friendly*. Como o modelo apresenta um canal artificial para além da linha de água e consequentemente zonas de bifurcação o modelo totalmente em 2D é muito mais adequado, tanto para essas situações como também para zonas urbanas e grandes planícies de inundação que o modelo 1D ou híbrido (1D/2D).

O modelo hidrodinâmico foi calibrado manualmente e os parâmetros calibrados foram os valores do coeficiente de rugosidade de Manning. Estes valores estão tabelados por valores mínimos, normais e máximos. Como o *software* de modelação hidrodinâmica HEC-RAS só permite adotar um valor para cada tipo de uso do solo, foi feita essa calibração passando por primeiramente uma análise de sensibilidade. Após essa análise de sensibilidade verificou-se que o valor de Manning que mais afetava as simulações era o valor da linha de água. Por isso, este foi o único que foi calibrado com as funções objetivo *Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient* (NSE), o Erro Médio Absoluto (EMA), a Correlação de Pearson (R) e o Coeficiente de Determinação (R^2). Os valores de NSE variam entre -9.4 e 0.76, o EMA varia entre 0.27 e 1.76, a Correlação de Pearson varia entre 0.28 e 0.97 e o Coeficiente de Determinação varia entre 0.08 e 0.94.

Por fim referir que apresentar modelos bem calibrados é extremamente importante, especialmente para o caso de aplicação deste trabalho de projeto no projeto FFAS. Como estes modelos têm o objetivo de estudar vários cenários possíveis, é imperativo que representem da melhor forma a realidade, para que se possa tomar as decisões mais acertadas tanto a nível da tomada de precauções através de obras hidráulicas, como também no fornecimento de informação com antecedência à população de modo a mitigar os danos que se possam verificar.

Este trabalho ao contribuir com a calibração dos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, seria interessante desenvolver uma série de possíveis cenários climáticos, de modo a verificar com o agravamento da situação climática quais as consequências manifestadas.

Serve também para um possível estudo mais aprofundado a ser integrado nos planos de ordenamento do território para a zona urbana Águeda, apoiando assim o planeamento de cheias e inundações nesta zona urbana.

Bibliografia

- Betsholtz, A. and Nordlöf, B. (2017). *Potentials and limitations of 1D, 2D and coupled 1D-2D flood modelling in HEC-RAS*. Master thesis. Lund University.
- Brunner, G. (2014). *Combined 1D and 2D Modeling with HEC-RAS*. Hydrologic Engineering Center.
- Cook, A. (2008). *Comparison of one-dimensional HEC-RAS with two-dimensional FESWMS model in flood inundation mapping*. Master Thesis. Purdue University.
- Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de outubro. Diário da República n.º 206/2010, Série I de 2010-10-22, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Lisboa.
- Cunderlik, J. and Simonovic, S. (2004). *Calibration, Verification and Sensitivity Analysis of the HEC-HMS Hydrologic Model CFCAS Project: Assessment of Water Resources Risk and Vulnerability to Changing Climatic Condition*. Ontario: University of Western Ontario.
- Dias, M. (2017). *Estudo hidrológico da Ribeiria do Amparo*. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico de Leiria.
- Filho, G., Andrade, R., Junior, J. and Filho, L. (2012). Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicabilidades. *Revista de Ciências Ambientais*, (6), pp.35 a 47.
- Goodell C. (2019). *1D? 2D? or 1D/2D? How Should I Build my Model?*. [online] Hecrasmodel.blogspot.com. Disponível em: <http://hecrasmodel.blogspot.com/2016/03/1d-2d-or-1d2d-how-should-i-build-my.html>.
- Gomes, N. (2016). *As Aletrações Climáticas e a Proteção Civil*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Educação e Ciências.

- González, I., Freire, C., Morente, L. & Asensio, E. (2012). *Los sistemas de informacion geográfica y la investigación en ciencias humanas y sociales*. Madrid: Confederación Española de Centros de Estudios Locales (CSIC).
- Martins, A. (2014). *Risco de Inundação na Área Urbana de Águeda*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra.
- Portaldoclima.pt. (2019). *PORTAL DO CLIMA*. [online] Disponível em: <http://portaldoclima.pt/pt/>.
- Monte, B., Costa, D., Chaves, M., Magalhães, L. and Uvo, C. (2015). Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, pp.152 a 167. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p152-167>.
- Neves, C. (2007). *Calibração de Parâmetros de Modelos Hidráulicos de Redes de Distribuição de Água para Estudos de Operação de Rede*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília.
- Teodoro, V., Teixeira, D., Costa, D. & Fuller, B. (2007). O Conceito de Bacia Hidrográfica e a Importância da Caracterização Morfométrica Para o Entendimento da Dinâmica Ambiental Local. *Revista Uniara*, n.20.
- Almeida, E. (2015). *Modelação hidrológica de inundações urbanas baseada em dados geoespaciais de alta resolução*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Lisboa.
- Ackerman, C. (2012). *HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGis 10*. Davis, California: US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center (HEC). Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/downloads.aspx>.

- Brunner, G. (2016). *HEC-RAS River Analysis System User's Manual V 5.0*. Davis, Califórnia: US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center (HEC). Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx>.
- Guimarães, R. (2017). *Capítulo 2 - Bacia Hidrográfica*. Évora: ECT da Universidade de Évora e ICAAM. Disponível em: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/22476>.
- Schiavetti, A. and Camargo, A. (2002). *Conceitos de Bacias Hidrográficas: Teorias e Aplicações*. Ilhéus, Brasil: Universidade Estadual de Santa Cruz.
- Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. (2019). *Avaliação Preliminar de Risco de Inundações RH 4A – Vouga, Mondego e Lis*. [online] Departamento de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=7&sub2ref=9&sub3ref=1250>.
- Fleming, M. and Doan, J. (2013). *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension*. Davis, California: US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center (HEC). Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/downloads.aspx>.
- Khadka, J. and Bhaukajee, J. (2018). *Rainfall-Runoff Simulation and Modelling Using HEC-HMS and HEC-RAS Models: Case Studies from Nepal and Sweden*. Master Thesis. Lund University - Division of Water Resources Engineering Department of Building and Environmental Technology.
- Melo, H., Cunha, J., Nóbrega, R., Rufino, I. & Galvão, C. (2015). *Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica (SIG): integração possível*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265885707_MODELOS_HIDROLOGICOS_E_SISTEMAS_DE_INFORMACAO_GEOGRAFICA_SIG_integracao_possivel.

Morais, P. (2013). *Os SIG no Processo de Criação de Instrumentos de Apoio à Decisão: O Mapa de Potencial Pedonal de Lisboa*. Tese de Mestrado. Universidade de Lisboa.

Ramos, C. (2013). *Perigos Naturais Devidos a Causas Meteorológicas: O Caso das Cheias e Inundações*. Porto: Universidade Lusófona do Porto. Disponível em: <https://revistas.ulusofona.pt/index.php/revistae-lp/article/view/3320>.

Rodrigues, C., Moreira, M. & Guimarães, R. (2011). *Apontamentos para as aulas de Hidrologia*. Évora: Departamento de Engenharia Rural. Disponível em: <http://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/4721>.

Scharffenberg, W. (2016). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*. Davis, California: Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC). Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation.aspx>.

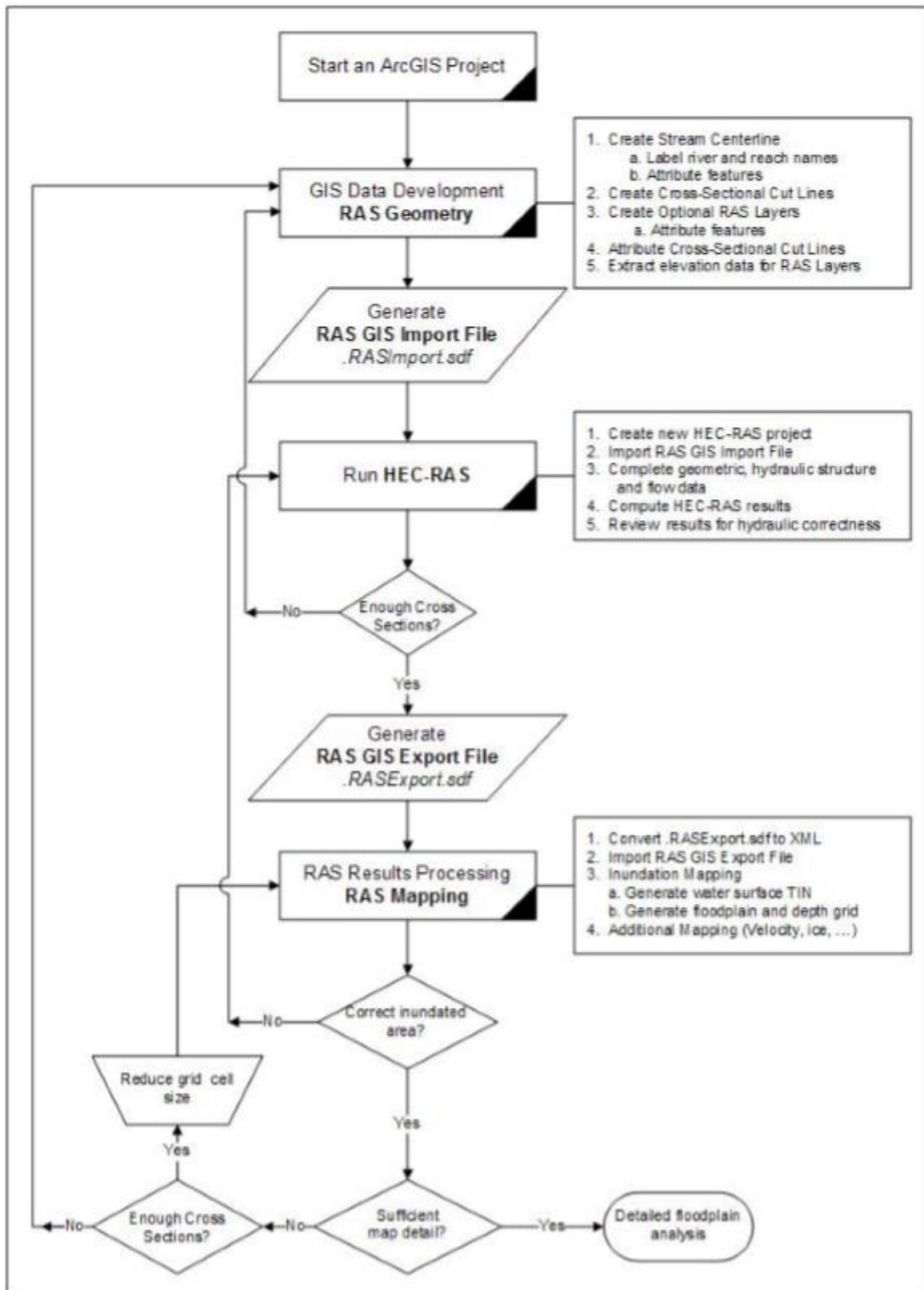
Tommaselli, A. (2009). *Fotogrametria Básica - Introdução*.

Ciabatti, I., Owen, P., Gilson, V., Gatter, L., Tanguy, B., Zimmerman, A., Critoph, H., Prigent, O., Bryan, K., Roberts, G. and Laanes, L. (2018). *Floods Directive: Progress in Assessing Risks, While Planning and Implementation Need to Improve*. [online] European Court of Auditors.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. [online] Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX_Full_Report-1.pdf.

ANEXOS

ANEXO 1 Fluxograma de Funcionamento do HEC-GeoRAS



ANEXO 2 Curvas de Vazão

Ponte Redonda:

Curva $Q = a * (h - h_0)^b$	H_0	$H_{min.}$	$H_{máx.}$
$Q = 11.07945 * (h - 0.877)^{2.35134}$	0.877	0.877	2.22
$Q = 1.1235 * (h - -0.64)^{2.83784}$	-0.64	2.22	5.00

Ribeiro:

Curva $Q = a * (h - h_0)^b$	H_0	$H_{min.}$	$H_{máx.}$
$Q = 16.22209 * (h - 0.80482)^{2.39444}$	0.80482	0.80482	1.82761
$Q = 4.63162 * (h - 0)^{2.16824}$	0	1.82761	4.5

Ponte Águeda:

Curva $Q = a * (h - h_0)^b$	H_0	$H_{min.}$	$H_{máx.}$
$Q = 10.065 * (h - -0.384)^{1.538}$	-0.384	-0.384	2.3

Onde:

- Q representa o caudal em m^3/s ;
- h representa a altura hidrométrica em metros (m);
- a e b são parâmetros da curva de vazão;
- h_0 representa a altura hidrométrica para a qual se anula o caudal;
- H_{min} representa a altura hidrométrica mínima de aplicação da equação;
- $H_{máx}$ representa a altura hidrométrica máxima de aplicação da equação;

ANEXO 3 Tabelas de coeficiente de rugosidade de Manning

Manning's n for Channels (Chow, 1959).

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
Natural streams - minor streams (top width at floodstage < 100 ft)			
1. Main Channels			
a. clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. same as "d" with more stones	0.045	0.050	0.060
g. sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.100	0.150
2. Mountain streams, no vegetation in channel, banks usually steep, trees and brush along banks submerged at high stages			
a. bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070
3. Floodplains			
a. Pasture, no brush			
1. short grass	0.025	0.030	0.035
2. high grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. no crop	0.020	0.030	0.040
2. mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200

2. cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
3. same as above, but with heavy growth of sprouts	0.050	0.060	0.080
4. heavy stand of timber, a few down trees, little undergrowth, flood stage below branches	0.080	0.100	0.120
5. same as 4. with flood stage reaching branches	0.100	0.120	0.160
4. Excavated or Dredged Channels			
a. Earth, straight, and uniform			
1. clean, recently completed	0.016	0.018	0.020
2. clean, after weathering	0.018	0.022	0.025
3. gravel, uniform section, clean	0.022	0.025	0.030
4. with short grass, few weeds	0.022	0.027	0.033
b. Earth winding and sluggish			
1. no vegetation	0.023	0.025	0.030
2. grass, some weeds	0.025	0.030	0.033
3. dense weeds or aquatic plants in deep channels	0.030	0.035	0.040
4. earth bottom and rubble sides	0.028	0.030	0.035
5. stony bottom and weedy banks	0.025	0.035	0.040
6. cobble bottom and clean sides	0.030	0.040	0.050
c. Dragline-excavated or dredged			
1. no vegetation	0.025	0.028	0.033
2. light brush on banks	0.035	0.050	0.060
d. Rock cuts			
1. smooth and uniform	0.025	0.035	0.040
2. jagged and irregular	0.035	0.040	0.050
e. Channels not maintained, weeds and brush uncut			
1. dense weeds, high as flow depth	0.050	0.080	0.120
2. clean bottom, brush on sides	0.040	0.050	0.080
3. same as above, highest stage of flow	0.045	0.070	0.110
4. dense brush, high stage	0.080	0.100	0.140
5. Lined or Constructed Channels			
a. Cement			
1. neat surface	0.010	0.011	0.013
2. mortar	0.011	0.013	0.015
b. Wood			
1. planed, untreated	0.010	0.012	0.014
2. planed, creosoted	0.011	0.012	0.015
3. unplanned	0.011	0.013	0.015
4. plank with battens	0.012	0.015	0.018
5. lined with roofing paper	0.010	0.014	0.017

c. Concrete			
1. trowel finish	0.011	0.013	0.015
2. float finish	0.013	0.015	0.016
3. finished, with gravel on bottom	0.015	0.017	0.020
4. unfinished	0.014	0.017	0.020
5. gunite, good section	0.016	0.019	0.023
6. gunite, wavy section	0.018	0.022	0.025
7. on good excavated rock	0.017	0.020	
8. on irregular excavated rock	0.022	0.027	
d. Concrete bottom float finish with sides of:			
1. dressed stone in mortar	0.015	0.017	0.020
2. random stone in mortar	0.017	0.020	0.024
3. cement rubble masonry, plastered	0.016	0.020	0.024
4. cement rubble masonry	0.020	0.025	0.030
5. dry rubble or riprap	0.020	0.030	0.035
e. Gravel bottom with sides of:			
1. formed concrete	0.017	0.020	0.025
2. random stone mortar	0.020	0.023	0.026
3. dry rubble or riprap	0.023	0.033	0.036
f. Brick			
1. glazed	0.011	0.013	0.015
2. in cement mortar	0.012	0.015	0.018
g. Masonry			
1. cemented rubble	0.017	0.025	0.030
2. dry rubble	0.023	0.032	0.035
h. Dressed ashlar/stone paving	0.013	0.015	0.017
i. Asphalt			
1. smooth	0.013	0.013	
2. rough	0.016	0.016	
j. Vegetal lining	0.030		0.500

ANEXO 4 Valores Iniciais e Calibrados Para Cada Parâmetro

Elementos	Parâmetros	Data		16-22Abril2008		21-27Dez2009		27Dez-2Jan 2009/2010		12-18jan2010		20-26Fev2010		26Fev-02Mar 2010		15-21Jan2013		30jan-5fev 2015		1-7jan2016	
		Valor Inicial	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.	Valor Opt.
R1020	Lag - Lag	0.26189	0.0153278	0.26189	0.11179	0.1711	0.0153278	0.0153278	0.0153278	0.0153278	1	0.0337978	0								
R1060	Lag - Lag	3.8966	3.8966	3.8966	4	3.8966	3.8966	4	4	4	4	4	4								
R1080	Lag - Lag	351.85	353.58	353.58	353.53	352.63	353.6	353.57	353.56	353.56	352	353.63	354								
R1160	Lag - Lag	12.211	10.99	12.089	12.089	12.15	10.99	10.99	12.089	12	10.99	11									
R1180	Lag - Lag	34	23.8	44.965	44.965	34	23.8	23.8	44.965	34	23.8	24									
R120	Lag - Lag	26.052	29.96	29.96	29.96	29.96	29.96	29.96	29.96	26	29.96	30									
R130	Lag - Lag	55.142	63.413	63.413	63.413	63.413	63.413	63.413	63.413	55	63.413	63									
R220	Lag - Lag	165.34	165.34	191.08	165	165.34	165.34	165	165	165	165	165									
R230	Lag - Lag	118	118.75	118.92	118.73	118.55	135.69	118.79	135.69	118	135.67	136									
R250	Lag - Lag	20.576	20.576	20.576	21	20.576	20.576	21	21	21	21	21									
R270	Lag - Lag	7.7669	7.7669	7.7669	8	7.7669	7.7669	8	8	8	8	8									
R320	Lag - Lag	44.107	44.107	50.469	42.36	43.225	44.107	44	44	44	44	44									
R340	Lag - Lag	81.201	77.985	81.201	81.201	81.201	79.73	79.776	81.201	81	79.988	80									
R360	Lag - Lag	181.02	163.78	163.75	181.62	181.32	162.1	162.1	163.74	181	162.1	162									
R80	Lag - Lag	29.232	33.449	33.449	33.449	33.617	33.449	33.449	33.449	29	33.449	33									
R910	Lag - Lag	37.988	37.988	37.988	38	37.988	37.988	38	38	38	38	38									
R930	Lag - Lag	37.977	37.977	37.977	38	37.977	37.977	38	38	38	38	38									
W1000	SCS Curve Number - Curve Numbe	75.143			72.167	67.629															
W1000	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	62			50.22	55.8															
W1010	SCS Curve Number - Curve Numbe	70			67.228	63															
W1010	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	9.0079			5.8852	6.0053															
W1050	SCS Curve Number - Curve Numbe	69	60.858	60.858	66.268	62.1	60.858	60.858	78	69	60.858	61									
W1050	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	9.0079	4.0035	5.8852	5.8852	4.0035	4.0035	4.0035	4.0035	9.0079	4.0035	5.4047									
W1070	SCS Curve Number - Curve Numbe	69	60.858	60.858	66.268	62.1	60.858	66.268	66.268	69	60.858	61									
W1070	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	182	160.52	182	178.36	160.52	160.52	160.52	160.52	182	160.52	161									
W1150	SCS Curve Number - Curve Numbe	70	61.74	61.74	67.228	63	61.74	62	62	70	62	62									
W1150	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	178	160.2	160.2	178	160.2	160.2	160	160	178	160	160									
W1170	SCS Curve Number - Curve Numbe	69	60.858	60.858	66.268	62.1	60.858	60.858	60.858	69	60.858	61									
W1170	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	33	29.106	31.693	29.106	29.7	29.106	29.106	26.73	33	29.106	29									
W410	SCS Curve Number - Curve Numbe	68	58.47	58.732	64.001	66.64	58.471	58.698	66.797	68	58.696	58									
W410	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	276.13	278.82	278.82	278.8	277.48	278.88	278.85	278.85	276	278.88	279									
W470	SCS Curve Number - Curve Numbe	68	53.976	53.976	65.307	61.2	53.976	65.307	53.976	68	65.307	60									
W470	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	103.1	103.1	103.1	104.13	103.1	103.1	104.13	103	103	103	103									
W490	SCS Curve Number - Curve Numbe	64	56.448	56.448	61.466	57.6	56.448	56.448	56.448	64	61.466	56									
W490	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	64	56.448	56.448	56.448	57.6	73.6	73.6	73.6	64	74	74									
W720	SCS Curve Number - Curve Numbe	66	58.212	58.212	63.386	59.4	58.212	63.386	58.212	66	63.386	58									
W720	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	180.05	180.05	180.05	180	180.05	180.05	180	180	180	180	180									
W740	SCS Curve Number - Curve Numbe	69	60.858	60.858	66.268	62.1	60.858	60.858	60.858	69	60.858	61									
W740	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	106	107	107.01	107.03	106.5	95.4	104.29	107.02	106	95.4	95									
W770	SCS Curve Number - Curve Numbe	69.337	61.155	61.155	66.591	62.403	61.155	61.155	78.236	69	61.155	61									
W770	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	122.2	119.76	119.76	117.36	119.76	122.2	117.36	120.31	122	122	122									
W780	SCS Curve Number - Curve Numbe	69	60.858	60.858	66.268	62.1	60.858	60.858	60.858	69	60.858	61									
W780	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	42	40.337	40.337	40.337	41.16	40.337	40.337	40.337	42	37	37									
W800	SCS Curve Number - Curve Numbe	70	61.74	61.74	67.228	63	61.74	62	78.7	70	62	62									
W800	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	110	111	111.03	111.06	110.51	97.02	110.46	111.04	110	97	97									
W810	SCS Curve Number - Curve Numbe	69	60.858	60.858	66.268	62.1	60.858	66.268	60.858	69	66.268	61									
W810	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	152.69	152.69	152.69	134.67	137.42	152.69	153	153	153	153	153									
W900	SCS Curve Number - Curve Numbe	74.272			71.331	66.845															
W900	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	142.99			137.33	140.13															

ANEXO 5 Valores da Função Objetivo para cada Simulação

Data	7-12 de abril de 2008			16-22 de abril de 2008			21-27 de Dezembro de 2009			27 de dezembro de 2009 a 2 de janeiro de 2010		
Coefficiente Original de Nash-Sutcliffe na estação hidrométrica de Riberio	0.786			0.877			0.718			0.094		
Coefficiente Original de Nash-Sutcliffe na estação hidrométrica de Ponte Redonda	0.679			0.796			0.422			0.162		
	Cal1	Cal2	Cal3	Cal1	Cal2	Cal3	Cal1	Cal2	Cal3	Cal1	Cal2	Cal3
Coefficiente de Nash-Sutcliffe na estação hidrométrica de Riberio	-	0.793	0.789	0.875	-	0.873	0.495	0.507	0.48	0.073	0.0804	0.059
Pico de Cheia Simulado	-	11:25	11:15	17:05	-	17:05	10:40	10:40	10:45	12:25	12:25	12:15
Pico de Cheia Observado	-	11:00	11:00	13:30	-	13:30	6:45	6:45	6:45	9:15	9:15	9:15
Coefficiente de Nash-Sutcliffe na estação hidrométrica de Ponte Redonda	-	0.694	0.662	0.789	-	0.786	0.564	0.576	0.545	0.163	0.206	0.166
Pico de Cheia Simulado	-	7:45	7:20	12:40	-	12:55	2:30	2:55	2:20	7:10	7:35	7:20
Pico de Cheia Observado	-	4:45	4:45	10:45	-	10:45	5:15	5:15	5:15	6:30	6:30	6:30

Cal1	7-12 Abril 2008
Cal2	16-22 Abril 2008
Cal3	1-7 Janeiro 2016

Data	12-18 de janeiro de 2010			20-26 de Fevereiro de 2010			26 de fevereiro a 02 de março de 2010			15-21 de janeiro de 2013			30 de janeiro a 5 de fevereiro de 2015		
Coefficiente Original de Nash-Sutcliffe na estação hidrométrica de Riberio	0.814			0.796			0.575			-			-		
Coefficiente Original de Nash-Sutcliffe na estação hidrométrica de Ponte Redonda	0.079			-0.41			-2.937			0.627			0.828		
	Cal1	Cal2	Cal3	Cal1	Cal2	Cal3	Cal1	Cal2	Cal3	Cal1	Cal2	Cal3	Cal1	Cal2	Cal3
Coefficiente de Nash-Sutcliffe na estação hidrométrica de Riberio	0.814	0.816	0.812	0.813	0.812	0.815	0.464	0.467	0.46	-	-	-	-	-	-
Pico de Cheia Simulado	1/16/2010 22:20	1/16/2010 22:15	1/16/2010 22:20	16:15	16:10	16:15	3/1/2010 7:05	3/1/2010 4:30	3/1/2010 7:05	-	-	-	-	-	-
Pico de Cheia Observado	1/14/2010 2:15	1/14/2010 2:15	1/14/2010 2:15	12:45	12:45	12:45	2/28/2010 1:15	2/28/2010 1:15	2/28/2010 1:15	-	-	-	-	-	-
Coefficiente de Nash-Sutcliffe na estação hidrométrica de Ponte Redonda	0.075	0.133	0.08	-0.162	-0.044	-0.169	-3.72	-3.614	-3.668	0.681	0.69	0.674	0.815	0.804	0.816
Pico de Cheia Simulado	1/16/2010 17:00	1/16/2010 17:15	1/16/2010 17:05	8:50	9:15	8:45	2/28/2010 23:40	3/1/2010 0:00	2/28/2010 23:40	2:10	2:45	2:15	2:40	3:15	2:40
Pico de Cheia Observado	1/13/2010 21:15	1/13/2010 21:15	1/13/2010 21:15	11:15	11:15	11:15	2/27/2010 22:45	2/27/2010 22:45	2/27/2010 22:45	1:45	1:45	1:45	0:00	0:00	0:00

ANEXO 6 Valores de Todos os Parâmetros iniciais e calibrados da Cal2

Elementos	Parâmetros	Valor Inicial	Valor Opt.
R1020	Lag - Lag	0.26189	0.26189
R1060	Lag - Lag	3.8966	3.8966
R1080	Lag - Lag	351.85	353.58
R1160	Lag - Lag	12.211	12.089
R1180	Lag - Lag	34	44.965
R120	Lag - Lag	26.052	29.96
R130	Lag - Lag	55.142	63.413
R220	Lag - Lag	165.34	191.08
R230	Lag - Lag	118	118.92
R250	Lag - Lag	20.576	20.576
R270	Lag - Lag	7.7669	7.7669
R320	Lag - Lag	44.107	50.469
R340	Lag - Lag	81.201	81.201
R360	Lag - Lag	181.02	163.75
R80	Lag - Lag	29.232	33.449
R910	Lag - Lag	37.988	37.988
R930	Lag - Lag	37.977	37.977
W1000	SCS Curve Number - Curve Number	75.143	
W1000	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	62	
W1010	SCS Curve Number - Curve Number	70	
W1010	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	9.0079	
W1050	SCS Curve Number - Curve Number	69	60.858
W1050	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	9.0079	5.8852
W1070	SCS Curve Number - Curve Number	69	60.858
W1070	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	182	182

Elementos	Parâmetros	Valor Inicial	Valor Opt.
W1150	SCS Curve Number - Curve Number	70	61.74
W1150	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	178	160.2
W1170	SCS Curve Number - Curve Number	69	60.858
W1170	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	33	31.693
W410	SCS Curve Number - Curve Number	68	58.732
W410	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	276.13	278.82
W470	SCS Curve Number - Curve Number	68	59.976
W470	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	103.1	103.1
W490	SCS Curve Number - Curve Number	64	56.448
W490	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	64	56.448
W720	SCS Curve Number - Curve Number	66	58.212
W720	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	180.05	180.05
W740	SCS Curve Number - Curve Number	69	60.858
W740	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	106	107.01
W770	SCS Curve Number - Curve Number	69.337	61.155
W770	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	122.2	119.76
W780	SCS Curve Number - Curve Number	69	60.858
W780	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	42	40.337
W800	SCS Curve Number - Curve Number	70	61.74
W800	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	110	111.03
W810	SCS Curve Number - Curve Number	69	60.858
W810	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	152.69	152.69
W900	SCS Curve Number - Curve Number	74.272	
W900	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	142.99	

ANEXO 7 Valores do Coeficiente de Rugosidade de Manning para Estradas, Árvores, Casas, Muros e Betão

ESTRADAS				
	Min	Normal	Máx	Méd
Lisas	0.013	0.013	-	0.0145
Rugosas	0.016	0.016	-	

ÁRVORES				
	Min	Normal	Máx	Méd
Vegetação densa com algumas árvores caídas e vegetação rasteira	0.080	0.100	0.120	0.100

CASAS				
	Min	Normal	Máx	Méd
Cimento				0.0155
Acabamento de Espátula	0.011	0.013	0.015	
Acabamento flutuante	0.013	0.015	0.016	
Acabamento com fundo de cascalho	0.015	0.017	0.020	

MURDS				
	Min	Normal	Máx	Méd
Muro de Tijolo	0.011	0.013	0.015	0.013

BETÃO				
	Min	Normal	Máx	Méd
trowel finish	0.011	0.013	0.015	0.019
float finish	0.013	0.015	0.016	
finished, with gravel on bottom	0.015	0.017	0.02	
unfinished	0.014	0.017	0.02	
gunite, good section	0.016	0.019	0.023	
gunite, wavy section	0.018	0.022	0.025	
on good excavated rock	0.017	0.02	-	
on irregular excavated rock	0.022	0.027	-	

CAMPOS				
	Min	Normal	Máx	Méd
<i>s/ cultura</i>	0.02	0.03	0.035	0.035
algumas culturas maduras	0.025	0.035	0.045	
maioritariamente culturas maduras	0.03	0.04	0.05	

ARBUSTOS				
	Min	Normal	Máx	Méd
Arbustos dispersos	0.035	0.050	0.070	0.0975
Alguns arbustos e árvores no inverno	0.035	0.050	0.060	
Alguns arbustos e árvores no verão	0.040	0.060	0.080	
Média densidade de arbustos no inverno	0.045	0.070	0.110	
Média densidade de arbustos no verão	0.070	0.100	0.160	

Linhas de Água				
	Min	Normal	Máx	Méd
clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033	0.0875
same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040	
clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045	
same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050	
same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055	
same as above but with more stones	0.045	0.05	0.06	
sluggish reaches, weedy, deep pools	0.05	0.07	0.08	
very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.1	0.15	

ANEXO 8 Resultados da calibração para todos os valores selecionados do coeficiente de rugosidade de Manning

MDT Sem Canal								
Janeiro 2009	Designação	Indicador	N=0.025	N=0.035	N=0.055	N=0.085	N=0.115	N=0.150
	Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient	NSE	0.72	0.76	0.69	0.51	0.40	0.27
	Mean absolute error	MAE	0.37	0.33	0.41	0.53	0.59	0.66
	Correlação Pearson	R	0.86	0.88	0.89	0.91	0.92	0.93
	Coefficiente de Determinação	R2	0.75	0.77	0.80	0.83	0.85	0.86
Dezembro 2009	Designação	Indicador	N=0.025	N=0.035	N=0.055	N=0.085	N=0.115	N=0.150
	Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient	NSE	0.34	0.53	0.52	-0.39	-1.13	-2.04
	Mean absolute error	MAE	0.37	0.33	0.33	0.60	0.78	0.96
	Correlação Pearson	R	0.81	0.81	0.81	0.83	0.83	0.84
	Coefficiente de Determinação	R2	0.65	0.66	0.66	0.69	0.69	0.70
Janeiro 2010	Designação	Indicador	N=0.025	N=0.035	N=0.055	N=0.085	N=0.115	N=0.150
	Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient	NSE	-1.61	-2.63	-0.23	0.09	0.08	0.61
	Mean absolute error	MAE	0.65	0.98	0.50	0.47	0.47	0.29
	Correlação Pearson	R	0.86	0.83	0.85	0.84	0.83	0.82
	Coefficiente de Determinação	R2	0.74	0.69	0.71	0.70	0.69	0.68
Maio 2012	Designação	Indicador	N=0.025	N=0.035	N=0.055	N=0.085	N=0.115	N=0.150
	Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient	NSE	-0.46	-0.29	-0.03	0.16	0.26	0.35
	Mean absolute error	MAE	1.01	0.94	0.81	0.73	0.68	0.63
	Correlação Pearson	R	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.78
	Coefficiente de Determinação	R2	0.47	0.50	0.53	0.57	0.59	0.61
MDT com Canal								
Fevereiro 2016	Designação	Indicador	N=0.025	N=0.035	N=0.055	N=0.085	N=0.115	N=0.150
	Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient	NSE	-0.23	0.09	0.41	0.61	0.69	0.73
	Mean absolute error	MAE	0.73	0.62	0.49	0.38	0.33	0.30
	Correlação Pearson	R	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.97
	Coefficiente de Determinação	R2	0.88	0.90	0.92	0.94	0.94	0.94
15-17 Dezembro 2018	Designação	Indicador	N=0.025	N=0.035	N=0.055	N=0.085	N=0.115	N=0.150
	Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient	NSE	0.11	-0.04	-0.25	-0.52	-0.77	-0.97
	Mean absolute error	MAE	1.03	1.11	1.28	1.48	1.64	1.76
	Correlação Pearson	R	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.82
	Coefficiente de Determinação	R2	0.61	0.62	0.64	0.65	0.67	0.68
17-19 Dezembro 2018	Designação	Indicador	N=0.025	N=0.035	N=0.055	N=0.085	N=0.115	N=0.150
	Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient	NSE	-1.53	-2.35	-4.01	-6.10	-7.78	-9.40
	Mean absolute error	MAE	0.49	0.61	0.84	1.07	1.22	1.37
	Correlação Pearson	R	0.28	0.30	0.33	0.37	0.37	0.44
	Coefficiente de Determinação	R2	0.08	0.09	0.11	0.14	0.14	0.19
Fevereiro 2019	Designação	Indicador	N=0.025	N=0.035	N=0.055	N=0.085	N=0.115	N=0.150
	Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient	NSE	-0.19	0.35	0.49	0.31	0.14	-0.11
	Mean absolute error	MAE	0.50	0.35	0.27	0.34	0.40	0.47
	Correlação Pearson	R	0.71	0.74	0.73	0.71	0.70	0.70
	Coefficiente de Determinação	R2	0.51	0.54	0.53	0.50	0.49	0.49