



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE / DEPARTMENT OF
ENGENHARIA CIVIL

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Cidades
Sustentáveis e Inteligentes

Autor / Author

Rafael Lopes Morgado

Orientador

Filipe Alexandre Almeida Ningre de Sá

Coimbra, dezembro de 2025



RESUMO

Com este trabalho de mestrado, pretende-se identificar indicadores de desempenho chave (KPI) provenientes da revisão da literatura, com o intuito de assinalar os que têm maior concordância entre os especialistas participantes no Método *Delphi*, e posterior aplicação de um indicador como prova de conceito, enquadrado num modelo de sistema de alerta de previsão de cheias e inundações para o caso de Coimbra.

Numa primeira fase, esta dissertação apresenta uma revisão de literatura elaborada através da análise de uma amostra criteriosa de livros, dissertações, teses e artigos científicos da área, no sentido de entender os conceitos de hidrologia e a arquitetura de sistemas de alerta ativos para a previsão de cheias, permitindo paralelamente a identificação de uma lista de indicadores de desempenho com potencialidade de avaliação de um sistema de alerta.

Seguidamente submeteu-se a listagem de indicadores a um processo do Método *Delphi*, com o intuito de se validar, acrescentar, retirar ou aprofundar indicadores divididos em quatro dimensões. Este método permitiu atingir o consenso em duas rondas, e contou com a participação de vinte e três especialistas. Como resultado do processo do Método *Delphi*, verificou-se uma máxima concordância por parte dos especialistas em nove indicadores, distribuídos por quatro dimensões.

A partir deste contexto, um dos indicadores foi selecionado como prova de conceito – Áreas Inundadas Previstas e Reais – onde se realizou uma análise cartográfica com recurso às ferramentas de SIG, e se comparou zonas inundadas no evento histórico de 2001 em Coimbra com os limites de áreas de inundação previstos pelo PGRH – RH4A (elaborado pela APA) para períodos de retorno de 20, 100 e 1000 anos numa amostra de 3 km² escolhida pelo seu histórico recorrente de inundação.

Além desta análise, efetuou-se também a análise da Cartografia de Zonas Inundáveis, oriunda também do mesmo Plano, onde se representou em mapas os níveis e áreas da Perigosidade de Inundação, Consequência / Exposição de Inundação e Risco de Inundação para os períodos de retorno de 20, 100 e 1000 anos.

Resumindo, os resultados obtidos com esta amostra selecionada indicam que as ferramentas de SIG são fundamentais para extrair informações espaciais, com o poder de direcionar planos de emergência para uma maior prontidão em zonas potencialmente afetadas, bem como a importância e existência dos sistemas de alerta, e de que forma os podemos instalar e deles nos servir.

Palavras-chave: Mondego, Sistema de Alerta, Bacia Hidrográfica, Proteção Civil, Cheias, Inteligência Artificial.

ABSTRACT

Through this master's thesis, the aim is to identify key performance indicators (KPIs) derived from the literature review, in order to highlight those that show the highest level of agreement among the experts participating in the Delphi Method, followed by the application of one selected indicator as a proof of concept framed within a flood and inundation forecasting system model for the case of Coimbra.

In the first phase, this thesis presents a literature review developed through the analysis of a carefully selected sample of books, dissertations, theses, and scientific articles in the field, with the aim of understanding the concepts of hydrology and the architecture of active alert systems for flood forecasting. At the same time, this process enables the identification of a list of performance indicators with potential applicability in the assessment of an alert system.

Subsequently, the list of indicators was submitted to a Delphi Method process, with the purpose of validating, adding, removing, or refining indicators grouped into four dimensions. This method enabled consensus to be reached in two rounds, involving the participation of twenty-three experts. As a result of the Delphi process, a high level of agreement was achieved among the experts on nine indicators, distributed across the four dimensions.

From this context, one indicator was selected as a proof of concept — *Predicted and Actual Flooded Areas* — for which a cartographic analysis was conducted using GIS tools. This analysis compared the flooded zones from the historical 2001 event in Coimbra with the flood extent limits predicted by the River Basin Management Plan – RH4A (developed by APA) for return periods of 20, 100, and 1000 years, within a 3 km² sample area chosen for its recurrent history of flooding.

Later in the research, the *Flood Hazard Mapping* from the same Plan was examined in more detail. This stage of the study involved working with several maps that showed how *Flood Hazard*, *Flood Consequence/Exposure*, and *Flood Risk* change across the area for return periods of 20, 100, and 1000 years.

Looking at the results as a whole, it is evident that GIS tools are key for understanding spatial patterns and for helping design emergency measures in areas most exposed to flooding. The work also underlines the importance of early-warning systems, drawing attention to how they should be planned and managed so that they can actually function effectively when required.

Keywords: Mondego, Warning System, River Basin, Civil Protection, Floods, Artificial Intelligence.

*Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e
Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra*

EPIGRAFE

Quem controla o passado controla o futuro. Quem controla o presente controla o passado.

George Orwell, 1984.

AGRADECIMENTOS

Ao longo do nosso percurso académico, o qual veio agora culminar com a realização desta dissertação de mestrado, muitos foram os contributos que direta ou indiretamente nos despertam e encorajam a percorrer e a finalizar este caminho, abrindo os nossos olhos de forma irreversível que transformam a nossa maneira de ver e estar no mundo.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pelo caloroso acolhimento ao longo destes anos e o privilégio de ter pertencido a esta grandiosa escola.

Ao professor Filipe Sá, orientador deste trabalho, pelo apoio incansável, pelo estímulo, aconselhamento, pelas críticas e sugestões relevantes realizadas durante este longo processo, pela sua objetividade que se revelou fundamental neste trabalho, pela disponibilidade sempre revelada e sobretudo, pela amizade e confiança demonstrada.

À minha família, pais e irmã pelo apoio incondicional, incentivo, paciência, amizade e confiança em mim depositada, fundamental para a superação dos obstáculos que ao longo desta caminhada me foram surgindo, fazendo-me acreditar que era possível finalizar esta importante etapa com sucesso.

À minha namorada, ouvinte das minhas inquietações, incertezas, alegrias, dúvidas e êxitos, pela compreensão e valorização sempre tão entusiasta do meu trabalho.

A todos os especialistas intervenientes no Método *Delphi*, cuja sua contribuição permitiu alcançar um dos objetivos da dissertação.

Aos meus amigos, que foram presença constante ao longo do percurso académico e com grande estima e carinho sempre me apoiaram.

Índice de Texto

Resumo	i
Abstract.....	ii
Epígrafe.....	iii
Agradecimentos	iv
1 Introdução.....	1
1.1 Problemática de cheias e inundações em Coimbra.....	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Motivação.....	4
1.4 Metodologia de Investigação	5
1.5 Estrutura da Dissertação	8
2 Revisão Genérica da Literatura.....	10
2.1 Ciclo Hidrológico.....	10
2.2 Bacia Hidrográfica.....	10
2.2.1 Definição.....	10
2.2.2 Caraterísticas Geométricas	11
2.2.3 Caraterísticas do Sistema de Drenagem	14
2.2.4 Caraterísticas do Relevo.....	16
2.3 Balanço Hidrológico	18
2.4 Precipitação	19
2.4.1 Tipos de precipitação	19
2.4.2 Medição de precipitação	21
2.5 Escoamento	22
2.5.1 Processo de escoamento.....	22
2.5.2 Componentes do escoamento	23
2.5.3 Fatores que influenciam o escoamento	23
2.5.4 Métodos de medição de escoamento superficial.....	24
2.6 Cheias e Inundações	27
2.6.1 Cheias	27
2.6.2 Inundações.....	28
3 Revisão Sistemática da Literatura: Sistemas de Alerta.....	30
3.1 Sistemas de Alerta em Contexto Nacional.....	30
3.2 Sistemas de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações	32

3.2.1	Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH).....	32
3.3	Modelação	33
3.3.1	Modelos Meteorológicos	34
3.3.2	Modelos Hidrológicos.....	37
3.3.3	Modelos Hidráulicos	41
3.4	Revisão de Sistemas de Alerta Operacionais	42
3.4.1	FFAS (<i>Flood Forecast and Alert System</i>).....	43
3.4.2	Sistema Integrado para a Zona Ribeirinha de Ponte de Lima	48
3.4.3	MERLIN (Modelo de Evaluación del Riesgo Local de INundación)	52
3.4.4	MIDAS (Miño River Flood Alert System).....	56
3.5	Comparação dos Sistemas de Alertas apresentados	61
4	Rede Hidrográfica do Rio Mondego	63
4.1	Âmbito territorial	63
4.2	Regime hidrológico	64
4.3	Intervenção hidráulica no rio Mondego.....	65
4.3.1	Intervenções - Sistema regulado Aguieira - Raiva – Fronhas	66
4.4	Historial de inundações em Coimbra	69
4.4.1	Inundações significativas	70
5	Key Performance Indicators (KPI).....	73
5.1	KPI's Identificados na Revisão da Literatura	73
5.1.1	KPI's Ambientais.....	74
5.1.2	KPI's Económicos	76
5.1.3	KPI's Sociais.....	78
5.1.4	KPI's Tecnológicos	81
6	Aplicação do Método <i>Delphi</i>.....	84
6.1	Método <i>Delphi</i>	84
6.2	Painel de Especialistas	84
6.3	Elaboração da Primeira Ronda.....	85
6.3.1	Resultados da Primeira Ronda.....	87
6.4	Elaboração da Segunda Ronda.....	92
6.4.1	Resultados da Segunda Ronda.....	95

7 Prova de Conceito: Aplicação dos Sistemas de Informação Geográficos	101
7.1 Enquadramento Legal Europeu.....	101
7.1.1 Cartas de Zonas Inundáveis.....	101
7.1.2 Cartas de Risco de Inundação.....	102
7.2 Cartografia de Inundações.....	102
7.2.1 Análise Espacial de Zonas Inundáveis.....	104
7.3 Prova de Conceito – Teste de KPI.....	110
7.3.1 Áreas Inundadas Previstas e Reais.....	110
8 Conclusões.....	119
8.1 Principais conclusões.....	119
8.2 Possibilidades de Trabalho Futuro.....	120
9 Referências Bibliográficas.....	122
Anexos.....	137
Anexo A – Drenagem Urbana.....	138
Anexo B – Inteligência Artificial (IA).....	147
Anexo C – Convite – Método <i>Delphi</i>	155
Anexo D – Taxa de Coordenação Interinstitucional.....	156

Índice de Figuras

Figura 1 - Fluxograma de abordagem da dissertação.....	5
Figura 2 - Linhas de festo e talvegue numa carta de curvas de nível (Guimarães, 2017)	11
Figura 3 - Tipos de geometria e respetiva influência nos caudais (Goerl <i>et al.</i> , 2012)	12
Figura 4 - Classificação dos cursos de água segundo Horton e Strahler (Guimarães, 2017).....	15
Figura 5 - Curva hipsométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Mondego (Guimarães, 2017).....	17
Figura 6 - Perfil longitudinal do Rio Mondego (Lencastre e Franco, 1984)	18
Figura 7 - Idealização do balanço hidrológico (Lima <i>et al.</i> , 2010)	19
Figura 8 - Exemplos de descarregadores de soleira delgada (a) e soleira espessa (b) (Lencastre e Franco, 1984)	26
Figura 9 - Exemplo de curva de vazão em Entre-os-Rios (Rocha, 2008)	27
Figura 10 - Classificação dos modelos hidrológicos consoante a forma como tratam as dimensões de aleatoriedade e variabilidade espacial e temporal dos fenómenos hidrológicos (adaptado de Chow <i>et al.</i> , 1988).....	39
Figura 11 - Localização da bacia hidrográfica do rio Mondego (à esquerda) e principais afluentes do rio Mondego (direita) (Mendes, 2017)	64
Figura 12 - Planta Geral do Aproveitamento Hidráulico da Bacia do Mondego (Proença, 2020)	66
Figura 13 - Barragens do Plano Geral de Aproveitamento Hidráulico da Bacia do Mondego (PGRH-RH4, 3º Ciclo, 2022).....	66
Figura 14 - Cheia de 1948 em Coimbra (Marques & Pina, 2013).....	70
Figura 15 - Cheia de 2001 a atingir o Parque da Canção em Coimbra (Temido, 2011)	71
Figura 16 - Convento de Santa Clara a Velha inundado (Miranda, 2016).....	72
Figura 17 - Apresentação de um KPI relativo a uma das quatro dimensões (Social)	86
Figura 18 - Representação da Perigosidade de Inundação prevista na cartografia de zonas inundáveis para os vários períodos de retorno para o concelho de Coimbra	105

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

Figura 19 - Representação da Consequência / Exposição de Inundação prevista na cartografia de zonas inundáveis para os vários períodos de retorno para o concelho de Coimbra.....	107
Figura 20 - Representação do Risco de Inundação previsto na cartografia de zonas inundáveis para os vários períodos de retorno para o concelho de Coimbra.....	109
Figura 21 - Representação das zonas inundadas na cheia de 2001 e do perfil do rio Mondego em períodos normais.....	111
Figura 22 - Representação da Área de Interesse.....	112
Figura 23 - Representação dos Limites da área de inundação e do perfil do rio Mondego para um Período de Retorno de 20 anos.....	113
Figura 24 - Representação dos Limites da área de inundação e do perfil do rio Mondego para um Período de Retorno de 100 anos.....	113
Figura 25 - Representação dos Limites da área de inundação e do perfil do rio Mondego para um Período de Retorno de 1000 anos.....	114
Figura 26 - Representação dos Limites da área de inundação e do perfil do rio Mondego para todos os Períodos de Retorno (junção).....	114
Figura 27 - Representação das zonas de inundação à esquerda, com a interseção do perfil do Rio Mondego nas zonas inundadas à direita.....	115
Figura 28 - Comparação dos limites de áreas de inundação previstos com as zonas de inundação do evento de cheia de janeiro de 2001 em Coimbra.....	116

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Valores do fator de forma e respetivo risco de inundação	13
Tabela 2 - Comparação dos tipos de precipitações convectivas, ciclónicas e orográficas consoante vários critérios (Elaboração própria - fonte (Bertoni & Tucci, 2001))	21
Tabela 3 - Representação dos níveis de alerta (perigosidade) e a profundidade da água correspondente a cada uma destas classes.....	46
Tabela 4 - Representação dos limiares de inundação e alerta definidos para a secção intermédia do areal de Ponte de Lima	50
Tabela 5 - Representação dos níveis de alerta definidos bem como a sua descrição e cor associada, de acordo com as bacias hidrográficas referenciadas.....	55
Tabela 6 - Representação de níveis de alerta e limiares de perigo de inundação do rio Minho para a cidade de Ourense.....	59
Tabela 7 - Comparação dos quatro Sistemas de Alerta de previsão de cheias e inundações.....	61
Tabela 8 - Perfis de especialistas que responderam na primeira ronda	87
Tabela 9 - Quantidade de respostas por cada município onde residem os especialistas com respostas na primeira ronda.....	88
Tabela 10 - Média e desvio padrão das pontuações atribuídas	89
Tabela 11 - Representação dos percentis e o peso atribuído a cada um deles.....	90
Tabela 12 - Representação do peso atribuído e percentil atribuído a cada KPI, de acordo com o seu nível de concordância	91
Tabela 13 - Consistência de cada atribuição.....	91
Tabela 14 - Atribuição de pontuações para a média, desvio padrão, coeficiente de variação e concordância da segunda ronda	96
Tabela 15 - Representação dos percentis e o peso atribuído a cada um deles (2ª Ronda).....	99
Tabela 16 - Representação do peso e percentil atribuído a cada KPI, de acordo com o seu nível de concordância (2ª ronda)	99
Tabela 17 - Área dos limites de inundação em km ² para os períodos de retorno.	115

Siglas e Acrónimos

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
ANEPC	Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ARPSI	Áreas de Risco Potencial Significativo de Inundação
ARPSIS	Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundaciones
ARH	Administrações de Região Hidrográfica
CAOP	Carta Administrativa Oficial de Portugal
CE	Comunidade Europeia
CFL	<i>Courant-Friedrichs-Leny</i>
CHMS	Confederación Hidrográfica del Miño-Sil
CIM-RC	Comunidade Intermunicipal da Região de Coimbra
COS	Carta de Ocupação do Solo
DAGRI	Diretiva de Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundações
DGRAH	Direção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos
DGT	Direção Geral do Território
ECMWF	<i>European Centre of Medium-Range Weather Forecast</i>
EDP	Energias de Portugal
EFAS	<i>European Flood Awareness System</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
EUA	Estados Unidos da América
EWS	<i>Early Warning System</i>
FEDER	Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FEWRS	<i>Flood Early Warning and Response Systems</i>
FFAS	<i>Flood Forecast and Alert System</i>
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GFS	<i>Global Forecast System</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modelling System</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center – River Analysis System</i>
IA	Inteligência Artificial
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
KDD	<i>Knowledge Discovery in Databases</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MCGAs	Modelos de Circulação Geral da Atmosfera
MDPI	<i>Multidisciplinary Digital Publishing Institute</i>
MDT	Modelo Digital do Terreno
MERLIN	Modelo de Evaluación del Riesgo Local de INundación
MIDAS	<i>Miño River Flood Alert System</i>
ML	<i>Machine Learning</i>
NAC	Núcleo de Apoio ao Centro
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NME	Nível Mínimo de Exploração

NMC	Nível Máximo de Cheia
NPA	Nível de Pleno Armazenamento
NSE	<i>Nash-Sutcliffe Efficiency</i>
NWP	<i>Numerical Weather Prediction</i>
PGRH	Plano de Gestão de Região Hidrográfica
PGRI	Plano de Gestão do Risco de Inundações
PNT	Previsão Numérica do Tempo
RAMS	<i>Regional Atmospheric Modelling System</i>
RGSPDADAR	Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais
RH1	Região Hidrográfica do Minho e Lima
RH4A	Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis
RNA's	Redes Neurais Artificiais
ROMS	<i>Regional Ocean Modeling System</i>
SCS-CN	<i>Soil Conservation Service – Curve Number</i>
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SIOPS	Sistema Integrado de Operadores de Proteção e Socorro
SMAP	<i>Soil Moisture Active Passive</i>
SNIG	Sistema Nacional de Informação Geográfica
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SUDS	Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis
SVAC	Sistema de Vigilância e Alerta de Cheias
SVARH	Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
EU	União Europeia
USD	<i>United States Dollar</i>
UNDRR	<i>United Nations Office for Disaster Risk Reduction</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>

1 INTRODUÇÃO

As cheias e as inundações são dos riscos mais impactantes nas sociedades, com repercussões cada vez mais severas (Ferreira, 2022). O incremento da intensidade e frequência de fenómenos extremos de precipitação, segundo o mesmo autor, aliado ao aumento da impermeabilização dos solos e ao subdimensionamento dos sistemas de drenagem artificiais, devido à expansão urbana, resultam na diminuição da infiltração e no aumento dos caudais de escoamento superficial direto, o que favorece a sua ocorrência.

A rápida urbanização ocasiona inúmeros problemas ambientais, económicos e sociais, visto que avaliar o processo de urbanização e promover um desenvolvimento urbano sustentável se tornou atualmente no desafio das sociedades, dos Estados e das organizações, tal como explica Rocha (2019).

Verificam-se a nível regional e nacional, inundações urbanas causadoras de danos e prejuízos por vezes mitigáveis com uma boa prevenção, embora se registre como problema central a falta de previsão, o que prejudica a capacidade de resposta da ANEPC e das autoridades competentes.

Com os avanços tecnológicos, disponibilização de dados e aperfeiçoamento contínuo da IA (Inteligência Artificial) que se verifica atualmente, torna-se necessário aplicar estas ferramentas inovadoras para dar resposta aos problemas atuais. Nesse âmbito, no presente trabalho pretende-se desenvolver valências que possam integrar um modelo de um sistema de alerta de previsão de cheias e inundações urbanas, especificamente para a cidade de Coimbra.

Além da revisão das arquiteturas de quatro sistemas de alerta de previsão de cheias e inundações que atuam em Portugal e Espanha, de onde se extraíram as potencialidades de cada um deles, procedeu-se também à seleção de KPI's (*Key Performance Indicators*) – Indicadores de desempenho chave – presentes em artigos técnico-científicos que descrevem outros sistemas de alerta a nível mundial, no sentido de os implementar no Método *Delphi* para validação por parte do painel de especialistas.

Após a elaboração do Método *Delphi*, pretende-se extrair um KPI como prova de conceito, a fim de combinar dados espaciais da cartografia digital relativa ao risco de inundação e zonas inundáveis, cartografia disponibilizada pela Direção Geral do Território (DGT) e Agência Portuguesa do Ambiente (APA), cuja elaboração é exigida no Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis (PGRH – RH4A).

O processamento da informação cartográfica, com recurso à aplicação dos SIG (Sistemas de Informação Geográfica), mais propriamente o *software* QGIS, permitiu

analisar o contraste entre os limites previstos de risco de inundação com o evento específico de janeiro de 2001, que marcou a cidade de Coimbra no presente século.

1.1 Problemática de cheias e inundações em Coimbra

Paiva (2009) afirma que o rio Mondego se trata de um dos casos mais problemáticos no panorama hidrológico nacional, tal a frequência de cheias e inundações no seu setor vestibular como resultado dos elevados caudais daí afluentes.

Embora existam vários fatores que interferem nas inundações urbanas na cidade de Coimbra, a ocorrência de chuvadas intensas sobre a cidade provoca um excedente hídrico devido à impermeabilização do solo urbano, o que pode também ocasionar situações com determinada gravidade, decorrentes da dificuldade dos coletores pluviais na recolha da água precipitada, de modo a que se pode afirmar que a génese principal das inundações reside na precipitação, explica o autor (Paiva, 2009).

Perante os impactos provocados pelos fenómenos naturais, ampliados pela intervenção humana, surge a necessidade de prever de forma eficaz tais acontecimentos, com vista a mitigá-los. Uma atuação preventiva de agentes da Proteção Civil pode reduzir consideravelmente os prejuízos e danos causados por inundações.

O contributo do projeto em causa para Coimbra visa a identificação de indicadores de desempenho com a finalidade de complementar sistemas de alerta de previsão de cheias e inundações. Com a revisão intensiva da literatura relativamente às arquiteturas dos sistemas de alerta, verificou-se a existência de vários indicadores que contribuem para a eficácia do sistema. Dessa forma, após a extração destas valências urge a necessidade de os validar perante um painel de especialistas no Método *Delphi*.

Após a validação dos indicadores, prosseguiu-se com a seleção de um indicador como prova de conceito. Mediante o contexto do indicador «Áreas Inundadas Previstas e Reais» recorreu-se ao processamento da informação cartográfica, onde tornar-se-á possível estimar as possíveis zonas inundáveis correlacionadas com o período de retorno, em comparação com as áreas atingidas pelo evento de cheia de 2001.

1.2 Objetivos

O principal objetivo que se pretende concretizar na presente dissertação consiste na identificação e validação de indicadores de desempenho chave (KPI) aplicáveis na arquitetura de um sistema de alerta para a previsão de cheias e inundações urbanas, mediante a revisão da literatura e aplicação do Método *Delphi*, que culmina com a aplicação empírica de um indicador como prova de conceito para o concelho de Coimbra, no sentido de demonstrar o seu potencial na avaliação e melhoria da eficácia destes sistemas de alerta, com recurso a ferramentas de geoprocessamento e análise espacial.

Para alcançar o objetivo geral, é necessário definir objetivos específicos que se traduzem em etapas concretas. Para tal, são considerados os seguintes objetivos específicos:

1. Revisão da literatura genérica relativamente a conceitos de hidrologia, nomeadamente bacias hidrográficas, precipitação, escoamento e drenagem urbana (Anexo A – Drenagem Urbana), bem como conteúdos relativos à inteligência artificial (Anexo B – Inteligência Artificial);
2. Revisão da literatura sistemática, com a caracterização da arquitetura e modelos de quatro sistemas de alerta funcionais em Portugal e Espanha, bem como a sua descrição, metodologia adotada, critérios de alerta, avaliação de desempenho e posterior comparação entre si;
3. Análise da rede hidrográfica e contexto hidrológico da região de Coimbra, com foco especial na área concelhia de Coimbra, através da caracterização da rede integrada no rio Mondego, âmbito territorial, intervenções hidráulicas e histórico de eventos de inundações;
4. Identificação e definição de KPI's através da revisão da literatura, aplicáveis e com relevância para um sistema de alerta de previsão de cheias e inundações;
5. Aplicação do Método *Delphi* para a validação dos indicadores por parte de um conjunto de especialistas, com o intuito de atribuir importância aos indicadores perante quatro dimensões em que se agrupam;
6. Enquadramento e integração da Cartografia de Zonas Inundáveis e de Risco de Inundação perante a sua evolução ao longo de três diferentes Períodos de Retorno, com a criação de mapas temáticos e cálculo das áreas consoante o nível de risco para o concelho de Coimbra;
7. Concretização da prova de conceito com recurso a um KPI que obteve máxima concordância por parte do painel de especialistas no Método *Delphi*.

1.3 Motivação

As cheias e as inundações são fenómenos naturais recorrentes que têm vindo a afetar diversas regiões urbanas e trazem consigo impactos significativos na segurança das populações e infraestruturas das cidades. Coimbra, em termos históricos, considera-se um espaço de suscetibilidade geomorfológico e geoclimático, onde se destacam movimentos de vertentes e taludes, processos de erosão hídrica, mas fundamentalmente, episódios de cheias e inundações, na dependência do rio Mondego e seus afluentes, ou devido a dificuldades de escoamento superficial em espaço antropizado (Tavares e Cunha, 2008).

A motivação para a materialização deste trabalho assenta na crescente frequência e gravidade de episódios de cheias e inundações em áreas urbanas, fenómenos com impactos significativos na segurança das populações. Urge assim, a necessidade de melhorar continuamente a capacidade de antecipação e resposta na cidade de Coimbra a eventos de cheias e inundações, estando presente a ideia de que uma previsão eficaz destes eventos poderá reduzir consideravelmente os danos, particularmente nesta cidade, que com a sua localização e morfologia, agravada pelas transformações urbanas, constante impermeabilização dos solos e alterações climáticas sentidas, vê aumentada a tendência de intensificação do risco e maior complexidade na gestão do território perante eventos extremos.

Perante este contexto, emerge a necessidade de pensar num modelo de previsão de alertas de inundações que seja aplicável ao concelho de Coimbra com o intuito de o desenvolver, com recurso a tecnologias inovadoras que permitam avaliar o risco de inundação e identificação de zonas inundáveis.

Ao direcionar o presente trabalho para a identificação de indicadores de desempenho para sistemas de alerta, estudo e análise de mapas com diferentes cenários de períodos de retorno em relação ao risco de inundação para o concelho de Coimbra, e aplicação de um indicador como prova de conceito para sua validação com recurso à cartografia digital, pretende-se contribuir não só para o avanço do conhecimento científico neste domínio, bem como para o desenvolvimento de instrumentos de apoio à decisão com utilidade para as entidades decisoras e responsáveis pela Proteção Civil, ao nível do planeamento urbano e gestão de emergências.

Dessa forma, esta dissertação propõe aliar o rigor técnico e científico à utilidade prática, com a finalidade de tornar a cidade mais resiliente face aos desafios provocados por fenómenos de cheias e inundações, e contribuir consequentemente para a proteção das pessoas e do património nas áreas urbanas mais vulneráveis.

1.4 Metodologia de Investigação

Num processo de investigação, devem-se explicar detalhadamente os princípios metodológicos e métodos a utilizar. Dessa forma, nesta secção, inclui-se a explicação e fundamentação relativamente às opções metodológicas do estudo, com uma estruturação e divisão do processo por etapas (Figura 1 – Fluxograma de abordagem da dissertação), de acordo com a seguinte ordem:

1. Revisão genérica e sistemática da literatura;
2. Análise e comparação de sistemas de alerta de previsão de cheias e inundações em funcionamento;
3. Abordagem ao caso de estudo – cidade de Coimbra;
4. Extração de KPI's após revisão da literatura e análise de sistemas de alerta;
5. Aplicação do Método Delphi para validação dos KPI's identificados;
6. Análise espacial e estatística da zona em estudo com cartografia disponibilizada pela APA e incrementada no PGRH – RH4A;
7. Prova de conceito com um dos KPI com máxima concordância «Áreas Inundadas Previstas e Reais», com a comparação entre as zonas inundadas na cheia de 2001 e os limites previstos de inundação para períodos de retorno de 20, 100 e 1000 anos, fornecidos pela APA.

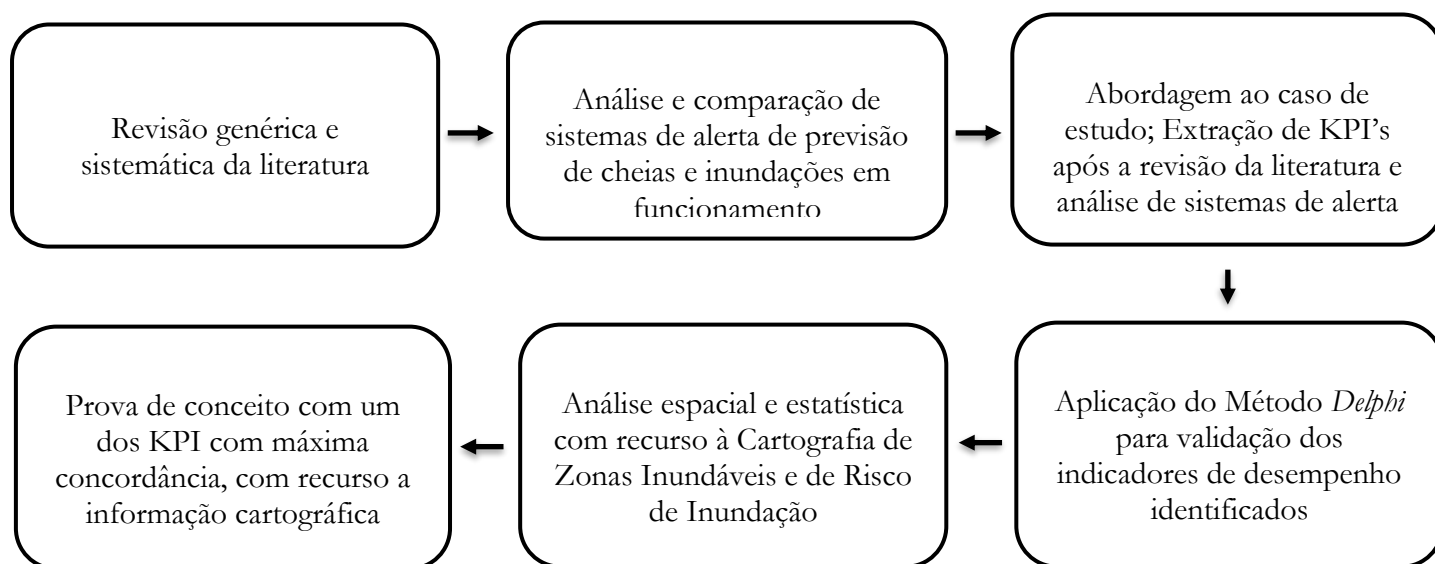


Figura 1 - Fluxograma de abordagem da dissertação

No âmbito desta dissertação, a revisão da literatura, genérica e sistemática, teve como objetivo rever conceitos fundamentais de hidrologia, cheias e inundações, drenagem

urbana, inteligência artificial, e modelação de sistemas de alerta. Além dos conceitos dos modelos (meteorológicos, hidrológicos, hidráulicos) presentes em sistemas de alerta, efetuou-se uma análise de quatro sistemas de alerta de previsão de cheias e inundações em contexto urbano, entre Portugal e Espanha.

Foram definidos critérios de inclusão e exclusão para seleção da bibliografia, e que de acordo com o tema, foram identificados os seguintes critérios:

1. Artigos preferencialmente publicados a partir do Séc. XXI, especialmente entre 2010 e 2025, à exceção de artigos e trabalhos com maior antiguidade, cuja relevância e contribuição científica ainda se reflete atualmente (tais como referências que datam de 1963, 1975, 1992 e 1996);
2. Artigos escritos em língua portuguesa, inglesa e espanhola;
3. Artigos que descrevam sistemas de alerta de previsão de cheias e inundações em funcionamento, publicados a partir de 2020;
4. Artigos e dissertações com evidência científica, quantitativos ou qualitativos.

Toda a pesquisa bibliográfica, neste âmbito, foi operacionalizada, tendo por base o tema central desta dissertação com recurso às seguintes palavras-chave: Sistema de Alerta de Previsão de Cheias, Proteção Civil, Bacia Hidrográfica do Mondego, Rio Mondego, Precipitação em Coimbra, Inteligência Artificial, Previsão de Inundações, Inundações Urbanas, Sistemas de Informação Geográfica, Alterações Climáticas.

Esta pesquisa foi efetuada através de bases de dados científicas, nomeadamente: ScienceDirect, MDPI, Google Scholar, ResearchGate, RCAAP, bem como a Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Os artigos considerados potencialmente relevantes para integrar a amostra foram aqueles que preenchiam os critérios de inclusão/exclusão previamente definidos, após uma análise ao seu resumo. Foram identificados cerca de duzentos e dez artigos, com a utilização no total, de cento e sessenta artigos, que serviram de base à revisão de conceitos genéricos e sistemáticos.

Após definir um espaço temporal de dez anos - apenas para a análise de quatro sistemas de alerta da península ibérica - entre 2015 e 2025, a etapa seguinte passou por descrever os quatro sistemas de alerta de previsão de cheias e inundações de Portugal e Espanha, relativamente à sua arquitetura, zona de aplicação, metodologias e limitações, e posterior comparação dos sistemas entre si.

Além dessa análise mais profunda com a descrição concreta dos sistemas, realizou-se também a análise de vários sistemas de alerta presentes nos vários continentes, onde foi possível encontrar pontos em comum e extrair indicadores de desempenho (KPI) dos sistemas. Dessa forma, a etapa seguinte consistiu num estudo empírico que teve por base a realização de um conjunto de entrevistas, através de questionários a especialistas do governo local. Este estudo permitiu a obtenção e identificação de uma lista de dezasseis KPI's extraídos da revisão da literatura,

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

enquadrados em quatro dimensões, que serviu de base de utilização para a primeira ronda do processo de Método *Delphi*. O método consiste resumidamente em descobrir e obter opiniões de especialistas através da realização de uma série de questionários, designados por rondas, até se atingir o máximo consenso (Sá, 2016).

Para este processo do Método *Delphi* foram efetuados cinquenta e oito convites, tendo sido obtidas vinte e três respostas na primeira ronda e nove na segunda. No caso desta investigação, o método foi aplicado para obter um consenso relativamente à importância e validação dos KPI's. No final de cada ronda, foi aplicado um conjunto de modelos estatísticos de forma a determinar uma métrica consistente. Estas métricas tinham como objetivo a validação de KPI's enquadrados num sistema de alerta, e explorá-los a partir de tecnologias e ferramentas de análise e geoprocessamento, com recurso a informação cartográfica oficial.

Relativamente à cartografia digital, fornecida pela Direção Geral do Território, foram calculadas áreas nas Cartas de Zonas Inundáveis e de Risco de Inundação, bem como a criação de mapas temáticos, com recurso a ferramentas de SIG – *software* QGIS - para os Períodos de Retorno definidos pela norma europeia 2007/60/CE.

Para complementar, como prova de conceito, selecionou-se o KPI «Áreas Inundadas Previstas e Reais», que obteve máxima concordância no final do Método *Delphi*, onde se fez uma comparação e análise das zonas inundadas no evento específico de 2001 com os limites previstos de inundação para períodos de retorno de 20, 100 e 1000 anos, informações cartográficas fornecidas pela Direção Geral do Território (DGT) e Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

1.5 Estrutura da Dissertação

O presente documento expõe todo o trabalho realizado no âmbito desta dissertação, bem como as principais metas definidas e atingidas. Dessa forma, o documento divide-se em oito capítulos.

O primeiro capítulo engloba e apresenta as primeiras tarefas realizadas, onde se procura introduzir o tema, a motivação, os objetivos e a metodologia de investigação utilizada.

O segundo capítulo apresenta, com base numa criteriosa revisão de literatura, conceitos de hidrologia, tais como o ciclo hidrológico, bacias hidrográficas, precipitação, balanço hidrológico, escoamento e conceitos de cheias e inundações.

O terceiro capítulo introduz o conceito de Sistema de Alerta, com convergência para sistemas de alerta de previsão de cheias e inundações, onde se apresentam quatro sistemas entre Portugal e Espanha; este capítulo termina com a comparação entre os quatro sistemas, tendo em conta os parâmetros que os caracterizam.

No quarto capítulo aborda-se o caso de estudo, com a caracterização da rede hidrográfica do Rio Mondego, âmbito territorial, as intervenções hidráulicas observadas, e ainda o histórico de eventos de cheias e inundações associadas ao território da região, especificamente, à cidade de Coimbra.

O quinto capítulo inicia-se com a caracterização do conceito de KPI – indicadores de desempenho chave – bem como as suas características. À imagem do terceiro capítulo, foram analisados múltiplos artigos científicos que mencionam a existência de vários sistemas de alerta de previsão de cheias e inundações, onde foi possível extrair indicadores de desempenho (KPI) e enquadrar em dimensões para futura validação e análise da sua importância perante o caso de estudo.

No sexto capítulo, apresenta-se uma breve revisão de literatura sobre o Método *Delphi* e aplica-se o método, bem como a descrição dos resultados obtidos nas duas rondas efetuadas. A aplicação deste processo serviu para a validação dos KPI extraídos na revisão da literatura bem como a sugestão de novos, por parte do painel de especialistas.

No sétimo capítulo, após a validação e consensualização de determinados KPI's, estes foram aplicados com recurso ao *software* de informação cartográfica - QGIS. Realizou-se inicialmente um enquadramento legal europeu para incrementação da cartografia digital disponibilizada pela DGT, com análise aos parâmetros previstos nas Cartas de Zonas Inundáveis e de Risco de Inundação, criação de mapas temáticos, e conjugação desta matéria com os KPI consensuais entre os especialistas. Da mesma forma, foi analisado um KPI que obteve máxima concordância perante a opinião dos especialistas como prova de conceito, onde se recorreu à cartografia homologada pelo SNIG (DGT), proveniente da Agência Portuguesa do Ambiente

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

e incrementada no PGRH – RH4A, com vista a comparar áreas inundadas previstas e áreas inundadas reais, a partir do evento de cheia de janeiro de 2001 em Coimbra.

O oitavo capítulo, apresenta as conclusões e contributos do trabalho realizado, bem como as dificuldades, oportunidades e propostas de trabalho futuro, relativamente ao que foi desenvolvido no âmbito desta dissertação.

2 REVISÃO GENÉRICA DA LITERATURA

Ao longo desta secção serão apresentados conteúdos extraídos de dissertações, artigos científicos, livros e outras publicações relevantes, relativos a conceitos e informações teóricas de determinados parâmetros e processos correspondentes à hidrologia, com o objetivo de contextualizar o leitor quanto aos assuntos abordados e garantir um fio condutor ao longo do documento.

2.1 Ciclo Hidrológico

Naghattini (2012) afirma que a circulação contínua e distribuição de água sobre a superfície terrestre, subsolo, atmosfera e oceanos é conhecida como o ciclo hidrológico, onde a radiação solar e a gravidade são os principais fatores que governam os processos deste conceito.

Para o mesmo autor, existem seis processos básicos no ciclo hidrológico: evaporação, precipitação, infiltração, transpiração, escoamento superficial e subterrâneo. Todos estes mecanismos são concomitantes e traduzem a continuidade de um ciclo que não apresenta nem início nem fim.

2.2 Bacia Hidrográfica

Em virtude da sua importância no que concerne ao tema do presente trabalho, os pontos seguintes apresentam conceitos relevantes a respeito da definição e constituição de uma bacia hidrográfica, referindo as suas características – geométricas, sistema de drenagem e de relevo, bem como os parâmetros associados a cada uma destas características.

2.2.1 Definição

Bacia hidrográfica corresponde a uma área definida topograficamente, drenada por um curso de água ou através de um sistema interligado de cursos de água de tal modo que todos os caudais afluentes sejam descarregados através de uma única saída – secção de referência da bacia (Lencastre e Franco, 1992). Franco *et al.* (2011) refere que as bacias hidrográficas se integram num sistema ambiental complexo, o que obriga a um planeamento com critério para equacionar as relações de causa-efeito originadas pela sua utilização, uma vez que na sua área se manifestam os conflitos decorrentes das interações dos aspetos naturais e humanos.

Seguindo a mesma linha de construção do autor, as bacias conferem um excelente campo para estudos de diagnóstico ambiental, devido à facilidade de modificação do

seu estado de equilíbrio, que resultam em consequências que podem ser irreversíveis, dependendo do grau de impacto e da suscetibilidade da área.

2.2.1.1 Delimitação da bacia hidrográfica

A delimitação do traçado de uma bacia hidrográfica, de determinado curso de água, é influenciada pela linha de festo (ou linha de cumeada), e esta deve ser procurada numa carta com as curvas de nível, a partir da secção de referência (Guimarães, 2017).

Alves e Ascensão (2007) descrevem a linha de festo como uma linha de partição de águas (ou delimitadora). A linha de festo nunca pode cortar o curso de água, exceto na secção de referência, seguindo pelos pontos de máxima cota circundantes do curso de água, onde existe sempre uma linha de festo entre dois talvegues – linha de reunião de águas (Guimarães, 2017).

Estas linhas, segundo o mesmo autor, talvegue e festo, podem facilmente ser encontradas numa carta com curvas de nível: tal acontece quando as curvas de nível de menor cota envolvem as de maior cota, a linha que atravessa a convexidade por elas formada quando mudam de direção é uma linha de festo, e pelo contrário, quando as curvas de nível de maior cota envolvem as de menor cota, a linha que atravessa a convexidade por elas formadas quando mudam de direção designa-se talvegue. Na figura 2 é possível ver a existência de uma linha de festo entre dois talvegues.

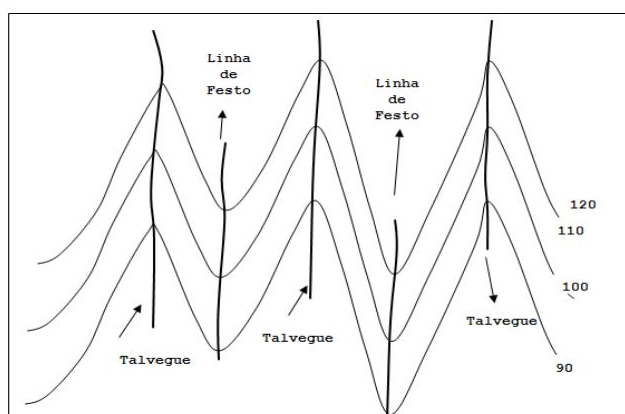


Figura 2 - Linhas de festo e talvegue numa carta de curvas de nível (Guimarães, 2017)

2.2.2 Caraterísticas Geométricas

As caraterísticas geométricas ou físicas são fundamentais para perceber o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Partindo desse pressuposto, esta secção apresenta algumas caraterísticas relevantes que influenciam esse comportamento, nomeadamente a área de drenagem, a forma, o coeficiente de compacidade e o fator de forma.

2.2.2.1 Área de drenagem

Segundo Guimarães (2017), a área de drenagem corresponde à área limitada pela linha de contorno, em projeção horizontal, e é determinada por planimetria ou com recurso a Sistemas de Informação Geográfica (SIG), e expressa-se usualmente em km^2 ou hectares. A área de uma bacia hidrográfica é o elemento básico para o cálculo das restantes características fisiográficas, de acordo com a mesma linha de pensamento do autor.

2.2.2.2 Forma

Lousada e Camacho (2018) explicam que as bacias hidrográficas diferem quanto à sua forma, e podem assumir três tipos, conforme especificados nos pontos *a)* *b)* e *c)* (apresentados na Figura 3 – Tipos de geometria e respetiva influência nos caudais). De acordo com os mesmos autores, as bacias hidrográficas podem apresentar tipos de geometria arredondada, alongada ou longitudinal, e ramificada ou radial:

- Bacia alongada ou longitudinal:** constituída por uma única linha de água principal, de pequena largura, mas com grande desenvolvimento, que recebe linhas tributárias de pequena importância;
- Bacia ramificada ou radial:** apresenta várias bacias parciais alongadas que se reúnem numa linha de água final;
- Bacia arredondada:** formada por várias linhas de água de igual importância que se reúnem concentricamente para dar origem a uma linha de água final, relativamente curta.

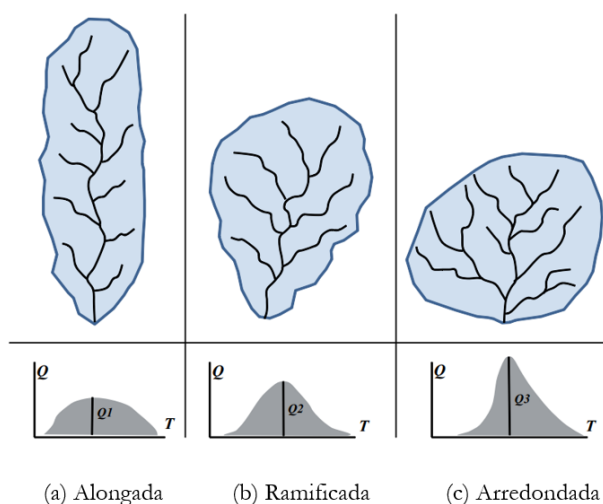


Figura 3 - Tipos de geometria e respetiva influência nos caudais (Goerl *et al.*, 2012)

2.2.2.3 Coeficiente de compacidade (Índice de Gravelius)

Olszewski *et al.*, (2011) explica que o coeficiente de compacidade se traduz na relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia hidrográfica, em que se trata de um número adimensional variável consoante a forma da bacia, independentemente do seu tamanho.

Para o mesmo autor, quanto maior a irregularidade da bacia, maior será o seu coeficiente de compacidade (ou índice de Gravelius), e dessa forma aumenta a tendência para grandes cheias quanto mais próximo da unidade for o valor do coeficiente, em caso de igualdade dos restantes fatores. O coeficiente de compacidade expressa-se através da fórmula (1):

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (1)$$

em que P corresponde ao perímetro da bacia, $\sqrt{\pi A}$ ao perímetro de um círculo de área equivalente à área analisada.

2.2.2.4 Fator de forma (K_f)

Traduz-se na relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia, em que se considera como comprimento da bacia, L , o comprimento do respetivo curso de água mais longo, desde a secção de referência até à cabeceira mais distante na bacia; e largura média da bacia, l_m , como a relação entre o comprimento, L , e a área da bacia, A (Lencastre e Franco, 1992). Apresentam-se as fórmulas em (2) e (3):

$$l_m = \frac{A}{L} \quad (2)$$

$$K_f = \frac{l_m}{L} \quad (3)$$

Tal como explica Oliveira *et al.*, (2023) de acordo com Villela & Matos (1975), o fator de forma trata-se de um índice indicativo de maior ou menor tendência para inundações de uma bacia; as bacias hidrográficas com maior fator de forma estão mais sujeitas a grandes inundações, contrariamente às bacias com menor fator de forma, que estão sujeitas a menores inundações.

Na tabela 1, apresentam-se os valores da escala do fator de forma, bem como o respetivo risco de inundação, relativamente às características da bacia hidrográfica.

Tabela 1 - Valores do fator de forma e respetivo risco de inundação

K_f	Caraterísticas da bacia
1,00 - 0,75	Bacia com alta propensão para grandes inundações
0,75 - 0,5	Bacia com tendência média para grandes inundações
<0,5	Bacia não sujeita a grandes inundações

2.2.3 Caraterísticas do Sistema de Drenagem

O sistema de drenagem de uma bacia hidrográfica, segundo Villela & Mattos (1975), é constituído pelo rio principal e os seus tributários.

A importância do estudo das ramificações e o desenvolvimento do sistema de drenagem, de acordo com os autores, deve-se ao facto deste indicar maior ou menor velocidade com que a água abandona a bacia hidrográfica.

Em seguida, apresentam-se os conceitos relativos às caraterísticas do sistema de drenagem, entre os quais: a constância do escoamento, ordem dos cursos de água, densidade de drenagem e percurso médio do escoamento superficial.

2.2.3.1 Constância do escoamento

Um dado curso de água classifica-se como perene, intermitente e efémero, com a possibilidade de se classificar simultaneamente ao longo dos seus troços, relativamente à constância de escoamento, se considerarmos da foz até à nascente (Lima *et al.*, 2010). A consideração desta caraterística, para Lencastre e Franco (1992), permite a classificação dos cursos de água em três tipos básicos:

- i. **Perene** – escoam água durante todo o ano, com uma alimentação contínua do lençol subterrâneo que não desce abaixo do leito do curso de água, mesmo durante secas severas;
- ii. **Intermitentes** – escoam água geralmente durante as estações húmidas e secam durante as estações com baixos índices pluviométricos. Durante as estações chuvosas, transportam caudais superficiais e subterrâneos uma vez que o lençol de água subterrâneo se mantém acima do leito fluvial e alimenta o curso de água; durante épocas secas, o lençol freático desce a um nível inferior ao do leito e o escoamento acaba por cessar, ou ocorre apenas durante as chuvadas;
- iii. **Efémeros** – existentes apenas durante ou imediatamente após os períodos de precipitação e transportam exclusivamente escoamento superficial; a superfície freática encontra-se sempre a um nível inferior ao do leito fluvial, sem grande possibilidade de escoamento dos caudais subterrâneos.

Lencastre e Franco (1992) referem que muitos rios apresentam troços dos três tipos de cursos de água acima apresentados, o que torna difícil a respetiva classificação num único tipo, de acordo com a variação da estrutura geológica dos terrenos ao longo do seu curso. Todavia, a maioria dos grandes rios é perene, ao contrário dos efémeros que são consideravelmente pequenos.

2.2.3.2 Ordem dos Cursos de Água

Lencastre e Franco (1984), de acordo com a classificação proposta por Horton (1945) e modificada por Strahler (1964), definem a ordem dos cursos de água como uma classificação que reflete o grau de ramificação ou bifurcação existente dentro de uma bacia hidrográfica. Os mesmos autores consideram assim de primeira ordem as linhas de água iniciais que não apresentem afluentes: quando duas linhas de água de primeira ordem se unem, forma-se uma linha de água de segunda ordem, e conseqüentemente, a junção de duas linhas de segunda ordem originam uma de terceira ordem, e assim sucessivamente.

Em suma, dois rios de ordem n dão origem a um rio de ordem $n+1$. A primeira lei de Horton (1945), definida como Lei do Número de Caudais, para Biffi *et al.*, (2021), determina que o número de canais de diferentes ordens numa determinada bacia tende a aproximar-se de uma geometria inversa, na qual se inicia com um único segmento e que progride consoante a razão de bifurcação. A figura 4 representa a classificação dos cursos de água conforme o número da ordem do mesmo (1, 2 e 3).

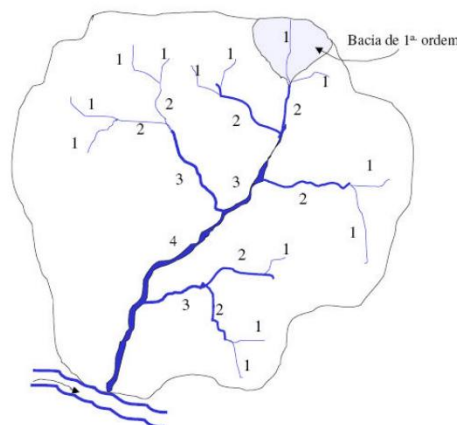


Figura 4 - Classificação dos cursos de água segundo Horton e Strahler (Guimarães, 2017)

2.2.3.3 Densidade de drenagem

Corresponde ao quociente entre o comprimento médio dos canais fluviais numa determinada bacia hidrográfica com a área total da mesma, com a possibilidade desta variar de acordo com a litologia, cobertura vegetal e a quantidade de precipitações da área sujeita a análise (Manoel, 2016). Para Villela & Mattos (1975), densidade de drenagem trata-se de um índice indicador do grau de desenvolvimento de um sistema de drenagem. Este índice, segundo os mesmos autores, é expresso pela relação entre o comprimento total dos cursos de água (efémero, intermitentes ou perenes) de uma bacia com a sua área total. O comprimento total dos cursos de água representa-se por L e a área de drenagem por A , por via da expressão:

$$D_d = \frac{L}{A} \quad (4)$$

Guimarães (2017) reforça que a densidade de drenagem é um bom indicador de eficiência de drenagem natural da bacia, uma vez que é um índice para a tendência de ocorrência de cheias da bacia hidrográfica: assim, quanto maior a densidade de determinada bacia, maior será a tendência para ocorrência de cheias, uma vez que se favorece o transporte de água ao invés da infiltração da mesma.

2.2.3.4 Percurso médio do escoamento superficial

De acordo com Camacho (2015), a extensão média do escoamento superficial traduz-se na distância média em quilômetros que a água da chuva tem de percorrer até atingir o curso de água mais próximo, assumindo um valor aproximadamente como um quarto do inverso da densidade de drenagem. O percurso médio do escoamento superficial traduz-se na expressão:

$$\overline{P_s} = \frac{A}{4L} \approx \frac{1}{D_d} \quad (5)$$

em que P_s corresponde ao percurso médio do escoamento superficial, A área de drenagem, L extensão do curso de água e D_d densidade de drenagem.

2.2.4 Características do Relevo

O relevo de uma bacia hidrográfica tem grande influência sobre os fatores meteorológicos e hidrológicos, uma vez que a velocidade do escoamento superficial é determinada pela declividade do terreno, ao invés da temperatura, precipitação e evaporação que são funções da altitude da bacia (Villela & Mattos, 1975).

Os mesmos autores consideram de grande importância a determinação das características do relevo de uma bacia hidrográfica. Se a orientação da bacia for considerada, o relevo também influencia a quantidade de energia interceptada e por consequência, o microclima, o crescimento da vegetação e a distribuição espacial e temporal da precipitação útil ao nível do solo, segundo Lima *et al.*, (2010).

Dentro desta secção, como características de relevo serão apresentados conceitos relativos à curva hipsométrica de uma bacia, altitude média, altura média e perfil longitudinal de um curso de água.

2.2.4.1 Curva hipsométrica

Santos, M. (2015) define curva hipsométrica como a representação gráfica do relevo de uma bacia, exibindo a área (A) da bacia que fica acima de cada cota (Z) relativamente ao nível médio do mar. A curva hipsométrica de uma bacia hidrográfica permite analisar o relevo da mesma, compará-lo a outras bacias e inferir sobre alguns dos possíveis comportamentos da bacia, com ênfase no que respeita à gênese das cheias (Madruga, 2013). De acordo com este autor, esta curva

corresponde a uma representação empírica da função cumulativa de distribuição das áreas da bacia por cotas, em que a sua forma é o resultado dos processos geomorfológicos que modelam o relevo da superfície terrestre. Na figura 5, está representada a curva hipsométrica da bacia hidrográfica do rio Mondego.

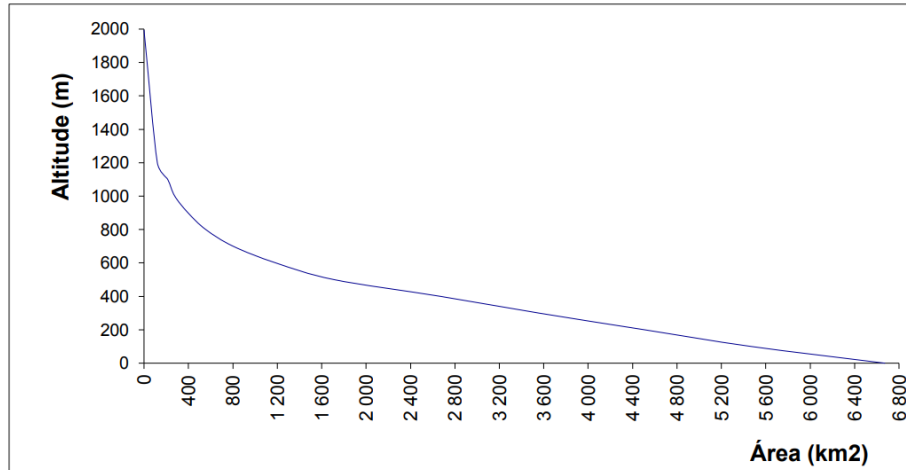


Figura 5 - Curva hipsométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Mondego (Guimarães, 2017)

2.2.4.2 Altitude média

No gráfico da curva hipsométrica, segundo Lencastre e Franco (1984), a altitude média corresponde à altura de um retângulo de área igual à limitada pela curva hipsométrica e pelos eixos das coordenadas, e de comprimento igual à área da bacia hidrográfica. A expressão é dada por:

$$\bar{Z} = \frac{\sum Z_i A_i}{A} \quad (6)$$

em que \bar{Z} corresponde à altitude média da bacia, Z_i altitude média, A_i área entre duas curvas de nível consecutivas, isto é, a área dessa classe altitudinal (Santos, 2015), e A área total da bacia.

2.2.4.3 Altura média

Define-se altura média, segundo Guimarães (2017), de forma semelhante à altitude média embora com referência apenas a cotas acima da secção de estudo, H (alturas), invés de se referir a cotas acima do nível médio do mar, Z (altitudes). O mesmo autor explica que a altura média condiciona a energia potencial da água e o tempo que a água leva a atingir a secção de referência. A altura média expressa-se então:

$$\bar{H} = \frac{\sum H_i A_i}{A} \quad (7)$$

em que, de acordo com Santos, M. (2015), H_i corresponde à altura média de cada classe altitudinal considerada (em metros), A_i a área dessa classe altitudinal (km²) e A a área da bacia hidrográfica (km²).

2.2.4.4 Perfil longitudinal do curso de água

Relaciona as cotas do respetivo leito com as distâncias à foz (Lencastre e Franco, 1984). Para a sua elaboração, referem os mesmos autores, é conveniente não deixar de considerar as suas variações mais significativas, nomeadamente as decorrentes da eventual existência de quedas importantes. A figura 6 apresenta o perfil longitudinal do Rio Mondego da nascente à foz (Lencastre e Franco, 1984).

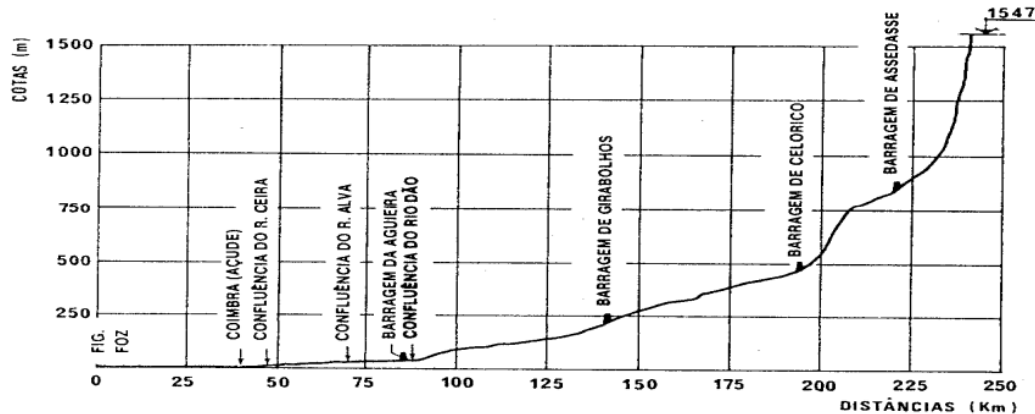


Figura 6 - Perfil longitudinal do Rio Mondego (Lencastre e Franco, 1984)

2.3 Balanço Hidrológico

Frequentemente expresso como uma equação que relaciona entradas, saídas e o armazenamento de água numa determinada bacia hidrográfica, o balanço hidrológico traduz-se num conceito fundamental em hidrologia subjacente a muitas ferramentas de previsão, como o fluxo de água, humidade do solo ou a disponibilidade de água subterrânea (Kampf *et al*, 2020). Lima *et al*. (2010) acrescenta quanto sua à definição, afirmando que este balanço corresponde ao princípio da conservação da massa num determinado espaço e durante um determinado intervalo de tempo, representado por uma equação, que relaciona as aflúências e efluências, que ocorrem num determinado espaço e determinado período, com a variação do volume do mesmo líquido no interior desse mesmo espaço, durante o referido intervalo de tempo:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \overline{q_a} - \overline{q_e} \quad (8)$$

constando que ΔS corresponde à variação de volume observada em determinado espaço, $\overline{q_a}$ é o fluxo médio afluente e $\overline{q_e}$ o fluxo médio efluente durante o intervalo de tempo Δt . A figura 7 representa a idealização do balanço hidrológico, a partir da equação anteriormente referida.

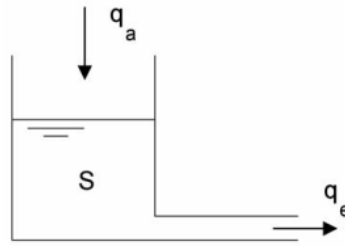


Figura 7 - Idealização do balanço hidrológico (Lima *et al.*, 2010)

Ainda assim, as variáveis hidrológicas envolvidas – precipitação, evaporação, infiltração e escoamento superficial - oscilam ao longo do tempo, de tal modo que a forma geral de uma equação do balanço hidrológico, para Lima *et al.* (2010), deve ser escrita da seguinte forma:

$$\int_t^{t+\Delta t} q_a(t)dt - \int_t^{t+\Delta t} q_e(t)dt = S(t + \Delta t) - S(t) \quad (9)$$

em que $q_a(t)$, $q_e(t)$ e $S(t)$ representam as leis de variação com o tempo, respetivamente, das afluências, efluências e do armazenamento de água no interior do espaço. A equação (9) assume que as entradas, saídas e o armazenamento não variam no espaço, caso contrário, cada um dos termos da equação que varie no espaço deverá exprimir-se por um valor agregado representativo da área.

2.4 Precipitação

A precipitação, para Bertoni & Tucci (2001), é entendida em hidrologia como toda a água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre, nas mais variadas formas de precipitação: neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve – que se diferencia entre si consoante o estado em que a água se encontra.

Com maior profundidade, Andrade (2011) define precipitação como qualquer partícula de água, sólida ou líquida, que cai da atmosfera e atinge o solo, proveniente das nuvens. Segundo o mesmo autor, a condensação do vapor de água atmosférico em torno de núcleos de condensação é a condição fundamental para a ocorrência de precipitação, sendo que esta se verifica quando a velocidade de queda das gotas de água da nuvem supera a velocidade das correntes ascendentes existentes no interior da nuvem. Para finalizar, o efeito combinado da colisão e fusão de gotículas e do processo de crescimento de cristais de gelo garante o aumento da dimensão das gotículas até as mesmas caírem por efeito da gravidade.

2.4.1 Tipos de precipitação

De acordo com Bertoni & Tucci (2001), as precipitações classificam-se conforme o mecanismo pelo qual se verifica a ascensão do ar húmido, e podem assumir três tipos: convectivas ou convexas, ciclónicas ou frontais e orográficas. Dentro desta secção, apresenta-se a definição de cada um dos tipos de precipitação referidos

anteriormente, a comparação entre estes de acordo com os seus parâmetros, bem como o processo de medição de precipitação.

2.4.1.1 Convectivas (ou Convexas)

Originam-se devido ao aquecimento direto de uma massa de ar sobre a superfície terrestre, em que se regista uma brusca ascensão de ar menos denso que atinge a sua temperatura de condensação, com a conseqüente formação de nuvens que provocam a precipitação (Guimarães *et al.*, 2017). Típica de regiões tropicais, esta forma de precipitação, de acordo com Villela & Mattos (1975), é de grande intensidade e de curta duração, concentrada em pequenas áreas.

2.4.1.2 Ciclónicas (ou frontais)

De acordo com Rodrigues (2017), as precipitações ciclónicas ou frontais estão associadas à passagem de uma perturbação ciclónica, que devido a uma depressão barométrica ou devido ao contacto entre duas massas de ar, uma quente e uma fria, podem provocar a ascensão do ar. O mesmo autor refere a grande duração destas chuvas que embora de intensidade média, afetam grandes áreas, com possibilidade de conduzir por vezes à formação de cheias em grandes bacias.

2.4.1.3 Orográficas

As precipitações orográficas originam chuvas de intensidade constante e de longa duração, resultantes do choque das correntes de ar com cadeias montanhosas que elevam as massas de ar para a atmosfera e provocam o seu arrefecimento e conseqüente formação de nuvens (Ferreira, 2016). Pinto *et al.*, (1976) propõe uma definição mais breve, em que explica que este tipo de precipitação ocorre quando o ar é forçado a transpor barreiras montanhosas.

A tabela 2 compara os tipos de precipitação, de acordo com as classificações propostas por Bertoni & Tucci (2001), agrupando a informação sintetizada em parâmetros.

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

Tabela 2 - Comparação dos tipos de precipitações convectivas, ciclónicas e orográficas consoante vários critérios (Elaboração própria - fonte (Bertoni & Tucci, 2001))

Tipos de precipitação	Caraterísticas	Formação	Regiões comuns	Consequências hidrológicas
Convectivas	Chuva intensa, restrita a áreas menores e de curta duração.	Ascensão brusca do ar húmido, provocada pelo aquecimento do solo, formando nuvens.	Regiões equatoriais e tropicais, especialmente no verão.	Inundações com rápidos alagamentos, com maior risco em pequenas bacias hidrográficas.
Ciclónicas	Chuva de grande duração, de intensidade média, que atinge grandes áreas.	Junção de massas de ar quentes e frias, em que o ar quente eleva-se sobre o frio e condensa.	Regiões tropicais e temperadas, com passagem de frentes frias e quentes.	Cheias com influência em grandes bacias, com recarga de rios e solos.
Orográficas	Chuva com pouca intensidade, prolongada e localizada.	Elevação do ar quente ao encontrar relevo, que leva à condensação e posterior formação de nuvens.	Áreas próximas a cadeias montanhosas; regiões costeiras com ventos quentes e húmidos.	Recarga lenta dos aquíferos, com erosão de encostas.

2.4.2 Medição de precipitação

A precipitação exprime-se pela altura pluviométrica, duração, frequência e intensidade de precipitação (Andrade & Basch, 2017). Os mesmos autores definem estas quatro variáveis da seguinte forma:

- a. Altura pluviométrica** – também denominada quantidade de precipitação, consiste na grandeza

$$R = \frac{v}{s} \tag{10}$$

em que v é o volume de água recolhida proveniente de hidrometeoros num recipiente de boca horizontal e de área s (pluviómetro). Exprime-se em milímetros, ou seja, litros por metro quadrado;

- b. Duração** – período de tempo contado entre o início e o fim da chuvada. Período medido em horas, minutos ou dias;
- c. Frequência** – número de ocorrências por ano de uma determinada chuvada ou superior ou número de anos necessários para ocorrência de determinada chuvada;
- d. Intensidade de precipitação** – avalia-se pela variação da quantidade da precipitação ΔR relativamente ao intervalo de tempo Δt em que caiu.

2.5 Escoamento

Quintela (1996) define escoamento como a quantidade de água que atravessa uma secção de um curso de água num dado intervalo de tempo, e que pode ser expresso em volume (metros cúbicos) ou em altura de água uniformemente distribuída sobre a área, em planta, da correspondente bacia hidrográfica (milímetros).

Segundo o mesmo autor, o escoamento em volume num determinado intervalo de tempo obtém-se pela integração dos valores do caudal observados ao longo desse mesmo intervalo de tempo, embora seja corrente substituir este último termo pelo correspondente caudal médio (uma vez que este apresenta uma ordem de grandeza mais perceptível): caudal fictício, uniforme, que no mesmo intervalo de tempo produz um volume de escoamento igual ao da sucessão real do caudal.

Desse modo, define-se:

- i. Caudal médio diário (num determinado dia);
- ii. Caudal médio mensal (num determinado mês);
- iii. Caudal médio anual (num determinado ano);
- iv. Caudal médio plurianual ou módulo (num período de vários anos).

2.5.1 Processo de escoamento

O escoamento tem origem na precipitação sobre determinada área e esta pode ser dividida em várias parcelas (Guimarães *et al.*, 2017). Conforme explica Quintela (1996), a proporção destas parcelas é variável durante a precipitação e especifica quatro conceitos: interceção, retenção superficial, detenção superficial e infiltração. No início, água é retida por interceção pela cobertura vegetal e obstáculos que a impedem de atingir o solo; caso a precipitação prossiga, a água atinge o solo com uma parte a ser retida nas depressões e outra que se infiltra (Quintela 1996).

Seguindo a linha de pensamento do mesmo autor, com a continuação da precipitação, ocorrerá escoamento superficial, isto é, a água transborda de algumas depressões do solo e enche conseqüentemente as maiores depressões, formando assim películas que se escoam sobre o terreno e encaminham para a rede hidrográfica. A retenção superficial refere-se à parcela de água que não se infiltra nem origina escoamento superficial, incluindo assim a água intercetada, água armazenada nas depressões do solo e a água que se transforma em vapor durante o processo de precipitação (Quintela, 1996). Segundo o mesmo autor, a detenção superficial corresponde à água do escoamento superficial em trânsito sobre o terreno e representa assim um armazenamento de água rapidamente variável no tempo. Este refere também que a repartição da água, pelo escoamento superficial e pela infiltração, depende das características da precipitação e da capacidade de infiltração

do solo. Dessa forma, torna-se evidente a diminuição da capacidade de infiltração de forma progressiva à medida que a precipitação decorre, provocada pelo aumento do teor de água no solo (Quintela, 1996).

2.5.2 Componentes do escoamento

Quanto à sua génese, o escoamento que atravessa uma secção de um curso de água pode classificar-se da seguinte forma: escoamento superficial ou direto; escoamento subsuperficial, hipodérmico ou intermédio; escoamento subterrâneo ou de base; e escoamento resultante da precipitação sobre a rede hidrográfica (Guimarães *et al.*, 2017). O mesmo autor caracteriza cada um dos conceitos referidos anteriormente:

- a. **Escoamento superficial ou direto** – corresponde à água que atinge a rede hidrográfica e que escorre sobre a superfície do terreno sem infiltração. Tem origem na precipitação útil, ou seja, da fração da precipitação que chega à rede hidrográfica, após os processos de evaporação, infiltração e retenção superficial na bacia. Trata-se da componente mais significativa do escoamento durante os períodos de precipitação intensa, cuja importância se reduz à medida que esta diminui;
- b. **Escoamento subsuperficial, hipodérmico ou intermédio** – consiste na água infiltrada que sem atingir a zona de saturação, volta a aparecer à superfície. É resultante da fração de precipitação que se infiltra no solo, mas com escoamento a pouca profundidade no terreno. Esta chega aos cursos de água apenas com um ligeiro atraso relativamente ao escoamento superficial e termina um pouco depois do fim do mesmo;
- c. **Escoamento subterrâneo** – corresponde à água infiltrada que atingiu a zona de saturação. É resultante da parcela da precipitação sujeita a processos de infiltração profunda, e representa a contribuição para o escoamento superficial das reservas hídricas subterrâneas acumuladas nas formações geológicas por onde atravessa o curso de água. A sua importância é reduzida nos períodos de precipitação intensa, embora represente a totalidade do escoamento assim que as outras componentes se esgotam;
- d. **Escoamento resultante da precipitação sobre a rede hidrográfica** – a importância deste componente de escoamento está diretamente ligada e dependente da densidade da rede hidrográfica em causa.

2.5.3 Fatores que influenciam o escoamento

Segundo Villela & Matos (1975) “o escoamento superficial sofre a influência de diversos fatores que facilitam ou prejudicam a sua ocorrência”. Desse modo, tais fatores distinguem-se quanto à sua natureza: natureza climática relacionados à precipitação ou de natureza fisiográfica, ligada às características físicas da bacia. Em síntese, Villela & Matos (1975) classifica:

a. Fatores climáticos:

- Intensidade de precipitação - quanto maior a intensidade mais rapidamente o solo atinge a capacidade máxima de infiltração, provocando o escoamento superficial do excedente de precipitação;
- Duração da precipitação - diretamente proporcional ao escoamento, uma vez que para chuvas de intensidade constante, existirá uma maior oportunidade de escoamento quanto maior for a sua duração;
- Precipitação antecedente - a precipitação terá maior facilidade de escoamento caso o solo esteja húmido devido a uma precipitação anterior.

b. Fatores fisiográficos:

- Área da bacia – a sua extensão influencia diretamente a sua capacidade de captação de água;
- Forma e topografia da bacia;
- Permeabilidade do solo, com relação direta com a capacidade de infiltração, uma vez que quanto maior a permeabilidade do solo, maior será a quantidade de água que ele poderá absorver;
- Obras hidráulicas construídas na bacia, uma vez que provocam a redução dos caudais máximos do escoamento superficial e retardam assim a sua propagação.

2.5.4 Métodos de medição de escoamento superficial

Por via do enquadramento da revisão genérica na hidrologia e bacias hidrográficas, o escoamento superficial acaba por se tornar um conceito relevante para o estudo. Dessa forma, a medição de caudais pode ser efetuada por métodos diversos, mas os mais comuns utilizados em cursos de água naturais são designados de método «*secção-velocidade*» e método «*estrutural*» (Lencastre e Franco, 1984). Segundo os mesmos autores, embora existam outros métodos, estes têm por base técnicas de utilização restritas ou de carácter ainda experimental. Dentro do conjunto de métodos disponíveis para a medição de caudais, de acordo com Devesa e Cunha (2010) que cita W. Boiten (2000), podem distinguir-se dois conjuntos relevantes: resultantes de medições isoladas (método *secção-velocidade*) e medições contínuas (método *estrutural* e método da *curva de vazão*). Nas secções seguintes, serão apresentados os métodos de maior relevância, referidos anteriormente: método da *secção-velocidade*, método *estrutural* e *curva de vazão*.

2.5.4.1 Método da Secção-Velocidade

Método mais utilizado na medição de caudais em cursos de água em Portugal (Alves, 2011). O mesmo autor considera que após conhecer a área da secção transversal de um curso, A (m^2) e a velocidade média da água nessa secção, \bar{v} (m/s), o valor do caudal Q é dado por:

$$Q = \bar{v}A \quad (11)$$

Alves (2011) explica que se atinge maior rigor na medição com a divisão da secção em i segmentos com área A_i e velocidade média V_i , e com o conseqüente cálculo e soma Q_i em cada um destes segmentos:

$$Q = \sum_i Q_i = \sum_i \bar{v}_i A_i \quad (12)$$

Neste método, a área da secção transversal determina-se a partir de sondagens de profundidades e larguras, com medição das velocidades recorrendo a molinetes, sensores eletromagnéticos e ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), tal como refere Devesa e Cunha (2010). De acordo com este autor, a velocidade média deduz-se a partir de velocidades medidas em pontos distribuídos de forma sistemática ao longo da secção transversal.

2.5.4.2 Método Estrutural

Este método baseia-se na utilização de estruturas hidráulicas fixas, como descarregadores, canais e comportas para a medição dos caudais fluviais (Guimarães *et al.*, 2017). O recurso a uma estrutura hidráulica na medição dos caudais assenta no princípio em que se pode determinar uma relação entre o caudal e o nível de água a montante da estrutura, ou entre o caudal e os níveis simultaneamente a montante e a jusante, tanto de forma teórica como experimental (Lencastre e Franco, 1984). As referidas estruturas são mais frequentes nos troços superiores e médios dos cursos de água do que nos inferiores, devido à existência de maiores volumes de água a jusante (Devesa e Cunha, 2010). Guimarães *et al.*, (2017) explica que os descarregadores, estruturas destinadas a serem galgadas pela água, correspondem às estruturas hidráulicas mais utilizadas para medição dos caudais e podem ser classificadas da seguinte forma:

- a. Soleira delgada – utilizada apenas para medição dos caudais;
- b. Soleira espessa – embora também utilizados para medir caudais, estes descarregadores fazem parte de estruturas hidráulicas com outras finalidades (barragens, por ex.).

Na figura 8, estão representados os tipos de descarregadores acima mencionados: de soleira delgada e de soleira espessa.

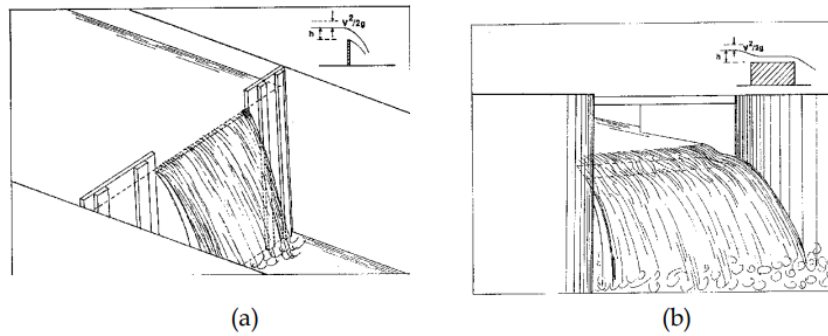


Figura 8 - Exemplos de descarregadores de soleira delgada (a) e soleira espessa (b) (Lencastre e Franco, 1984)

2.5.4.3 Método da Curva de Vazão

A curva de vazão, como refere Guimarães *et al.*, (2017), traduz-se na relação biunívoca entre o caudal escoado numa determinada secção e a correspondente altura da água, o que permite determinar o caudal escoado numa secção a partir do conhecimento da altura da água nessa secção. A curva de vazão obtém-se, segundo o mesmo autor, por via experimental a partir do conjunto de pares de valores resultantes da medição do caudal e da altura da água. De forma analítica, representam-se do seguinte modo:

$$Q = a(h + h_0)^b, \quad [m^3s^{-1}] \quad (13)$$

em que Q é o caudal, h é a altura (m) hidrométrica, h_0 é a altura (m) do zero da escala hidrométrica em relação ao nível da água que corresponde ao caudal nulo, que geralmente se trata da cota mais baixa da secção (fundo do leito); a e b são parâmetros característicos da secção, a determinar via experimental, de acordo com o mesmo autor. A disponibilidade de curvas de vazão permite obter dados relativos a caudais, por via da medição de alturas de água no curso de água, nas chamadas estações hidrométricas (Devesa e Cunha, 2010). A evolução constante da maioria dos cursos de água naturais, devido a processos naturais de erosão ou sedimentação, obriga à atualização constante das curvas de vazão através da efetivação periódica de novas medições de altura de forma simultânea, explica o mesmo autor.

Quaisquer erros existentes na curva de vazão irão se refletir e ampliar-se na obtenção do hidrograma de escoamento, com o acréscimo dos impactos negativos que isso poderá trazer à estimativa dos caudais de cheia ou dos volumes de escoamento (Alves, 2011). A figura 9 representa um exemplo de uma curva de vazão, neste caso em Entre-os-Rios.

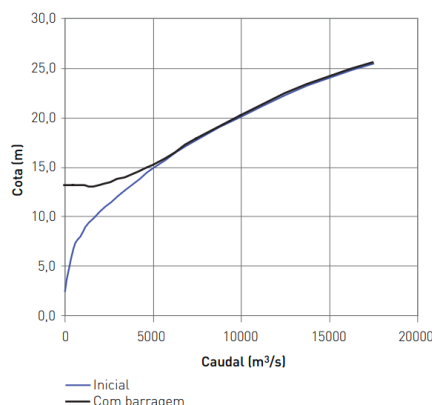


Figura 9 - Exemplo de curva de vazão em Entre-os-Rios (Rocha, 2008)

2.6 Cheias e Inundações

Conforme descrito no Plano de Gestão de Risco de Inundações – RH6 (2016), as inundações decorrentes das cheias podem colocar em causa a segurança de pessoas e bens e provocar consequências prejudiciais significativas, a nível socioeconómico e ambiental. Os conceitos de cheias e inundações são muitas vezes utilizados como sinónimos, embora não o sejam, uma vez que todas as cheias originam inundações, mas nem todas as inundações são causadas por cheias (Costa, 2019). A causa principal destes fenómenos em Portugal é meteorológica, e como não podem ser evitados, revelam alguma perigosidade, em função da altura da água, dos caudais, da velocidade e da frequência, tal como explica o mesmo autor.

2.6.1 Cheias

O conceito restrito de cheia, preconizado por V.T. Chow (1965) segundo explica Ramos (2009), corresponde a um fenómeno hidrológico extremo, de frequência variável, natural ou induzido pela ação humana, que consiste no transbordo de um curso de água relativamente ao seu leito ordinário, e que provoca a inundação dos terrenos ribeirinhos (leito de cheia). Rocha (1998) refere que as cheias são a principal causa das inundações, sendo as suas características alvo de estudo do ponto de vista técnico e científico, relativamente aos aspetos hidrológicos, hidráulicos e controlo estrutural das ondas de cheia.

2.6.1.1 Tipos de cheias

De acordo com Leal (2019), em função das características da precipitação desencadeante e das bacias hidrográficas onde ocorrem, as cheias podem ser subdivididas em cheias progressivas ou lentas (*slow floods, slow-rising ou slow-onset floods*) e cheias rápidas (*flash floods*):

- i. **Cheias progressivas ou lentas** – ocorrem principalmente nos rios com grandes bacias hidrográficas e são desencadeadas tanto por períodos de

precipitação que se prolongam durante semanas ou meses, como pela fusão da neve;

- ii. **Cheias rápidas** – embora existam várias definições, de certa forma complexas, este tipo de cheia define-se pelos elevados caudais de ponta atingidos, provocados por tempestades severas. Por norma, este fenómeno é restrito a uma área limitada.

2.6.2 Inundações

Segundo o artigo 2º alínea 1 da Diretiva 2007/60/CE, o termo inundação define-se como a cobertura temporária por água de uma terra normalmente não coberta por água. Inclui as cheias ocasionadas pelos rios, torrentes de montanha, cursos de água efémeros mediterrânicos e inundações ocasionadas pelo mar nas zonas costeiras, com exclusão das inundações com origem em redes de esgotos.

2.6.2.1 Tipos de inundações

Por via das características físicas e antrópicas dos territórios e aos diversos fatores que podem estar na génese das inundações, Leal (2019) explica que estas podem ser de diferentes tipos, entre os quais se destacam:

- i. Inundações fluviais ou cheias (*floods*);
- ii. Inundações resultantes da subida da toalha freática (*groundwater flooding*);
- iii. Inundações costeiras (*coastal flooding*);
- iv. Inundações urbanas (*urban flooding*).

Embora nem todas as cheias e inundações sejam oriundas de causas meteorológicas, essa é a causa mais importante como fator desencadeante desse fenómeno em Portugal (Ramos, 2009). O mesmo autor afirma que em Portugal quase todas as inundações se devem aos seguintes acontecimentos:

- Cheias lentas dos grandes rios;
- Cheias rápidas dos rios e ribeiras de pequenas e médias bacias hidrográficas;
- Subida das águas subterrâneas em locais topograficamente deprimidos;
- Inundações provocadas pela sobrecarga dos sistemas de drenagem artificiais nos meios urbanos;
- Inundações costeiras devidas a galgamentos oceânicos (*storm surge*).

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

Seguindo a ótica do mesmo autor, a pluviosidade trata-se do principal causador de cheias, da subida das águas subterrâneas e das inundações urbanas. O mesmo divide as chuvas em dois tipos:

- a. **Contínuas e prolongadas** - podem não atingir grande intensidade, mas originam cheias lentas e a conseqüente subida da toalha freática, com inundação de áreas deprimidas. São generalizadas a vastas áreas e a sua duração provoca a saturação dos solos, reposição das reservas subterrâneas e conseqüentes fenómenos de transbordo;
- b. **Concentradas no tempo e espaço** - mas com grande intensidade, o que origina cheias rápidas e inundações urbanas. Podem ocorrer em apenas algumas horas ou minutos, mas atingem grandes intensidades.

3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: SISTEMAS DE ALERTA

Após a revisão genérica da literatura, é fundamental fazer uma análise crítica, estruturada e abrangente relativamente aos sistemas de alerta e os componentes que estes envolvem. A revisão sistemática da literatura, realizada com o objetivo de reunir esta informação, fundamentou-se em artigos científicos, dissertações, conferências, revistas e livros escritos por especialistas na área, com recurso a repositórios universitários, entre outros. Além de entender o conceito de Sistema de Alerta, é importante perceber como este tipo de sistema se aplica em Portugal e que modelos o integram. Importa referir um dos pontos mais importantes deste capítulo, que se trata da descrição de quatro Sistemas de Alerta existentes e em funcionamento, entre Portugal e Espanha, que são responsáveis pela prevenção e alerta de cheias e inundações em contexto urbano. Em acréscimo à descrição detalhada de cada um destes sistemas, apresenta-se uma comparação dos mesmos em forma de tabela, com o propósito de entender as valências de cada um deles, que métodos e modelos utilizam, a precisão das suas previsões, áreas que abrangem, vantagens, limitações, bem como outras características que serão apresentadas posteriormente.

Sistemas de alerta e aviso assumem um papel preponderante na garantia atempada de comunicação às estruturas de proteção civil e socorro, bem como uma oportuna informação à população potencialmente afetada pela ocorrência ou iminência de uma catástrofe (Ferreira, 2022).

De acordo com a terminologia da UNDRR (2017) - *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* - sistema de alerta consiste num sistema integrado de monitorização de riscos, previsão e predição, avaliação do risco de desastres, comunicação e atividades de preparação que permitam a tomada de medidas oportunas por parte dos governos, comunidades, empresas, indivíduos e outros, com a finalidade de reduzir os riscos de desastres antes da ocorrência de eventos perigosos.

3.1 Sistemas de Alerta em Contexto Nacional

A nível nacional, o Decreto-lei nº2/2019 de 11 de janeiro afirma que “a proteção, socorro e assistência das populações face a riscos coletivos são direitos que se revestem de particular importância perante a dimensão de catástrofes e o número de vítimas delas resultantes, bem como os impactos socioeconómicos nas populações atingidas”. De acordo com o presente decreto-lei, as estruturas de proteção civil têm como metas fundamentais a prevenção de riscos coletivos inerentes a situações de acidente grave ou catástrofe, atenuar os seus efeitos, bem como a proteção e socorro de pessoas e bens em situação de perigo, tal como preconizado na Lei de Bases da Proteção Civil. Assim, o decreto-lei atribui à Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC) a responsabilidade de organizar um sistema nacional de

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

alerta e aviso, o que pressupõe a criação de um quadro legal que procede à instituição deste sistema e à definição de um conjunto de orientações destinadas à sua implementação.

Segundo o artigo nº1 do Decreto-lei nº2/2019, o mesmo “institui o Sistema Nacional de Monitorização e Comunicação de Risco, de Alerta Especial e de Aviso à População, que estabelece orientações para o fluxo da informação entre as autoridades de proteção civil, agentes de proteção civil, entidades técnico-científicas e demais entidades envolvidas nos domínios da monitorização e comunicação de riscos, do alerta ao sistema de proteção civil e do aviso às populações, face à iminência ou ocorrência de acidente grave ou catástrofe”.

Para efeitos do presente decreto-lei e de acordo com o artigo nº2, entende-se por:

- a. **«Alerta especial»**, comunicação ao sistema de proteção civil da iminência ou ocorrência de um acidente grave ou catástrofe, acompanhada dos elementos de informação fundamentais ao conhecimento da situação, de modo a permitir o desencadear de ações complementares no âmbito da proteção e socorro, em alinhamento com os princípios dispostos no Sistema Integrado de Operadores de Proteção e Socorro (SIOPS);
- b. **«Aviso de proteção civil»**, comunicação dirigida à população potencialmente afetada pela iminência ou ocorrência de um acidente grave ou catástrofe, com o intuito de fornecer informação relacionada com o evento em causa e medidas de autoproteção a adotar. Tal conceito pode ser enquadrado como aviso preventivo ou aviso de ação, de acordo com o fim ao qual se destina:
 - i. «Aviso preventivo», aviso emitido com a finalidade de informar a população sobre o aumento de determinado risco numa determinada área geográfica;
 - ii. «Aviso de ação», aviso emitido com o objetivo de induzir a população a adotar medidas de autoproteção específicas em caso de ocorrência de uma catástrofe num período temporal específico, numa determinada área geográfica.
- c. **«Monitorização e comunicação de risco»**, consiste no conjunto organizado de ações destinadas a permitir a observação, medição e avaliação contínua do desenvolvimento de determinado processo ou fenómeno, com potencialidade de risco para as populações, bem como a comunicação para informações à Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC).

Tendo em conta o tema do presente trabalho e embora a imensidão de finalidades destes sistemas, o conceito de sistema de alerta será focado para a previsão de cheias e inundações em contexto urbano.

3.2 Sistemas de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações

O desenvolvimento da previsão hidrológica e dos sistemas de alerta são elementos fundamentais para as estratégias de prevenção de cheias e inundações (Ferreira, 2016). Para o mesmo autor, o principal objetivo de um sistema consiste na administração do tratamento de dados e o processo de previsão, com possibilidade de ser integrada no sistema uma grande variedade de modelos de previsão externos.

A importação de dados externos inclui conjuntos de previsões meteorológicas, níveis de água observados e precipitações, produzidos normalmente por agências de previsão meteorológica. Atualmente, a maioria dos sistemas de alerta precoce para previsão de inundações apresentam uma estrutura similar, tal como explica *Fraga et al.* (2021). O funcionamento do sistema começa com a aquisição de dados meteorológicos, que corresponde às previsões obtidas por modelos numéricos e observações de redes de medições (*Fraga et al.*, 2021). Esta informação meteorológica alimenta modelos hidrológicos que simulam a relação precipitação-escoamento para determinar assim o caudal esperado nos próximos dias.

A (APA) tem jurisdição e controlo sobre todo o território nacional, competindo-lhe assegurar e acompanhar a execução da política nacional no domínio dos recursos hídricos de forma a assegurar a sua gestão de forma sustentável, bem como a garantia efetiva da aplicação da Lei da Água e demais legislação complementar (Ferreira, 2016). O Decreto-Lei n.º115/2010 estabelece um quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundações, com objetivo de reduzir as suas consequências prejudiciais e transpõe a Diretiva n.º2007/60/CE do Parlamento Europeu. O artigo 11.º do capítulo II do presente Decreto-Lei n.º115/2010 refere a criação do Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH), o qual substitui o Sistema de Vigilância e Alerta de Cheias (SVAC), referido no Decreto-Lei n.º21/98, de 3 de fevereiro. De acordo com o mesmo artigo, ponto 1, o SVARH consiste num sistema de previsão e de alerta para a salvaguarda de pessoas e bens. O seu desenvolvimento é coordenado pela Autoridade Nacional da Água, em articulação com as ARH, com o intuito de atingir os objetivos do presente decreto-lei, adaptado às especificidades de cada região hidrográfica ou unidade de gestão.

3.2.1 Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH)

O PGRI – RH4 (2016) define o SVARH (Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos) como um subsistema do SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos) que permite conhecer em tempo útil o estado hidrológico dos rios e albufeiras do país bem como a informação meteorológica, o que possibilita a antevisão da sua possível evolução. O sistema é constituído por uma rede de estações automáticas com teletransmissão, responsáveis pela medição de variáveis hidrometeorológicas, dados fornecidos por entidades externas à APA e por uma

estrutura informática para armazenamento e disseminação da informação, tal como explica o mesmo Plano. Trata-se de um sistema de abrangência nacional, de suporte às ações da Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC), distribuído pelos agentes de proteção civil distritais e municipais, que agrega dados e informação de outras entidades gestoras, tal como está presente no PGRI – RH4 (2022). O Plano de Gestão dos Riscos de Inundações da RH4A (2016) explica a divisão do SVARH em três grandes módulos:

- **Aquisição de dados** – estações automáticas com teletransmissão, troca de dados com outras entidades tais como: Confederações Hidrográficas de Espanha, EDP, IPMA e Associações de Regantes;
- **Processamento central** – sistema informático de recolha de dados das estações automáticas, troca de dados com outras entidades, processamento e armazenamento dos dados, bem como a elaboração de modelos hidrológicos e hidráulicos;
- **Disponibilização** – *software* de disponibilização em tempo real dos dados adquiridos e de alertas processados na Central de Comando.

3.3 Modelação

De acordo com Miranda (2011), que cita Chanson (2004), um modelo representa uma simplificação da realidade, com capacidade de funcionar com semelhanças a outros sistemas reais e que fornece previsões precisas sobre o seu comportamento, bem como os acontecimentos dos sistemas semelhantes. Seguindo esta linha de pensamento, os modelos frequentemente utilizados são de três tipos, entre os quais:

- i. **Modelos analíticos** – representam as soluções teóricas dos princípios fundamentais, como por exemplo o cálculo das características hidráulicas do escoamento variável em superfície livre;
- ii. **Modelos físicos** – utilizados para validação dos métodos numéricos. Estes representam a realidade a uma escala diferente, em que é fundamental representar de forma apropriada as condições de fronteira, condições de montante e o campo do escoamento. A utilização destes modelos é frequente em projetos de otimização de estruturas de forma a assegurar a sua operacionalização e segurança;
- iii. **Modelos numéricos** – consistem em *softwares* que resolvem equações básicas do escoamento do fluido. São aplicados restritamente a situações simples de escoamento e condições de fronteira, onde as equações possam ser resolvidas numericamente, como por exemplo a integração numérica do sistema de equações para o cálculo do perfil da superfície livre do escoamento gradualmente variado de um canal.

A aplicação de um *software* a um caso específico implica a criação de um modelo através da calibração e validação do mesmo, com base em valores observados e registados na área em estudo (Miranda, 2011). Assim, a monitorização dos parâmetros meteorológicos, hidrológicos e hidráulicos corresponde a uma etapa essencial da modelação, tal como refere o mesmo autor.

A aplicação dos modelos em estudos hidrológicos tornou-se uma ferramenta indispensável para compreender os processos naturais que ocorrem à escala da bacia hidrográfica (Lopes, 2017). Segundo este, um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, que auxilia a compreensão dos processos que envolvem a mesma. O recurso à modelação, e necessariamente aos modelos que a constituem, torna-se cada vez mais uma ferramenta de trabalho que permite fazer não só análises da situação presente ou passada, bem como elaboração e análise de cenários de situações futuras (Lopes, 2017).

Ao longo desta secção serão apresentados e analisados três tipos de modelos, comuns nos sistemas de alerta de previsão de cheias e inundações: Modelos Meteorológicos, Hidrológicos e Hidráulicos.

3.3.1 Modelos Meteorológicos

Modelos Meteorológicos resumem-se a simulações computacionais da atmosfera utilizadas para pesquisas e previsões temporais (IBM, 2023). Segundo a mesma fonte, o facto das condições climáticas oscilarem constantemente, origina uma grande quantidade de dados (temperatura, pressão do ar, humidade, precipitação, entre outros) provenientes de estações e satélites, o que obriga a modelar as interações entre milhares (ou até milhões) de variáveis em mudança constante com o intuito de transformar esses dados em previsões meteorológicas precisas. Sucintamente, a previsão do tempo com base em equações matemáticas complexas designa-se de Previsão Numérica do Tempo, e os programas de computador que as executam são os chamados Modelos Meteorológicos (IBM, 2023).

Conforme o contexto, modelos meteorológicos podem ter outra denominação: Modelos Atmosféricos (Malardel, 2025). O mesmo autor refere que os modelos atmosféricos calculam o estado futuro da atmosfera com base num estado inicial construído a partir de observações meteorológicas. Malardel (2025) revela de forma indireta a equivalência de ambos os termos relativamente ao contexto de previsão do tempo, explicando que um modelo atmosférico consiste num sistema informático que simula o comportamento da atmosfera e que é utilizado num formato de laboratório numérico para estudo dos processos atmosféricos, tanto para uma melhor compreensão dos mesmos ou como ferramenta de ajuda na previsão do tempo ou clima.

Belousov *et al.*, (2003) também refere o termo “modelo atmosférico” de forma equivalente a “modelo meteorológico”, embora de forma não direta. Segundo os

mesmos autores, os modelos atmosféricos tornam possível prever o tempo para vários horizontes temporais, executados por norma a partir de sistemas informáticos de previsão em tempo real, que envolvem uma recolha automatizada de dados, verificação e análise numérica das observações necessárias para a previsão meteorológica.

3.3.1.1 Classificação

A utilização de modelos numéricos, baseados na integração numérica de equações fundamentais da física que regem o sistema atmosférico, partindo de condições iniciais e condições de fronteira previamente definidas, permite uma melhor obtenção de resultados na previsão do tempo (Palma, 2018). Segundo o mesmo autor, o aumento da capacidade de processamento dos computadores, que se tem verificado nas últimas décadas permite, de forma crescente, simular fenómenos atmosféricos com maior resolução espacial. De acordo com a Enciclopédia do IPMA (s.d.), a Previsão Numérica do Tempo (PNT), em inglês *Numerical Weather Prediction* (NWP), recorre ao potencial de cálculo dos computadores para produzir uma estimativa do estado futuro da atmosfera, com recurso aos designados “modelos de previsão numérica do tempo”. De tal modo, podemos classificar os modelos meteorológicos de previsão numérica quanto à sua resolução, natureza de previsão e sua finalidade, conforme se verifica ao longo desta subsecção.

3.3.1.1.1 Resolução

Quanto à sua resolução, os modelos meteorológicos de previsão numérica classificam-se em modelos globais, regionais ou mesoescala e locais ou microescala (Palma, 2018).

Segundo o mesmo autor, num modelo global, o domínio horizontal cobre todo o planeta e permite identificar fenómenos meteorológicos de larga escala ou sinóticos, numa resolução espacial máxima de 28 km e resolução temporal de 3h. Um dos modelos mais utilizados na previsão meteorológica é o *Global Forecast System* (GFS), de acordo com Palma (2018).

Modelos regionais permitem uma representação mais eficaz dos fenómenos meteorológicos com escalas espaciais e temporais menores, com análise mais detalhada para uma ou mais regiões de interesse englobadas na área original, numa resolução inferior a 10 km (Palma, 2018). Alguns dos modelos mais difundidos são o *Weather Research and Forecasting* (WRF) ou o *Regional Atmospheric Modelling System* (RAMS).

Por sua vez, os modelos locais tratam dos fenómenos e escoamentos atmosféricos que ocorrem numa escala horizontal inferior a 2 km e numa escala temporal inferior a 1 hora, explica (Palma, 2018). Estes modelos, designados também por micro-meteorológicos, permitem a representação de fenómenos locais que modelos de maior escala não conseguem caracterizar, explica o mesmo autor.

3.3.1.1.2 Natureza da previsão

Relativamente à natureza de previsão, surge o modelo determinístico e o modelo probabilístico, de acordo com Casado *et al.*, (2016). A filosofia da Previsão Numérica do Tempo baseava-se no comportamento determinista da atmosfera, isto é, dado um estado inicial da atmosfera, a sua evolução temporal prevê-se numericamente, o que resulta num estado final único, tal como explicam os mesmos autores.

Nesse sentido, num modelo determinista o acaso não intervém em nenhum dos seus estados futuros, e que conseqüentemente, este tipo de sistema conduzirá sempre ao mesmo estado final a partir das condições iniciais idênticas (Casado *et al.*, 2016). Porém, a abordagem tradicional do tipo determinista originou um novo paradigma que fornece informação mais rica do que uma solução única para o estado futuro da atmosfera – modelo probabilístico – que inclui informação quantitativa relativamente à incerteza do processo de previsão, segundo os mesmos autores.

Casado *et al.*, (2016) afirma a existência deste tipo de modelo e refere que o comportamento não linear da atmosfera, caótico por consequência, deve ser agora tratado de forma probabilística, através de múltiplas previsões geradas a partir de condições iniciais ligeiramente diferentes, mas igualmente prováveis, com o intuito de caracterizar a incerteza da previsão.

3.3.1.1.3 Finalidade

Quanto à finalidade, Sampaio e Dias (2014) referem indiretamente três tipos de modelos meteorológicos: modelos de previsão meteorológica, modelos climáticos e modelos acoplados.

Em relação aos modelos de previsão meteorológica, Sampaio e Dias (2014) referem que os MCGAs – Modelos de Circulação Geral da Atmosfera, permitem prever as condições do tempo para vários dias, conforme a região e o estado de confiança, com alto grau de confiança até 7 a 12 dias.

Modelos climáticos, segundo os mesmos autores, são utilizados tanto para a previsão de tempo como para o estudo da variabilidade climática natural e a influência humana, associadas às emissões de gases com efeito de estufa (GEE) ou alterações a nível do uso do solo.

Geralmente, são utilizados diversos modelos para poder avaliar a variabilidade entre modelos do sistema terrestre e assim, conhecer e interpretar a totalidade de cenários possíveis, tendo em conta a dispersão entre os resultados dos modelos. Dessa forma torna-se possível quantificar a incerteza das projeções considerando múltiplos cenários de vários modelos – modelos acoplados.

3.3.1.2 WRF – Exemplo de um Modelo Meteorológico

Após a revisão da literatura, foi possível denotar a contínua referência a vários modelos, tais como o WRF, ECMWF, RAMS, GFS, entre outros. Embora exista uma grande variedade de modelos, cuja aplicação varia consoante a escala temporal e espacial, será apresentada neste ponto a descrição de apenas um modelo meteorológico, de resolução regional – o WRF (*Weather Research and Forecasting*).

O WRF trata-se de um sistema de modelação numérica orientado para a pesquisa de fenómenos atmosféricos e a previsão do tempo em mesoescala (regional), de última geração de modelos numéricos de previsão do tempo (Palma, 2018). Concebido para ser uma ferramenta de topo quanto à simulação atmosférica, este modelo regional dinâmico não hidrostático permite a assimilação de dados nas quatro dimensões (x, y, z e t) e apresenta várias opções de parametrizações físicas e portabilidade em diversas plataformas computacionais, explica o mesmo autor. O referido modelo, explica Palma (2018), resolve as equações físicas para um fluido compressível e considera as variáveis escalares conservativas. A grande vantagem do WRF relativamente aos seus antecessores, provém da estruturação baseada em engenharia de *software*, com o objetivo de obter uma maior velocidade de processamento e facilidade de manipulação e manutenção do código, bem como a instalação nas diversas plataformas existentes, por se tratar de um sistema *open-source* e disponibilizado gratuitamente (Palma, 2018).

3.3.2 Modelos Hidrológicos

Os Modelos Hidrológicos são representações matemáticas simplificadas dos processos que constituem o ciclo hidrológico (Mourato, 2009). Para o mesmo autor, estes modelos tratam-se da principal ferramenta de avaliação dos potenciais impactos das projeções dos modelos de clima e das alterações do uso do solo nos recursos hídricos. A modelação hidrológica requer um conhecimento aprofundado sobre o ciclo hidrológico, e conseqüentemente, sobre todos os processos físicos ocorrentes durante a precipitação, isto é, a própria precipitação, interceção, a evapotranspiração, infiltração e o escoamento superficial (Santos, 2009).

A modelação hidrológica permite a verificação da consistência das informações disponíveis – dados observados - que geralmente são muito curtas, obtidas a partir das observações hidrológicas nas bacias hidrográficas, e que com base nesses dados, os modelos hidrológicos podem ser calibrados (Santos, 2009).

Para Mourato (2009) existem três características principais a considerar na seleção de um modelo hidrológico para aplicação a uma bacia hidrográfica:

- Resolução espacial – o modelo deverá funcionar de forma espacialmente distribuído, com uma resolução da mesma ordem de grandeza da representação das condições meteorológicas e das características da bacia hidrográfica – relevo, tipo de solo, tipo de uso do solo;

- Resolução temporal – a intensidade de precipitação é relevante na formação do escoamento e reflete-se na resolução temporal dos dados meteorológicos e no passo de cálculo do modelo;
- Representação do solo – o comportamento do escoamento na superfície do solo e na zona instaurada é crucial para a formação do escoamento superficial.

3.3.2.1 Classificação

Modelos hidrológicos podem ser divididos em duas categorias - modelos físicos e modelos abstratos, de acordo com Chow *et al.*, (1988):

- a. Modelos físicos** - incluem modelos à escala que representam o sistema numa escala reduzida, como um modelo hidráulico do descarregador de uma barragem; e modelos analógicos que utilizam outro sistema físico com propriedades similares às do protótipo;
- b. Modelos abstratos** - representam o sistema de forma matemática. O funcionamento descreve-se por intermédio de um conjunto de equações que ligam as variáveis de entrada e saída. As mesmas variáveis podem ser funções do espaço e tempo, com possibilidade também de serem probabilísticas ou aleatórias, isto é, não apresentam um valor fixo num determinado ponto do espaço e tempo, sendo descritas através de distribuições de probabilidade.

Chow *et al.*, (1988) afirma que o desenvolvimento de um modelo hidrológico com variáveis aleatórias dependentes das três dimensões espaciais e do tempo exige uma certa complexidade, o que obriga à necessidade de simplificação do processo e o desprezo de determinadas variáveis. Segundo o mesmo autor, a classificação destes modelos está dependente das simplificações efetuadas, sendo essencial considerar três decisões básicas, apresentadas seguidamente em forma de questão:

1. As variáveis são aleatórias ou determinísticas?
2. As variáveis variam no espaço ou são uniformes?
3. As variáveis variam no tempo ou são constantes?

A figura 10 (adaptado de Chow *et al.*, 1988) representa graficamente a classificação dos modelos hidrológicos abstratos, com base nas três dimensões: natureza da aleatoriedade, variação espacial ou variação temporal.

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

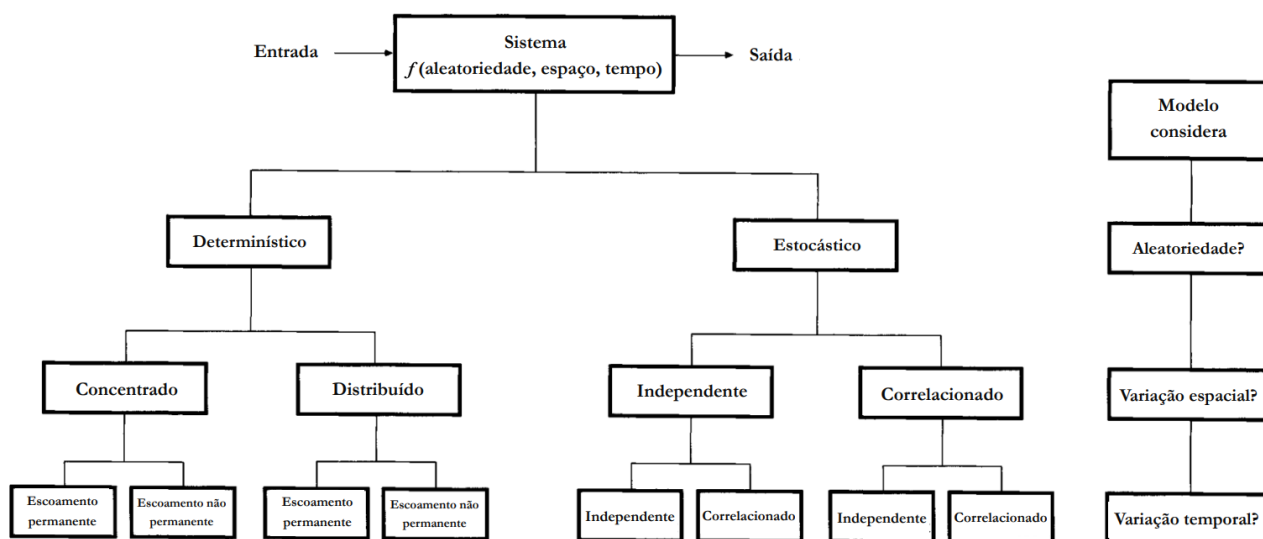


Figura 10 - Classificação dos modelos hidrológicos consoante a forma como tratam as dimensões de aleatoriedade e variabilidade espacial e temporal dos fenómenos hidrológicos (adaptado de Chow *et al.*, 1988)

Tal como se verifica na figura 10, um modelo determinístico não considera variáveis aleatórias; uma dada entrada produz sempre a mesma saída. Por sua vez, o modelo estocástico tem saídas por vezes aleatórias. Em suma, podemos concluir que um modelo determinístico faz previsões com base em projeções mais diretas, ao invés do estocástico, que faz previsões probabilísticas. Batista (2023) especifica também vários tipos de modelos hidrológicos, em função das suas características, em termos de diferentes parâmetros de entrada que utilizam e de que modo concretizam a sua análise. O mesmo autor classifica os modelos hidrológicos em:

- i. **Modelos determinísticos** – utilizam um conjunto de equações e leis físicas para descrever o comportamento de um sistema e fazer previsões com base nos parâmetros fornecidos. Nestes modelos, todos os parâmetros de entrada são conhecidos e fixos, o que gera uma previsão explícita. No entanto, o grau de incerteza associado aos parâmetros fornecidos aquando da análise dos resultados é relevante, devido à não consideração do grau nos modelos determinísticos. Neste tipo de modelos, um determinado conjunto de parâmetros produzirá sempre os mesmos resultados;
- ii. **Modelos estocásticos** – baseiam-se num modelo matemático que considera a incerteza dos parâmetros de entrada e dos processos, com recurso a métodos estatísticos e variáveis aleatórias. Este modelo tem como objetivo fornecer uma representação probabilística do comportamento de um sistema. Este poderá produzir resultados diferentes, mesmo sem alteração dos parâmetros de entrada, devido à apresentação de uma gama de resultados possíveis à saída do modelo, invés de uma única previsão determinística;

- iii. **Modelos empíricos** – utilizam dados e observações para descrever o comportamento de um sistema. Tem por base o pressuposto de que as relações entre os parâmetros de entrada e os resultados podem ser representados por uma ou mais equações, com os coeficientes de cada equação determinados por via de dados históricos, através de regressões ou outros métodos estatísticos. Estes modelos apresentam a vantagem de poderem ser rapidamente desenvolvidos e aplicados a novos dados, embora a sua precisão seja limitada pela qualidade e representatividade dos dados utilizados na construção do modelo;
- iv. **Modelos conceptuais** – compreendem as relações entre variáveis-chave e os processos num determinado sistema, sem recurso a equações ou algoritmos complexos. Utilizam-se na compreensão de sistemas complexos, tal como sistemas hidrológicos, e podem fornecer uma representação simplificada do seu comportamento. Estes modelos baseiam-se em observações, conhecimentos e experiências de campo, que ajudam a desenvolver modelos matemáticos mais detalhados. Sem grande complexidade matemática, estes modelos são por norma menos precisos e tem menor capacidade de previsão;
- v. **Modelos baseados em princípios físicos** – representam os processos físicos que determinam o comportamento de um sistema. Têm por base leis fundamentais da física, tal como a conservação da massa e energia, e utilizam equações matemáticas para descrever as interações entre as variáveis e os diversos processos de sistemas complexos. Tratam-se de modelos mais sofisticados, que fornecem previsões com maior precisão e fiabilidade quanto ao comportamento de um sistema.

3.3.2.2 HEC-HMS – Exemplo de um Modelo Hidrológico

Após a revisão da literatura, tornou-se notória a contínua referência de vários modelos hidrológicos, comuns em várias obras literárias – HEC-HMS, SWAT, MIKE SHE, entre outros. Embora exista alguma variedade de modelos, nesta secção, será apresentada de forma breve a descrição de um dos modelos hidrológicos (*softwares*) mais conhecidos: o HEC-HMS.

A entidade *Hydrologic Engineering Center*, pertencente à divisão do U.S. *Army Corps of Engineers*, é responsável pelo desenvolvimento e manutenção do modelo HEC-HMS, segundo o documento oficial (*U.S. Army Corps of Engineers, s.d.*).

De acordo com o documento, o *Hydrologic Modelling System* (HEC-HMS) trata-se de um modelo projetado para simular processos de precipitação-escoamento de sistemas hidrográficos dendríticos. O *design* do *software* permite a sua aplicabilidade numa ampla variedade de áreas geográficas para resolução de diversos problemas, nomeadamente a gestão dos recursos hídricos em grandes bacias hidrográficas e a hidrologia de cheias, bem como o escoamento em pequenas bacias urbanas e

naturais. De acordo com Batista (2023), este *software* insere-se no grupo dos modelos determinísticos e é amplamente utilizado na hidrologia, na gestão de recursos hídricos e na engenharia, o que constitui uma ferramenta de referência na previsão e alerta de inundações, gestão de recursos hídricos e produção de energia hidroelétrica.

3.3.3 Modelos Hidráulicos

Os Modelos Hidráulicos, afirma Machado (2013), simulam o comportamento da água proveniente da precipitação na bacia hidrográfica e na rede, além da compreensão dos processos hidráulicos das águas e respetivas interações físicas com o local. Para Miranda (2011), que cita MHL (2006), estes modelos estudam a dinâmica dos escoamentos em canais naturais, artificiais e margens, de forma a estimar as alturas e as velocidades da água em cada secção do escoamento e em cada instante de cálculo. Estes modelos, seguindo a linha de pensamento do autor, aplicam os resultados oriundos dos modelos hidrológicos como dados de entrada e são utilizados para a delimitação de zonas inundáveis.

Os autores citados anteriormente referem que os modelos hidráulicos podem ser classificados em várias categorias, de acordo com as suas capacidades de modelação: unidimensional (1D), quasibidimensional (quasi-2D), bidimensional (2D) e tridimensional (3D).

3.3.3.1 Classificação

Como outrora foi referido, de acordo com Miranda (2011) que cita MHL (2006), os modelos hidráulicos podem ser classificados como:

- **Unidimensionais (1D)** – utilizam as secções transversais para descrever a geometria do canal e também as linhas de corrente, que intercetam as secções transversais de forma perpendicular. Requerem por norma menor informação na fase de calibração e testes, dado que as soluções numéricas são mais estáveis e requerem uma menor capacidade do computador (Conde, 2007). A maioria dos modelos para simulações a longo prazo de rios de comprimento considerável são unidimensionais;
- **Quais-bidimensionais (quasi-2D)** – o comportamento do escoamento é descrito através da divisão da secção transversal em secções transversais parciais estudadas com base num modelo 1D;
- **Bidimensional (2D)** – adequado para representar o comportamento do escoamento, como estuários ou linhas de água com secções compostas e leitos maiores de grandes dimensões. Machado (2013) refere a sua utilização aquando da necessidade de avaliar comportamentos onde existe a possibilidade de escoamento superficial multidirecional, com recurso às equações de *Saint-Venant* para modelos 2D;

- **Tridimensional (3D)** – corresponde a uma modelação em que o campo de velocidades apresenta componentes na direção ao longo do perfil longitudinal do leito do rio e segundo as duas direções perpendiculares do plano da secção transversal da linha de água. A utilização destes modelos não é comum na modelação de inundações visto que exigem um esforço computacional muito elevado.

3.3.3.2 HEC-RAS – Exemplo de um Modelo Hidráulico

Após a revisão da literatura, foram encontrados vários modelos hidráulicos em várias obras. Modelos como HEC-RAS, Iber, Mike 21, estão presentes em grande parte dos sistemas de alerta, sendo estes os mais utilizados. Neste ponto, segue a descrição do modelo HEC-RAS.

HEC-RAS, em inglês, *Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*, trata-se de um modelo hidráulico concebido pelo *U.S. Army Corps of Engineers*, tendo Gary W. Brunner como líder de desenvolvimento do projeto (Brunner, 2016).

HEC-RAS é um modelo de cálculo do regolfo e do perfil longitudinal do leito, que permite a simulação dos escoamentos em canais naturais (rios) ou artificiais (e.g., canais de rega) e possibilita o cálculo e análise hidráulica de escoamentos unidimensionais em regime permanente e quasi-permanente (Conde, 2007). Com recurso a este programa, é possível calcular a erosão no leito do rio, devido ao transporte de sedimentos e modelar o escoamento em regime subcrítico, supercrítico e misto, refere o mesmo autor. Conde (2007) complementa, afirmando que este *software* permite o estudo de um trecho de um determinado rio e suporta uma rede complexa com diversas funções.

O HEC-RAS permite obter níveis de escoamento num determinado troço da rede hidrográfica, bem como a definição dos leitos de cheias, o que possibilita a visualização do canal em 3D (Silva, 2013). De acordo com o mesmo autor, este modelo é considerado um modelo morfodinâmico 1D composto por 3 módulos: 1) simulação do escoamento em regime permanente; 2) simulação do escoamento em regime variável; 3) simulação do transporte sólido.

3.4 Revisão de Sistemas de Alerta Operacionais

A utilização de sistemas de alerta para previsão de cheias e inundações urbanas não é um conceito propriamente inovador, mas carece da falta de projeção para várias cidades, nomeadamente em Portugal. Desse modo, já foram executados alguns projetos sob esta necessidade, que serão explorados especificamente ao longo desta secção. Para caracterizar os sistemas de alerta, serão apresentadas as seguintes características e especificações: descrição geral do sistema, área de estudo,

metodologia, níveis e critérios de alerta, desempenho e avaliação. Em seguida, serão apresentados alguns sistemas de alerta conforme descritos nos respetivos artigos técnico-científicos, compreendidos num espaço temporal entre 2015 e 2025, embora os quatro sistemas analisados pertençam a um período temporal entre 2020 e 2021. Serão apresentados ao longo deste subcapítulo os seguintes quatro sistemas de alerta:

- FFAS – cidade de Águeda, Portugal;
- Sistema transfronteiriço para Ponte de Lima, Portugal e Espanha;
- MERLIN – região da Galiza, Espanha;
- MIDAS – zona de Ourense, Espanha.

3.4.1 FFAS (Flood Forecast and Alert System)

A descrição do sistema de alerta de previsão de cheias para a cidade de Águeda terá por base o artigo técnico-científico “*An interactive Web-GIS fluvial flood forecast and alert system in operation in Portugal*”, de acordo com Mourato, S., Fernandez, P., Marques, F., Rocha, A. e Pereira, L. (2021). Este artigo descritivo do FFAS foi publicado na revista científica *International Journal of Disaster Risk Reduction*.

3.4.1.1 Descrição Geral

O FFAS, operacional desde 2019, foi concebido para antecipar e prever alertas de cheias no concelho de Águeda, centro de Portugal. No âmbito de um projeto científico suportado pelo Programa Operacional da Região Centro, na componente FEDER - Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, o sistema foi desenvolvido por uma equipa de investigadores portugueses. Na sua base, o sistema engloba três modelos principais, com o cruzamento de dados meteorológicos, hidráulicos e hidrológicos, além de uma plataforma *WebGIS* que apresenta mapas de risco de inundação em tempo real, acessível a entidades e ao público em geral.

3.4.1.2 Área de Estudo

Para um melhor enquadramento do sistema, é fundamental rever a área de estudo, especialmente o seu âmbito geográfico e os pontos mais críticos ao nível de cheias.

3.4.1.2.1 Âmbito Geográfico

A área de implementação do sistema situa-se na cidade de Águeda, incorporada numa área de 560 ha (hectares), transposta por um troço do Rio Águeda com o comprimento de 9,8 km, assente numa bacia hidrográfica de 408 km². A área em causa foi delimitada sob a ótica da extensão de cheia durante um período de retorno de 100 anos, definido pela Agência Portuguesa do Ambiente e alargada de modo a incluir os declives acentuados, assegurando dessa forma, a extensão total possível da

cheia. O relevo circundante é variável, com altitudes entre 1 e 70 metros, sob forte condição das encostas da Serra do Caramulo.

3.4.1.2.2 Pontos Críticos

Nesta secção, destaca-se a zona urbana de Águeda, com histórico recente de inundações significativas, como em fevereiro de 2016 e 2019, bem como em dezembro de 2019. Nesta área insere-se um conjunto de infraestruturas vulneráveis como estradas, pontes e edifícios públicos. A construção de um canal artificial de 791 metros, com um investimento total de 2 milhões de euros em 2015 e projetado para eventos com período de retorno de 20 anos, não mitigou totalmente o risco. A mancha florestal predominante, acrescida dos impactos provocados pelos incêndios florestais, bem como a presença de solos com profundidade reduzida, amplificam a propensão para um escoamento superficial acelerado, reduzindo a retenção da água.

3.4.1.3 Metodologia

A cadeia de modelação assente na metodologia do FFAS baseia-se em três módulos principais – meteorológico, hidrológico e hidráulico, bem como os dados de entrada, automatização e processamento dos modelos.

3.4.1.3.1 Modelação Meteorológica

O modelo meteorológico está assente no modelo WRF-ARW v2.2, configurado com dois domínios de resolução espacial (25 km e 5 km) e 27 níveis verticais, instruídos com dados do GFS com atualização de 6 em 6 horas. A precipitação gera-se de 15 em 15 minutos com processamento automático. A validação efetuou-se com dados da estação de Varzielas, que manifesta correlações significativas até 54 horas – precipitação horária, e até 8 dias – acumulados diários, com um horizonte de previsão para 72 horas.

3.4.1.3.2 Modelação Hidrológica

O HEC-HMS é responsável por modelar a resposta da bacia à precipitação, com base no método do *Curve Number* (CN), a partir de dados da COS2018 e do *European Soil Database*. Efetuou-se a transformação da precipitação em escoamento superficial direto com o método do SCS, com a adição do escoamento de base fixo (mensal) para representar o escoamento subterrâneo. A calibração do modelo teve por base oito eventos entre 2007 e 2018 e validado com cinco, com recurso a dados de três estações – Ponte de Águeda, Ponte Redonda e Ribeiro.

3.4.1.3.3 Modelação Hidráulica

O modelo hidráulico é sustentado pelo HEC-RAS-2D, ou seja, modelo bidimensional. A geometria urbana fixa-se num Modelo Digital do Terreno (MDT) de 0,4m produzido a partir de dados LiDAR UAV, levantamentos topográficos e batimétricos, bem como parâmetros de rugosidade (coeficiente de Manning) ajustados na calibração. A calibração deste modelo teve por base observações nos pontos de Águeda e Alhandra, atingindo NSE entre 56-75% no nível de calibração e 48-72%, correspondente à validação.

3.4.1.3.4 Dados de Entrada

Existe uma multiplicidade de fontes de dados responsáveis pela alimentação dos modelos (meteorológico, hidrológico e hidráulico), que podem ser agrupados em 5 grupos:

- a. Dados meteorológicos provenientes do modelo GFS para processamento no WRF (modelação meteorológica);
- b. Precipitação observada para calibração e observação a partir da estação de monitorização de Varzielas, Serra do Caramulo (modelação meteorológica);
- c. Dados topográficos da bacia derivados do MDT SRTM (30 m) (modelação hidrológica);
- d. Dados do uso do solo provenientes da COS2018 – Carta de Ocupação do Solo, e tipologia do solo, através da *European Soil Database* (modelação hidrológica);
- e. Dados da geometria detalhada da zona urbana obtida por LiDAR de alta densidade, bem como o levantamento batimétrico, complementado com ortofotomapas (modelação hidráulica).

3.4.1.3.5 Automatização e Processamento

O sistema atua de forma automatizada quase na totalidade em ciclos de 6 horas. A sua execução inicia-se após a receção dos dados meteorológicos do GFS que alimentam o WRF e geram hidrogramas processados para o modelo HEC-HMS, que consequentemente produzem hidrogramas de entrada para o HEC-RAS 2D. Este processo é executado em 90 minutos e tem capacidade para gerar previsões horárias para um horizonte de 72 horas, com atualizações automáticas a cada 6 horas. Os resultados do processo anterior são enviados para uma base de dados *PostgreSQL* e são integrados num *GeoServer* que posteriormente alimenta a plataforma *WebGIS*, desenvolvida em *Laravel AngularJS* e *OpenLayers*. Esta plataforma permite a visualização em tempo real da previsão de cheias e o envio automático de alertas para utilizadores previamente registados.

3.4.1.4 Níveis e Critérios de alerta

Os níveis de alerta são definidos com base na profundidade da água prevista por cada célula da malha hidráulica. Os limiares foram definidos em 3 classes, em colaboração com a Proteção Civil local, e são integrados num sistema de notificações automático. Os critérios de alerta para a plataforma de *WebGIS* são definidos da seguinte forma:

1. Alertas para utilizadores registados: possibilidade de seleccionar edifícios específicos; caso um edifício esteja dentro da área de inundação, o sistema envia um *email* automático para o utilizador.
2. Alertas para as Autoridades de Proteção Civil: alertas para Autoridades de Proteção Civil quando a profundidade da água atinge valores específicos em pontos estratégicos; os alertas são emitidos para as autoridades de Proteção Civil conforme assim o determinaram;
3. Mapas de alerta Web-GIS: os utilizadores podem aceder livremente à plataforma, visualizar mapas de alerta, avaliar o nível de água previsto, visualizar a extensão da inundação para três dias de previsão, e decidir a necessidade de preparação para uma possível inundação.

Os níveis de alerta, ou perigosidade, podem ser de nível médio, elevado e muito elevado, tal como se apresenta na tabela 3, de acordo com a profundidade da água.

Tabela 3 - Representação dos níveis de alerta (perigosidade) e a profundidade da água correspondente a cada uma destas classes

Nível de alerta (perigosidade)	Profundidade da água
Médio	Entre 0 e 0,5 m
Elevado	Entre 0,5 e 1m
Muito elevado	Superior a 1m

3.4.1.5 Desempenho e Avaliação

Nesta secção são apresentados pontos importantes relativos à credibilidade do sistema de alerta, nomeadamente ao nível da precisão dos seus modelos, a validação e resultados do caso de estudo, o tempo de resposta e eficiência computacional, bem como as próprias limitações do sistema.

3.4.1.5.1 Precisão dos Modelos

Estatísticas como o *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) permitiram avaliar a precisão do sistema, que obteve valores entre 69-88% no modelo hidrológico e superiores a 75% relativamente ao modelo hidráulico. Num evento específico, entre 31 de janeiro a 1 fevereiro de 2019, registou-se um erro inferior a 12% na previsão dos picos observados, com antecedência de até 72 horas. Este sistema considera-se tecnologicamente avançado, por utilizar modelação hidrológica e hidrodinâmica 2D acoplada em tempo real, apoiada pela previsão numérica do tempo e num modelo digital de superfície do terreno de alta resolução.

3.4.1.5.2 Resultados do Caso de Estudo

A validação do sistema ocorreu após cinco eventos independentes e um caso operacional específico: uma cheia fluvial a 1 de fevereiro de 2019. Houve uma comparação das previsões com observações topográficas dos níveis de água e revelou-se uma correspondência espacial elevada entre a previsão e a realidade, com as estatísticas F1 e F2 (métricas utilizadas em estudos de inundações para avaliação da correspondência espacial entre áreas observadas e simuladas, respetivamente) a atingirem valores entre 80-90%.

3.4.1.5.3 Tempo de Resposta e Eficiência Computacional

A cadeia complementar de modelos NWP (WRF), HEC-HMS e HEC-RAS 2D (modelo meteorológico, hidrológico e hidráulico, respetivamente) demora por aproximação 90 minutos para gerar previsões de 72 horas, sendo considerado adequado para operações quase em tempo real. A otimização da malha computacional garantiu um número de *Courant* ≤ 1 , o que assegura estabilidade numérica do modelo hidráulico. A janela de atualização de 6 em 6 horas do sistema permite a antecipação de eventos de curta latência (tais como as cheias rápidas) com margem suficiente para uma resposta operacional por parte das autoridades.

3.4.1.5.4 Limitações

Embora revele um bom desempenho, o sistema ainda apresenta algumas lacunas. Uma das limitações assenta no facto da qualidade da previsão em eventos demasiado localizados poder ser afetada devido à incerteza associada ao modelo meteorológico. Existe igualmente uma insuficiência de eventos de calibração após o ano de 2019, o que limita a continuidade de melhorias. O sistema apresenta de igual modo uma forte dependência da atualização de dados de uso do solo, cobertura vegetal e geomorfologia após os incêndios. Como uma evolução natural do sistema, está prevista a integração futura de dados radar e técnicas de previsão probabilística.

3.4.2 Sistema Integrado para a Previsão e Alerta de Cheias na Parte Portuguesa de um Rio Transfronteiriço: Aplicação à Zona Ribeirinha de Ponte de Lima

De acordo com Maia, R., Andrade, J., Alemi, M. e Mendes, J (2020), foi desenvolvido um “*Sistema Integrado para a Previsão e Alerta de Cheias na Parte Portuguesa de um Rio Transfronteiriço. Aplicação à Zona Ribeirinha de Ponte de Lima*”, tal como indica o título do respetivo artigo técnico-científico, que descreve o sistema de alerta, publicado nas atas do XI Congresso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua, realizado em setembro de 2020.

3.4.2.1 Descrição Geral

No âmbito do projeto *RISC_ML*, liderado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) com a colaboração e acompanhamento das autoridades hidrográficas portuguesas (APA – ARH do Norte) e espanholas (Confederación Hidrográfica del Miño-Sil), foi desenvolvido um protótipo de um sistema de previsão e alerta precoce de cheias fluviais para a parte portuguesa de um rio transfronteiriço, aplicado à zona ribeirinha de Ponte de Lima.

Este sistema foi projetado para apoio à gestão de cheias em regiões ribeirinhas com influência de infraestruturas hidráulicas, com a integração de modelos meteorológicos, hidrológicos e hidráulicos. O sistema permite gerar alertas diários, acompanhados por mapas de inundações e hidrogramas para a região em estudo, devido aos seus mecanismos automatizados.

3.4.2.2 Área de Estudo

Para um melhor entendimento da área em estudo, é necessário referir o âmbito geográfico em que se encontra, bem como os pontos mais críticos a considerar.

3.4.2.2.1 Âmbito Geográfico

A área de aplicação do sistema corresponde à margem portuguesa da bacia hidrográfica do rio Lima, que abrange uma área total de aproximadamente 2370 km², especialmente a zona ribeirinha da cidade de Ponte de Lima, que incide numa das áreas de risco potencial de inundação, definidas no Plano de Gestão de Risco de Inundação da Região Hidrográfica do Minho e Lima (PGRI - RH1) da Agência Portuguesa do Ambiente.

3.4.2.2.2 Pontos Críticos

O sistema considera essencialmente três secções de controlo hidrológico: barragem do Alto Lindoso, barragem do Touvedo e zona ribeirinha de Ponte de Lima. O estudo centra-se particularmente na zona ribeirinha da vila, por se localizar a jusante

de duas infraestruturas hidráulicas relevantes: Alto Lindoso e Touvedo. A primeira (Alto Lindoso) influencia diretamente os caudais do rio Lima, uma vez que a sua albufeira é a única com capacidade de armazenamento suficiente para regularizar o escoamento, de modo a que o efeito das inundações a jusante seja minimizado. A segunda (Touvedo), a jusante da anterior, fornece dados hidrométricos essenciais para a calibração do modelo hidrológico.

3.4.2.3 Metodologia

Resulta da integração de vários modelos (meteorológico, hidrológico e hidráulico) no sistema, em conjunto com os dados de entrada, e posteriormente a automatização e processamento do sistema

3.4.2.3.1 Modelação Meteorológica

Este módulo, como é referido no artigo, é responsável pela recolha e integração de dados de precipitação observada nos 4 dias anteriores, através de dados recolhidos pelas estações SNIRH e da MeteoGalicia. Esta última entidade fornece previsões meteorológicas - modelo WRF – com uma resolução temporal de 1 hora, espacial de 4 km e horizonte de previsão de 96 horas – isto é, para os 4 dias seguintes.

3.4.2.3.2 Modelação Hidrológica

A componente hidrológica foi desenvolvida com o HEC-HMS, configurado de forma semi-distribuída, a partir de modelos digitais do terreno com uma resolução de 25 km. O modelo gera hidrogramas de cheia prevista para as três secções (Alto Lindoso, Touvedo e Ponte de Lima), tendo em conta o regime natural e a curva natural de probabilidades de descarga da barragem do Alto Lindoso, definida com base nos registos históricos. A modelação hidrológica é executada com as 96 horas anteriores de precipitação observada na bacia, de forma a ser possível um ajuste ao longo do tempo dos parâmetros do modelo às características hidrológicas existentes.

3.4.2.3.3 Modelação Hidráulica

O modelo Iber+ é responsável por simular a inundação bidimensional da área urbana, assim que o caudal previsto na secção de Ponte de Lima ultrapasse o limiar mínimo de cheia (pré-alerta). Os resultados incluem mapas de profundidade e delimitação da área inundada. O Modelo Digital do Terreno (MDT) utilizado para a modelação foi obtido com base num levantamento LiDAR de alta resolução (4 km), disponibilizado pelo município.

3.4.2.3.4 Dados de Entrada

Para alimentação do sistema, foram utilizados vários tipos de dados: dados históricos observados da precipitação em estações pluviométricas da rede de monitorização do

SNIRH para a parte portuguesa, e da agência MeteoGalicia para a parte espanhola; dados de previsões de precipitação do modelo WRF; dados topográficos provenientes dos MDT, da APA (para a parte portuguesa) e da base de dados *Copernicus* (parte espanhola); e dados observados em estações hidrométricas da rede de monitorização SNIRH, nomeadamente os caudais, níveis hidrométricos e volumes.

3.4.2.3.5 Automatização e Processamento

O sistema é executado de forma automática uma vez por dia, após a disponibilização das previsões meteorológicas. A cadeia de simulação é gerida por scripts *Python*, que controlam os modelos, analisam os resultados e produzem os alertas. O módulo meteorológico, assim denominado no artigo, alimentado pelas previsões de precipitação e dados de precipitação observada, sustenta o modelo hidrológico, que gera hidrogramas previstos. Caso o limiar não exceda o nível pré-definido, o alerta é ignorado. Caso o limiar seja excedido, o módulo hidráulico gera mapas de inundação na tentativa de deteção de risco e criação do alerta, que produz uma mensagem de alerta para a entidade responsável posteriormente analisar e validar. Embora o sistema integre previsões de precipitação de 96 horas, apenas se torna necessária a previsão de eventos e emissão de alertas para as 24 horas seguintes.

3.4.2.4 Níveis e Critérios de Alerta

Atendendo à secção de referência de estudo – secção intermédia do areal de Ponte de Lima - foram definidos três tipos de alerta: pré-alerta, alerta e emergência. Os limiares de inundação e de alerta, representados na tabela 4, variam conforme o tipo de alerta, caudal atingido, cota do nível de água aproximado no areal (em metros) e o efeito físico provocado pela inundação.

Tabela 4 - Representação dos limiares de inundação e alerta definidos para a secção intermédia do areal de Ponte de Lima

Tipos de alerta	Caudal (m ³ /s)	Cota do nível de água aproximado no areal (m)	Efeito físico
Pré-alerta	300	5	Início da inundação no areal
Alerta	700	5,8	Metade do areal inundado
Emergência	2000	7,9	Início da inundação no arruamento marginal

3.4.2.5 Desempenho e Avaliação

Importa referir o desempenho e avaliação do sistema de alerta, após caracterizar a sua descrição geral e metodologia. Assim, é fundamental referir a precisão dos modelos apresentados, a sua validação e os casos de estudo, o tempo de resposta e a sua eficiência computacional, bem como as limitações que o sistema apresenta.

3.4.2.5.1 Precisão dos Modelos

A calibração dos modelos efetuou-se com base em eventos históricos de cheia. Os testes revelaram alta concordância entre os alertas emitidos e os níveis observados, desde que as previsões de precipitação obtivessem precisão. As cheias simuladas refletiram com exatidão os padrões reais de inundação, assim como os níveis de caudal e cota, que estiveram geralmente bem ajustados às observações.

3.4.2.5.2 Resultados do Caso de Estudo

O sistema foi testado durante um período de 30 dias – mês de dezembro de 2019. Como resultados principais, concluiu-se que houve uma deteção de todos os eventos reais de cheia, com algumas variações. O sistema conduziu a alertas sobrestimados em três dias (em que a situação real seria de pré-alerta) com precipitação excessiva e registou também um falso pré-alerta, num período isolado. Houve também a antecipação da previsão de uma situação de alerta em 24 horas, provocada por um desfasamento temporal do pico do hidrograma de cheia.

3.4.2.5.3 Tempo de Resposta e Eficiência Computacional

As simulações são relativamente leves, com tempos de execução adequados a um sistema de alerta diário. A eficiência foi conseguida com recurso à automação de rotinas *Python* e de modelação 2D em Iber+, suportada por dados digitais de elevada resolução. Comprovou-se de forma geral, a utilidade e a eficiência do sistema na deteção de situações de risco de inundação, tanto na emissão atempada de alertas como na delimitação das áreas de inundação.

3.4.2.5.4 Limitações

Embora tenha mostrado um bom desempenho e fiabilidade, o sistema apresenta algumas limitações. Estas podem-se agrupar da seguinte forma: o período de validação de 30 dias, considerado reduzido, limita a robustez estatística da avaliação; a eficácia do sistema depende sistematicamente da precisão das previsões meteorológicas, geradas pelo modelo WRF pela MeteoGalicia; a operacionalidade do sistema não é contínua, com a necessidade de validação manual antes dos alertas oficiais serem acionados pelas entidades decisoras, o que revela alguma falta de automatismo no processo de emissão de alertas.

3.4.3 MERLIN (Modelo de Evaluación del Riesgo Local de Inundación)

De acordo com Fraga, I., Cea, L., Puertas, J., Mosqueira, G., Quinteiro, B., Botana, S., Fernández, L., Salsón, S., Fernández-García, G., e Taboada, J. (2021), desenvolveu-se o sistema “*MERLIN: Una nueva herramienta para la predicción del riesgo de inundación en la demarcación hidrográfica Galicia-Costa*”, tal como indica o título do respetivo artigo técnico-científico que o descreve, publicado na revista científica Ingeniería del Agua, pela Editorial Universitat Politècnica de València, em colaboração com IWA Publishing.

3.4.3.1 Descrição Geral

O sistema de alerta MERLIN (Modelo de Evaluación del Riesgo Local de Inundación) trata-se de uma ferramenta operacional de apoio à gestão do risco de inundação, desenvolvida para a Demarcação Hidrográfica Galicia-Costa (Espanha). A conceção deste projeto tem como objetivo estimar o risco de inundação nas Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundaciones – as ARPSIS, conforme definidas pelas autoridades espanholas, com o fornecimento de previsões detalhadas e velocidades de escoamento e extensão da inundação, em períodos úteis para a ativação de medidas de proteção civil. Na sua arquitetura, o sistema combina previsões meteorológicas, modelos hidrológicos calibrados e simulações hidráulicas de elevada resolução, com execução automática e visualização integrada. O sistema em causa foi desenvolvido por um consórcio liderado pelo Grupo de Engenharia da Água da Universidade da Corunha, em parceria com as Augas de Galicia (autoridade hidráulica regional) e a MeteoGalicia.

3.4.3.2 Área de Estudo

Para uma melhor perceção da área em estudo, é necessário referir o âmbito geográfico em que o sistema de alerta se encontra, bem como os pontos e elementos urbanos mais críticos identificados.

3.4.3.2.1 Âmbito Geográfico

A área de aplicação do sistema está incorporada na Região da Galiza, noroeste de Espanha com implementação inicial em 4 bacias hidrográficas piloto da região da Galiza entre as quais são: bacias dos rios Cee, Grova, Landro e Verdugo-Oitavén. Estas bacias, com diferentes contextos hidrológicos e morfológicos dentro da demarcação Galicia-Costa, permitem avaliar a versatilidade do sistema em áreas com características distintas.

3.4.3.2.2 Pontos Críticos

As zonas em estudo incluem áreas urbanas vulneráveis e zonas ribeirinhas baixas sujeitas a alagamentos e áreas costeiras sujeitas à interação fluvial-marinha. Atendendo às bacias hidrográficas, podemos considerar como pontos críticos a zona de Corunha (Cee), Pontevedra (Grova), Lugo e Viveiro (Landro) e Pontevedra, Arcade/Redondela (Verdugo-Oitavén). A presença de marés atlânticas também constitui um fator de complexidade adicional na simulação hidráulica. Além disso, a morfologia urbana, o uso do solo e a resposta rápida das bacias pequenas são elementos que reforçam a necessidade de previsão precisa e localizada.

3.4.3.3 Metodologia

A cadeia de modelação do MERLIN é composta por três módulos principais – meteorológico, hidráulico e hidrológico – com uma execução automatizada e interligação sequencial. O funcionamento do sistema divide-se em duas fases complementares:

- a. Fase de inicialização – onde o sistema caracteriza o estado de humidade do solo nas bacias hidrográficas no início da previsão;
- b. Fase de previsão – são determinados os caudais esperados para as 96 horas seguintes (4 dias) ao longo das bacias incluídas no sistema.

3.4.3.3.1 Modelação Meteorológica

O modelo meteorológico é alimentado por dados meteorológicos posteriormente utilizados pelos modelos hidráulicos e hidrológicos. Na primeira fase (inicialização), a informação meteorológica (humidade do solo, caudal, precipitação, entre outros) obtém-se maioritariamente a partir de mapas meteorológicos elaborados de forma diária, com uma resolução espacial e temporal de 250 metros e 1 hora, respetivamente, pela MeteoGalicia. Na fase de previsão, o sistema recebe previsões – deterministas e *ensemble* meteorológico - para os 4 dias seguintes, provenientes do modelo atmosférico WRF, operacionalizado também pela MeteoGalicia, com uma resolução espacial e temporal de 4 km e 1 hora, respetivamente.

3.4.3.3.2 Modelação Hidrológica

O módulo hidrológico prevê os caudais ao longo das bacias hidrográficas, sendo composto pelos modelos hidrológicos das 4 bacias e um conjunto de funções programadas em *Python* para a construção dos modelos, execução das simulações e processamento de dados. Para a construção do modelo hidrológico de cada bacia recorreu-se ao *software* HEC-HMS.

Durante a fase de inicialização, define-se um conjunto de parâmetros. A partir de diferentes combinações dos parâmetros a ajustar, é feita a relação precipitação-

escoamento durante este período. O hidrograma calculado com cada uma das combinações é comparado aos registos de caudal medidos pela estação de medição correspondente. Na fase de previsão, os modelos determinam os caudais ao longo das bacias durante os 4 dias seguintes, alimentados pelas previsões meteorológicas descritas anteriormente, bem como os valores dos parâmetros obtidos na fase de inicialização.

3.4.3.3.3 Modelação Hidráulica

Calcula as profundidades e velocidades previstas durante os dias seguintes nas ARPSIS das bacias incluídas no sistema, a partir de previsões de caudal e níveis de maré. O *software* utilizado é o Iber+, uma versão paralelizada em GPU do modelo Iber, que permite a simulação bidimensional do escoamento superficial sobre modelos digitais de terreno de alta resolução. Esta modelação é particularmente relevante nas zonas urbanas costeiras, onde o relevo e a infraestrutura construída influenciam de forma significativa o comportamento da inundação.

3.4.3.3.4 Dados de Entrada

O sistema integra dados provenientes das previsões meteorológicas WRF e mapas meteorológicos da MeteoGalicia; dados de caudal registados pelas estações de medição operacionalizadas pela Auga de Galicia; dados SMAP para a humidade do solo, provenientes da NASA; modelos oceânicos (ROMS) para a previsão de marés; e Modelos Digitais do Terreno de alta resolução para modelação hidrológica e hidráulica.

3.4.3.3.5 Automatização e Processamento

Todo o processo de simulação é implementado em linguagem *Python*, com automatização de processos como a recolha e tratamento de dados, execução paralela das simulações hidrológica e hidráulica e geração de mapas. Os resultados são apresentados numa plataforma *web* interativa, para facilitação da consulta das previsões, acessível a técnicos e autoridades em forma de mapas de inundação e séries temporais por ponto de controlo, além da exportação em *GeoJSON* para integração com SIG.

3.4.3.4 Níveis e Critérios de Alerta

O sistema MERLIN utiliza uma estrutura de três níveis de alerta hidráulico, com base nos critérios definidos pelo Regulamento do Domínio Público Hidráulico de Espanha. A classificação do risco realiza-se com base em variáveis simuladas como a profundidade de inundação, caudal e velocidade de escoamento, sujeitas a avaliação em locais de controlo representativos. Cada nível está associado a uma cor

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

identificadora, usada na interface gráfica do sistema para facilitar a interpretação dos resultados. Os limiares definem-se para cada bacia hidrográfica com base em simulações históricas e ajustados à sua morfologia e vulnerabilidade. A emissão de alertas é automática, sendo atualizada a cada novo ciclo de previsão.

Na tabela 5 estão representados os três níveis de alerta, bem como a cor associada e a descrição de cada um dos tipos de alerta, de acordo com a sua severidade.

Tabela 5 - Representação dos níveis de alerta definidos bem como a sua descrição e cor associada, de acordo com as bacias hidrográficas referenciadas

Nível de alerta	Cor	Descrição
Baixo	Verde	Valores abaixo do limiar de referência. Situação normal.
Médio	Amarelo	Valores próximos ou ligeiramente acima dos limiares. Requer atenção por parte das entidades.
Grave	Vermelho	Excedência significativa dos limiares. Situação de risco elevado.

3.4.3.5 Desempenho e Avaliação

Nesta secção são apresentados pontos importantes relativos à credibilidade do sistema de alerta, nomeadamente, ao nível da precisão dos seus modelos, validação e resultados do caso de estudo, tempo de resposta e eficiência computacional, bem como as suas limitações identificadas.

3.4.3.5.1 Precisão dos Modelos

A maioria dos caudais máximos diários previstos apresentam diferenças inferiores a 25% relativamente às observações posteriores. Estas diferenças estão associadas a incertezas de previsão (erros de previsão meteorológica, modelos hidrológicos, entre outros), portanto os resultados podem ser considerados satisfatórios. O índice R^2 , responsável por medir a capacidade das previsões de um modelo em reproduzir os valores observados na realidade, revelou-se mais elevado em bacias de maior dimensão, por serem menos sensíveis a erros de previsão, e vice-versa, para as bacias de menor dimensão. Verificou-se também que a utilização de previsões por *ensemble* aumentou a robustez dos resultados, permitindo uma representação da incerteza associadas às condições meteorológicas.

3.4.3.5.2 Resultados do Caso de Estudo

O funcionamento do sistema foi analisado durante o inverno de 2019-2020, com a comparação das previsões realizadas com as observações posteriores do caudal. Os resultados demonstraram que o sistema foi capaz de detetar os eventos relevantes nas ARPSIS, embora exista o registo de um galgamento do leito em algumas das ARPSIS durante a etapa de validação. No entanto, não foi possível avaliar a fiabilidade das previsões efetuadas pelos modelos hidráulicos devido à ausência de dados de campo relativos à extensão das zonas inundadas.

3.4.3.5.3 Tempo de Resposta e Eficiência Computacional

O sistema apresenta tempos de execução adequados ao contexto operacional, com simulações completas (meteorológicas, hidrológicas e hidráulicas) concluídas em cerca de 1 hora por bacia, incluindo a execução do *ensemble*, o que é satisfatório para a emissão de alertas. A eficiência computacional resulta do modelo hidráulico Iber+ com processamento paralelizado, que reduz os tempos de cálculo e permite a integração de previsões hidráulicas detalhadas em tempo útil, com atualizações regulares.

3.4.3.5.4 Limitações

Entre as principais limitações encontradas no sistema, destacam-se essencialmente a dependência da qualidade das previsões meteorológicas, particularmente em eventos localizados e de rápida evolução; a escassez de dados medidos em campo relativos a inundações passadas, o que dificulta a calibração espacial e a validação direta dos modelos hidráulicos; ausência de integração da drenagem urbana nos modelos hidráulicos, o que provoca uma limitação na precisão da simulação em contextos fortemente edificadas.

3.4.4 MIDAS (Miño River Flood Alert System)

O artigo técnico-científico de Fernández-Nóvoa, D., García-Feal, O., González-Cao, J., Gonzalo, C., Rodríguez-Suárez, J., Portal, C., Gómez-Gesteira, M. (2020), publicado na revista científica *Water*, sob o título “*MIDAS: A New Integrated Flood Early Warning System for the Miño River*”, editado pela MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute), descreve o sistema de alerta MIDAS.

3.4.4.1 Descrição Geral

O MIDAS (Miño River Flood Alert System) consiste num sistema de previsão e alerta de cheias projetado para a bacia hidrográfica do rio Minho, com particular ênfase na parte espanhola, nomeadamente na zona de Ourense. Com o objetivo de

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

apoiar a gestão de riscos hidrológicos em bacias transfronteiriças com o fornecimento de previsões quase em tempo real com elevada fiabilidade, a arquitetura deste sistema não difere em demasia das anteriores, sendo esta composta por modelos hidrológicos e hidráulicos de elevada resolução espacial e temporal integrados, com capacidade de operacionalização automática e emissão de produtos de apoio à decisão, como hidrogramas e mapas de inundação.

A conceção do sistema teve também como foco a replicabilidade do mesmo, o que permite a aplicação da sua metodologia noutras bacias com características semelhantes. O desenvolvimento conjunto do sistema foi efetuado pela Universidade de Vigo (EPhysLab – *Environmental Physics Laboratory*, CIM-UVIGO), Tragsatec, SAIH Miño-Sil (Ourense, Espanha) e a Confederación Hidrográfica Miño-Sil (Ourense, Espanha).

3.4.4.2 Área de Estudo

Para enquadrar o sistema em causa, é fundamental entender a área de estudo, nomeadamente o seu âmbito geográfico e os pontos historicamente mais críticos relativamente a inundações.

3.4.4.2.1 Âmbito Geográfico

A principal aplicação do MIDAS ocorre na bacia superior do rio Minho que engloba uma área total de cerca de 5000 km², localizada na Galiza, Espanha. Trata-se de uma bacia transfronteiriça sujeita a episódios de cheia com impacto significativo em zonas rurais e urbanas, destacadas pela sua relevância hidrológica significativa e risco recorrente de cheias.

3.4.4.2.2 Pontos Críticos

A cidade de Ourense apresenta uma particular vulnerabilidade histórica a fenómenos de cheias e/ou inundação. A presença de infraestruturas sensíveis junto ao leito do rio evidencia o risco, tendo sido identificada uma área crítica de aproximadamente 1 km² para uma simulação bidimensional de alta resolução. As infraestruturas mais vulneráveis registam danos ou interdições com frequência durante os episódios de cheia, o que reforça a necessidade de uma modelação detalhada nesta área crítica identificada.

3.4.4.3 Metodologia

A metodologia adotada no MIDAS tem por base uma cadeia integrada de modelos hidrológicos e hidráulicos, alimentados por dados de entrada, bem como rotinas automatizadas, assente na articulação da componente hidrológica e hidráulica, seguidamente apresentadas.

3.4.4.3.1 Modelação Hidrológica

A componente hidrológica baseia-se no modelo HEC-HMS, calibrado para funcionar de forma contínua com base no método SCS-CN modificado. O modelo permite simulações contínuas do ciclo hidrológico devido à receção dos dados de entrada: dados de precipitação observada (últimas 96 horas), previsões meteorológicas (72 horas) e dados históricos de descargas fluviais. A calibração foi efetuada para múltiplos eventos históricos de cheia, com ajustes nos parâmetros consoante as características da bacia do Minho, especialmente quanto à morfologia e hidrologia da mesma.

3.4.4.3.2 Modelação Hidráulica

O modelo Iber+ é o *software* responsável pela componente hidráulica, acionado sempre que os caudais previstos excederem os limiares de alerta. O processamento é executado em GPU, com suporte para simulações bidimensionais de escoamento em ambiente urbano. Este modelo permite gerar mapas de profundidade e velocidade do fluxo, com a integração de Modelos Digitais do Terreno, que constituem ferramentas essenciais para avaliação do risco e definição das áreas críticas de inundação.

3.4.4.3.3 Dados de Entrada

Para a sua execução, o sistema integra diferentes fontes de dados, nomeadamente: previsão meteorológica da MeteoGalicia, com resolução horária e espacial de 1 hora e 4km, respetivamente até 72 horas (3 dias); dados hidrométricos e pluviométricos de estações da CHMS (Confederación Hidrográfica del Miño-Sil, que incluem a precipitação observadas nas 96 horas anteriores (4 dias) e registos históricos do caudal; Modelos Digitais de Terreno (MDT) de alta resolução (5 metros), essenciais para a modelação hidráulica detalhada nas zonas críticas.

3.4.4.3.4 Automatização e Processamento

O sistema atua de forma automática, com recurso a rotinas *Python*, que são responsáveis pela recolha de dados, pré-processamento e execução das simulações realizadas diariamente. Estas simulações são desencadeadas após a disponibilização das novas previsões meteorológicas: processam as últimas 9 horas anteriores e executam previsões para as seguintes 72 horas. A frequência de cálculo é horária, com passo computacional adaptativo determinado pelo critério de Courant-Friedrichs-Lewy ($CFL = 0,45$), que permite simulações fluídas e realistas, com passos temporais reduzidos a minutos ou segundos, além da garantia de estabilidade numérica.

3.4.4.4 Níveis e Critérios de Alerta

O sistema define quatro níveis operacionais de alerta, cada um associado a diferentes limiares de caudal (mínimo e máximo), bem como ao impacto estimado. Os níveis de alerta e limiares de perigo estão representados na tabela 6.

1. Pré-ativação – define as condições médias do rio, sem risco significativo associado, com ativação do estado de vigilância;
2. Ativação – existência de algum risco em áreas acessíveis, mas não frequentadas habitualmente por pedestres;
3. Pré-alerta – possibilidade de ocorrência de perigo em áreas frequentadas por pedestres, com caudal próximo dos limiares críticos de inundação;
4. Alerta – corresponde a situações de risco elevado, em que as cheias provocam perigo em áreas para pedestres, com danos severos em infraestruturas e zonas urbanas.

Tabela 6 - Representação de níveis de alerta e limiares de perigo de inundação do rio Minho para a cidade de Ourense

Estado de alerta	Caudal mínimo (m ³ /s)	Caudal máximo (m ³ /s)
Pré-ativação	0	511
Ativação	511	1253
Pré-Alerta	1253	2000
Alerta	2000	-

3.4.4.5 Desempenho e Avaliação

Nesta secção são apresentados pontos importantes relativos à credibilidade do sistema de alerta, nomeadamente a precisão dos modelos apresentados, a sua validação e os casos de estudo, o tempo de resposta e a sua eficiência computacional, bem como as limitações que o sistema apresenta.

3.4.4.5.1 Precisão dos Modelos

A avaliação da qualidade dos modelos hidrológicos e hidráulicos integrados no MIDAS é efetuada com base em indicadores estatísticos amplamente utilizados em engenharia hidrológica. Os resultados obtidos indicam um elevado desempenho do modelo hidrológico, tal como revelam as métricas seguintes: NSE (*Nash-Sutcliffe Efficiency*) > 0,85, o que revela uma boa capacidade de replicação da variabilidade do

caudal observado; PBIAS (*Percent Bias*) < 10%, o que demonstra a ausência de enviesamento significativo; Coeficiente de correlação (R) > 0,90, o que evidencia uma forte associação linear entre os dados simulados e observados. Os valores em causa posicionam o sistema MIDAS numa classificação de desempenho «Muito Alta», de acordo com os critérios da literatura especializada.

Importa também referir a elevada fiabilidade do modelo hidráulico, que embora não seja avaliado com as mesmas métricas, foi validado com métricas espaciais, entre as áreas inundadas previstas e observadas.

3.4.4.5.2 Resultados do Caso de Estudo

A avaliação da fiabilidade do sistema incidiu na análise de uma série de eventos de cheias relevantes – 17 eventos – com ocorrência ao longo de 8 anos (entre 2012 e 2019). Dos eventos observados, o sistema detetou de forma correta 13 eventos, o que corresponde a 76%, com a emissão dos respetivos alertas de forma tempestiva. De forma contrária, o sistema registou 4 falsos negativos, isto é, o sistema não previu a ocorrência de cheia. Adicionalmente, foram registados 5 falsos positivos, que correspondem a alertas emitidos sem ocorrência de cheia associada.

3.4.4.5.3 Tempo de Resposta e Eficiência Computacional

A utilização de computação paralela em GPU (NVIDIA RTX 2080 Ti) revelou uma elevada eficiência computacional e de processamento por parte do sistema. Com a integração do modelo hidráulico, foi possível processar entre 3 a 5 minutos cada simulação hidráulica, o que permite a execução de múltiplos cenários em janelas temporais reduzidas.

O modelo hidrológico foi capaz de gerar previsões de caudal praticamente em tempo real devido ao reduzido passo computacional, concentrando maior esforço de cálculo no modelo hidráulico. Além disso, o sistema opera com passo temporal adaptativo, regulado pelo critério de *Courant-Friedrichs-Leny* (CFL = 0,45), o que garante simulações estáveis e representações consistentes da dinâmica do escoamento em minutos ou segundos.

3.4.4.5.4 Limitações

Embora o desempenho do sistema seja considerado robusto e fiável, o MIDAS apresenta algumas limitações que devem ser amplamente consideradas:

- Dependência da qualidade das previsões de precipitação - nomeadamente a dependência da fiabilidade do modelo WRF, que em casos de sobrestimação ou subestimação da precipitação, pode afetar diretamente os caudais simulados;

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

- Influência do rio Sil não modelada diretamente - o rio Sil, importante afluente do rio Minho é considerado apenas através de estimativas simplificadas, o que pode introduzir desvios nos resultados em determinadas sub-bacias;
- Falsos alertas – embora com pouca frequência, foram registados erros de previsão, tecnicamente chamados de falsos positivos e negativos, que devem ser minimizados com a melhoria dos dados de entrada e aumento da série histórica de calibração.

3.5 Comparação dos Sistemas de Alertas apresentados

Após a análise de cada um dos quatro sistemas de alerta, apresenta-se de seguida uma tabela comparativa dos mesmos sistemas (Tabela 7 – Comparação dos quatro Sistemas de Alerta de previsão de cheias e inundações).

Tabela 7 - Comparação dos quatro Sistemas de Alerta de previsão de cheias e inundações

Crítérios	FFAS	Ponte de Lima	MERLIN	MIDAS
Área de aplicação	Sub-bacia do Rio Águeda	Zona ribeirinha de Ponte de Lima - parte portuguesa do rio Lima (2370 km ²)	Demarcação hidrográfica Galicia-Costa	Bacia superior do Rio Minho (5000 km ²), abrangendo parte da região da Galiza
Entidade responsável	Universidade de Aveiro com a Câmara Municipal de Águeda	FEUP, em colaboração com a APA e CHMS	Xunta de Galicia e MeteoGalicia, com o apoio do projeto RAlA	UPM e IMIDRA, em parceria com a CHMS
Modelos utilizados	WRF, HEC-HMS, HEC-RAS 2D	WRF, HEC-HMS, Iber+	WRF, HEC-HMS, Iber+	HEC-HMS, Iber+
Fonte de dados	Dados GNSS, LiDAR, rede de sensores regionais	Dados de precipitação (SNIRH e MeteoGalicia), previsão WRF e dados hidrométricos (SNIRH)	MeteoGalicia, Augas de Galicia, SMAP, sensores regionais	Dados hidrométricos (CHMS), previsão meteorológica (MeteoGalicia), MDT
Frequência de atualização	A cada 6 horas	Execução automática diária com base em novas atualizações (Python)	Vários minutos até ao período de uma hora	Atualização horária com passo um computacional de minutos

Crítérios	FFAS	Ponte de Lima	MERLIN	MIDAS
Precisão das previsões	Alta – entre 80 a 90%	Muito elevada - resultados coincidentes com eventos reais	Entre 75 a 80% num horizonte de previsão até 24 horas	Muito alta: NSE> 0,85; PBIAS<10%; R>0,9
Horizonte de previsão	Até 72 horas	Até 96 horas	Até 96 horas	Até 24 horas
Falsos positivos / negativos	1 falso positivo, com registo de 1 sobre-estimativa	1 falso pré-alerta, 3 sobre-estimativas	Sem métricas explícitas	13 eventos detetados em 17. 5 falsos positivos, 4 negativos
Crítérios de ativação de alerta	Nível de perigosidade relacionado com a profundidade da água	3 limiares de alerta com base no caudal: pré-alerta, alerta e emergência	Caudais estimados superam determinados limiares das ARPSIS	Quatro níveis de severidade: pré-ativação, ativação, pré-alerta e alerta
Limitações	Superestimação do nível da água durante o recesso do fluxo	Período de validação curto (30 dias), sensível a erros de previsão da precipitação	Dependência da qualidade das previsões; calibração dos modelos	Sem modelação do Rio Sil; sistema dependente da qualidade da previsão
Forma de emissão de alerta	Web-GIS interativa	Envio automático de alertas e mapas de inundação para as entidades	Plataforma digital acessível a técnicos de proteção civil e autoridades	Alertas emitidos para as autoridades, acompanhados por mapas de risco
Cobertura de monitorização	560ha, cobertura limitada à cidade de Águeda	Rede de monitorização com estações hidrométricas e pluviométricas que cobrem toda a bacia e secções críticas	Zona regional / transfronteiriça, implementada em 4 bacias hidrográficas pertencentes à demarcação Galicia-Costa	Rede de monitorização hidrometeorológica para toda a bacia do Minho, com foco especial na zona de Ourense
Escalabilidade	Implantação de novos sensores, integração de dados de radar e técnicas de previsão	Replicável para outras zonas com barragens e com dados históricos compatíveis	Dependente de maior disponibilidade de recursos computacionais	Alta escalabilidade, concebido para ser aplicável em outras bacias.

4 REDE HIDROGRÁFICA DO RIO MONDEGO

Depois da revisão genérica e sistemática da literatura, importa contextualizar o caso de estudo. Ao longo deste capítulo, será apresentada a Rede Hidrográfica do Rio Mondego, bem como o âmbito territorial no qual se integra, o seu regime hidrológico, as intervenções hidráulicas ao longo do rio, nomeadamente o Açude-Ponte, Barragem da Aguieira, Barragem da Raiva, Barragem de Fronhas e o Baixo Mondego. Encontra-se também nesta secção, a referência ao histórico de cheias significativas em Coimbra, com a apresentação de três eventos específicos.

Embora se considere de forma singular, a rede hidrográfica do Rio Mondego integra a Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis – RH4, juntamente com as bacias hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis, bem como as bacias hidrográficas das ribeiras de costa incluindo as respetivas águas subterrâneas e águas costeiras adjacentes, conforme o Decreto-Lei nº347/2007, de 19 de outubro, alterado pelo Decreto-Lei nº117/2015, de 23 de junho (PGRH-RH4, 2015).

4.1 Âmbito territorial

De acordo com o Capítulo 3, alínea a) do Decreto Regulamentar nº9/2002 de 1 de março, a bacia hidrográfica do rio Mondego, a segunda maior bacia integralmente nacional, localiza-se na Região Centro de Portugal, inserida entre as bacias dos rios Vouga e Douro, a este e a norte, e entre as bacias dos rios Tejo e Lis, a sul.

A área da bacia hidrográfica do rio Mondego é de 6645 km², rio este que nasce na serra da Estrela a 1525 m de altitude e desagua no oceano Atlântico, junto à Figueira da Foz após percorrer 258 km, e tem como principais afluentes os rios Dão, Alva, Ceira e Arunca, conforme explícito no Decreto referido anteriormente.

O Decreto Regulamentar nº9/2002 de 1 de março, embora já desatualizado, indicou as diretrizes para o Plano de Gestão de Região Hidrográfica (PGRH), que como instrumento de planeamento das águas visa fornecer uma abordagem integrada para a gestão dos recursos hídricos, tornando coerente a informação para a ação e sistematizando os recursos necessários para cumprir os objetivos definidos, de acordo com a Resolução do Conselho de Ministros nº52/2016, Anexo IV (2016). Dessa forma, esta rede enquadra-se na Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis, com uma área total de 12 144 km², que integra estas três bacias hidrográficas.

Ainda assim, o foco da dissertação é apenas o Rio Mondego e seus derivados, especialmente no contexto da cidade de Coimbra, que será alvo de estudo e análise.

A figura 11 representa a localização da bacia hidrográfica do Rio Mondego à esquerda e principais afluentes do mesmo, à direita.

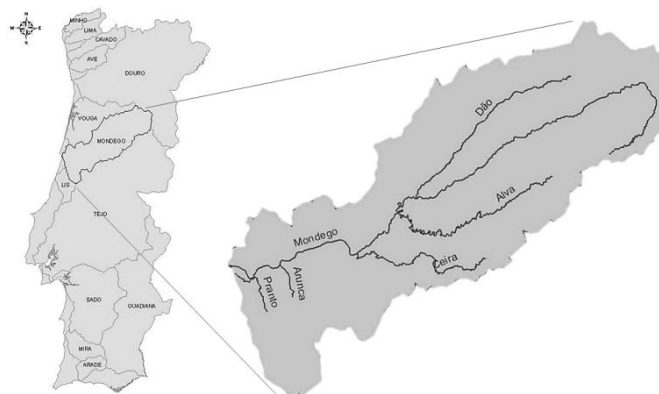


Figura 11 - Localização da bacia hidrográfica do rio Mondego (à esquerda) e principais afluentes do rio Mondego (direita) (Mendes, 2017)

4.2 Regime hidrológico

Embora a regularização do rio Mondego não estar definitivamente completa, considera-se que dada a laminação dos caudais pela principal obra de regularização a montante de Coimbra (barragem de Aguieira), se pode denominar o regime hidrológico do Mondego a partir desta data como um “regime regularizado”, designação esta que será aplicada sempre que analisarmos valores de caudal ou acontecimentos a partir de 1980/81 (Paiva, 2019). De acordo com o mesmo autor, o estudo do regime hidrológico do Mondego, particularmente em situação hidrológica extrema, teve por base dados hidrométricos registados na estação hidrométrica da Ponte de Santa Clara, em Coimbra, até 1986 e do Açude-Ponte a partir dessa mesma data, tendo estes últimos dados sido cedidos pelo Núcleo de Apoio do Centro (NAC) do Instituto da Água.

No trajeto do Mondego, a cidade de Coimbra marca claramente o fim do percurso intermédio do rio e deste modo, os caudais que afluem a este ponto compreendem já o tributo dos principais afluentes do Mondego: o rio Dão, na margem direita, e os rios Alva e Ceira, na margem esquerda, pelo que os caudais aqui medidos podem ser considerados representativos e caraterísticos do regime hidrológico do Mondego (Paiva, 2019). Este autor refere que na caraterização de um curso de água, especialmente em situações de cheia, os caudais afluentes às estações hidrométricas a montante das áreas afetadas devem ser alvo de particular interesse. No entanto, em bacias relativamente grandes, o conhecimento do curso de água principal ao longo da sua bacia parece importante de modo a compreender o tipo e a intensidade das influências de algumas caraterísticas da bacia hidrográfica no comportamento do curso de água (Paiva, 2019).

Proença Cunha (2002) classifica o regime hidrológico da bacia hidrográfica do Mondego como muito irregular, com registo de caudais não suficientes para uma desejável estimativa dos caudais de cheia para períodos de retorno superiores a 100

anos. O mesmo autor refere que por precaução se devem também ter em conta no planeamento as possibilidades de mau funcionamento, ou mesmo falha, do atual sistema de controlo de cheias. Este conclui, com a nota de que em caso extremo, existe sempre o risco de rutura das albufeiras (como por exemplo a da Aguieira), que também devia ser considerado em termos de previdente ordenamento das ocupações antrópicas.

4.3 Intervenção hidráulica no rio Mondego

A principal causa de ocorrência de cheias trata-se da incidência de precipitações intensas, associada à dimensão da bacia hidrográfica, que governam as suas características e que, no rio Mondego, as fazem de forma relativamente rápida, com tempos entre o início de cheia e o pico do caudal na ordem de poucas horas, o que pode ser particularmente perigoso devido ao aumento brusco do nível de escoamento (Cardielos, 2015). Em 1962, a Direção Geral dos Serviços Hidráulicos apresentou o Plano Geral do Aproveitamento Hidráulico da Bacia do Rio Mondego, plano este que preconizava a regularização de cheias a jusante, no Baixo Mondego, através da construção de albufeiras com várias finalidades: Barragem da Aguieira-Raiva e Açude-Ponte no rio Mondego, e Fronhas, no rio Alva (Terêncio, 2017). Segundo este autor, a primeira fase do plano iniciou-se em 1974, tendo sido terminada em 1986.

O Aproveitamento Hidráulico da Bacia do Mondego tem uma importância central no desenvolvimento e segurança das populações do Baixo Mondego, que contribui para a estabilização do regime hidrológico do rio Mondego (PGRH-RH4, 3º Ciclo, 2022). De acordo com Terêncio (2017), o aproveitamento integrado dos recursos hídricos da bacia prevê: produção de energia; regularização fluvial; correção torrencial; controlo e defesa contra cheias; abastecimento de água a populações e indústria; reorganização da rede viária regional; valorização das componentes ambientais, piscícola, recreativas e apoio ao turismo; e desenvolvimento agrícola através da rega.

Na figura 12 está representada uma planta geral do aproveitamento hidráulico da bacia do Mondego.

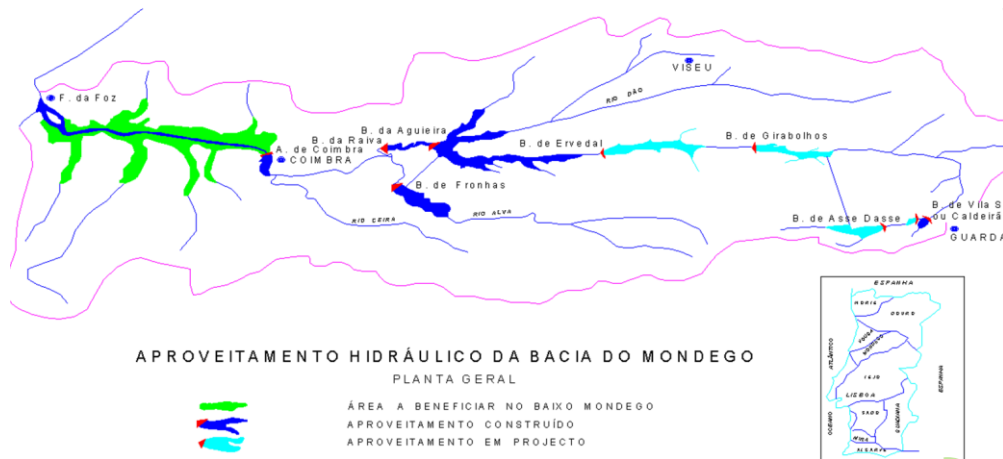


Figura 12 - Planta Geral do Aproveitamento Hidráulico da Bacia do Mondego (Proença, 2020)

4.3.1 Intervenções - Sistema regulado Agueira - Raiva – Fronhas

A criação das albufeiras da Agueira (rio Mondego) e de Fronhas (rio Alva), que entraram em funcionamento em 1981, tiveram como objetivo primordial a regularização dos caudais do rio Mondego e dos seus afluentes (rios Dão e Alva), tal como explicam Nunes e Pardal (2021). A construção das barragens da Agueira-Raiva e Açude-Ponte, no Mondego e da barragem das Fronhas, no Alva, possibilitou um amortecimento dos caudais de ponta de cheia e constituiu um marco histórico no processo de regularização da bacia do Mondego pela diminuição das cheias e quase eliminação das inundações na parte terminal da bacia (Paiva, 2011). Na figura 13, estão representadas as barragens do Plano Geral de Aproveitamento Hidráulico da Bacia do Mondego.



Figura 13 - Barragens do Plano Geral de Aproveitamento Hidráulico da Bacia do Mondego (PGRH-RH4, 3º Ciclo, 2022)

4.3.1.1 Barragem da Aguieira

Localizada aproximadamente a 2 km a jusante da foz do rio Dão e a 35 km a montante da cidade de Coimbra, a albufeira da barragem da Aguieira situada em Mortágua, tem uma capacidade total de armazenamento de 450 hm³ e inunda uma área de aproximadamente 2000 ha a montante da sua barragem (Mendes, 2017). O aproveitamento da Aguieira como albufeira permite regularizar as afluências para fins de controlo de cheias, mas também para produção de energia e utilização para rega (Nunes e Pardal, 2021).

De acordo com a descrição apresentada pelo PGRH-RH4, 3º Ciclo, Parte 2 – Volume A – Anexo II (2022), a albufeira da Aguieira é uma massa superficial com uma área de 17 km², cujo plano de água abrange o rio Mondego, e que se encontra associada ao aproveitamento hidroelétrico da Aguieira. Este aproveitamento inclui os escalões da Aguieira e da Raiva, e complementa-se com a barragem de Fronhas, que deriva caudais para a albufeira da Aguieira. Seguindo a linha informativa do PGRH-RH4, o aproveitamento da Aguieira entrou em exploração em 1981 e é constituído por uma barragem, do tipo abóbadas múltiplas com 89 m de altura, um circuito hidráulico, uma central tipo pé de barragem, um edifício de comando e uma subestação. Este Plano refere que o aproveitamento hidráulico tem como objetivo o controlo de cheias, produção de energia, abastecimento de água para as populações e o fornecimento de água para rega e lazer.

4.3.1.2 Barragem da Raiva

Situada no concelho de Penacova, distrito de Coimbra, a barragem da Raiva iniciou a sua atividade no ano de 1981, sob a alçada de exploração da EDP (Vale, 2020). Estruturalmente construída em betão, esta funciona como uma barragem de gravidade, tendo a albufeira como principal função a produção de energia hidroelétrica, segundo o mesmo autor. Este também refere que esta infraestrutura é constituída por dois descarregadores de cheia sobre a barragem, um único descarregador de fundo que atravessa o empreendimento e por duas turbinas. Tem como cota do NME (Nível Mínimo de Exploração) da albufeira 55,9 m, NPA (Nível de Pleno Armazenamento) nos 61,5 m e a cota de NMC (Nível Máximo de Cheia) igualmente nos 61,5 m (Vale, 2020). Esta barragem foi construída para permitir o funcionamento reversível da central hidroelétrica da Aguieira e para modular os caudais afluentes dessa albufeira (Mendes, 2017). De acordo com o mesmo autor, a exploração da albufeira da Raiva está ligada intimamente às condições de exploração da barragem da Aguieira, mas é também condicionada pelas necessidades de lançamento de caudais para rega dos campos agrícolas do Baixo Mondego. Trata-se de uma barragem sem intervenção relevante no controlo de cheias, devido à sua baixa capacidade de armazenamento (26.80 hm³, ao Nível de Pleno Armazenamento) (Sá Marques *et al.*, 2005).

4.3.1.3 Barragem de Fronhas

Destina-se ao controlo de cheias do rio Alva e ao desvio, através do túnel, de aflúências para a albufeira da Aguieira, o que reforça a produtividade da central, que possui um descarregador de cheia da barragem com uma capacidade de 500 m³/s (Nunes e Pardal, 2021). Situada na freguesia de Pombeiro da Beira, no concelho de Arganil, distrito de Coimbra, esta infraestrutura hidráulica iniciou atividade no ano de 1985, sob exploração da EDP (Vale, 2020). Construída em betão, a barragem de Fronhas é uma barragem em arco que tem como principais objetivos o controlo de cheias e a produção de energia hidroelétrica, embora de forma indireta, uma vez que não possui central hidroelétrica (Vale, 2020). Assume uma disposição do tipo arco de dupla curvatura, com uma altura de 62 m acima da fundação e o coroamento, localizado à cota 140,0 m, com um desenvolvimento de 250 m (Mendes, 2017). A água é derivada para a albufeira da Aguieira, uma vez que esta possui um túnel que possibilita o transporte de água desde a sua albufeira até à Aguieira, incrementando o potencial hidroelétrico do complexo (Vale, 2020).

4.3.1.4 Açude-Ponte de Coimbra

O açude-ponte, com início de exploração em 1981, localiza-se a jusante da cidade de Coimbra e recebe água proveniente da barragem da Raiva, devendo o caudal descarregado por esta última ser suficiente para satisfazer todas as necessidades a jusante (cerca de 80 m³/s), designadamente para a rega dos campos agrícolas do Baixo-Mondego, para a atividade industrial e setor doméstico e público (Mendes, 2017). A sua construção, segundo o mesmo autor, foi concebida para evitar que o nível da albufeira ultrapassasse a cota 18,8 m para caudais inferiores a 1200 m³/s, fixada a cota de 18,0 m para o nível de exploração normal, em resultado de um compromisso entre o nível exigido pelos canais de rega e o nível que permitisse condições adequadas de drenagem da zona baixa de Coimbra. Os descarregadores de cheia da Ponte-Açude foram dimensionados para um caudal de cheia de 2000 m³/s, idêntico ao caudal máximo de projeto da barragem da albufeira da Aguieira e da Raiva (Mendes, 2017).

De acordo com Lencastre (2018), o açude-ponte tem como objetivos principais: permitir a derivação do caudal para a rega superficial, por gravidade; e armazenar cerca de 0,6 x 10⁶m³ de água que permita uma autonomia de 7 horas para rega. O mesmo autor, como objetivos secundários refere: a criação de um lago artificial em Coimbra, com melhoria de condições climáticas e paisagísticas; servir de base a uma ponte rodoviária para um tráfego diário de cerca de 10 000 veículos por dia, a um passeio de peões, a condutas de água, de esgoto e a cabos elétricos.

As restrições impostas ao açude resultam fundamentalmente da segurança indispensável na cidade de Coimbra e da garantia da passagem do caudal sólido para jusante, devendo ser assegurada a passagem de peixes nos períodos de fecho das

comportas (Lencastre, 2018). A manobra das comportas é efetuada de forma automática por níveis, com recurso a um gerador local de energia, com uma duplicação de todos os circuitos e aparelhos, com comando à distância e comando local com acionamento manual, segundo explica o mesmo autor.

4.3.1.5 Regularização do Baixo Mondego

Concluiu-se que o abandono dos leitos secundários e a concentração dos caudais que chegam a Coimbra num único leito regularizado seria o mais vantajoso, o que assegura uma maior estabilidade do leito e a redução da construção de diques e a sua conservação (Lencastre, 2018). Segundo o mesmo autor, regularizou-se todo o leito aberto no Séc. XVIII e foram criados dois Leitos Periféricos, Esquerdo e Direito, que recebem os afluentes da margem, ainda que, devido a razões de transporte sólido, o leito central fosse encostado à margem esquerda do Campo para que este recolhesse as águas do Ega e do Arunca. O Leito Central garante o escoamento dos caudais líquidos e dos caudais sólidos afluentes a Coimbra, das bacias dos afluentes laterais a jusante de Coimbra, ao longo de uma extensão total de 36 km. Na sua composição, o Leito tem uma secção transversal composta por dois leitos: um menor, de fundo móvel e margens fixas, e um maior, de fundo e margens fixas (Lencastre, 2018).

4.4 Historial de inundações em Coimbra

Para Paiva (2011), as cheias e inundações do Rio Mondego e a consequente inundação da sua planície aluvial a jusante de Coimbra constituem um facto incontornável na história hidrológica deste rio e no modo de vida das populações ribeirinhas adjacentes. De acordo com o mesmo autor, que cita Sanches (1996), as consequências devastadoras destes fenómenos hidrológicos extremos nos Campos do Mondego eram de tal ordem, que tanto os estudos como a possibilidade de resolução do problema já datam da Idade Média, numa altura em que surgem os primeiros registos relativos ao assunto e as respetivas medidas de controlo ou minimização dos seus efeitos negativos.

Na bacia hidrográfica do Mondego, explicam Lourenço e Nunes (2022), à semelhança de outras bacias do território nacional, as cheias e as inundações são seculares e embora com obras de regularização realizadas, estas continuam a ocorrer, provocando avultados prejuízos. Paiva (2019) explica que antes de 1979/80 as inundações tratavam-se de uma realidade frequente na cidade de Coimbra e refere que estas se reduziram drasticamente a partir de 1980/81, como resultado da entrada em funcionamento de uma parte substancial do Plano Geral do Aproveitamento Hidráulico do Mondego.

4.4.1 Inundações significativas

Em seguida, serão evidenciadas três inundações históricas de elevada relevância: uma antes da regularização (1948) e duas após a regularização (2001 e 2016). De forma a uniformizar a informação, as cheias apresentadas nesta secção caracterizam-se todas da seguinte forma: descrição geral, contexto meteorológico (i), causas principais (ii) e consequências locais (iii).

4.4.1.1 Janeiro de 1948

Segundo Marques e Pina (2013), a inundação natural de 29 de janeiro de 1948 trata-se da maior cheia de que há registos, com um caudal máximo de 4200 m³/s. Embora mais excepcional, esta cheia teve consequências menos nocivas que a cheia de 2001 por ainda existir na época uma “cultura de risco de cheias”, que se perdeu após a regularização (Louro e Lourenço, 2005):

- i. **Contexto meteorológico** – provocada pela sequência de meses chuvosos ou muito chuvosos e com caudais muito abundantes, entre o outono e o inverno (Louro e Lourenço, 2005);
- ii. **Causas** – a sequência de precipitação intensa e constante tratou-se da condição principal para a ocorrência de caudal de cheia e forte inundação, de acordo com Louro e Lourenço (2005) que cita Louro, S. (2004);
- iii. **Consequências** – destruição total ou parcial da cidade: habitações, diques, estradas, infraestruturas, com paralisação parcial e isolamento da cidade, sem transporte públicos, sem energia elétrica e comunicações telefónicas (Pardal *et al.*, 2022).

Na figura 14 está representada uma imagem da cheia de 1948, em que é possível denotar as margens alagadas na zona da portagem.



Figura 14 - Cheia de 1948 em Coimbra (Marques & Pina, 2013)

4.4.1.2 Janeiro de 2001

Proença Cunha (2002) afirma que as cheias de 26 e 27 de janeiro atingiram um caudal em Coimbra no limiar de colapso das obras hidráulicas do Baixo Mondego, correspondente a um caudal de 2000 m³/s, o que corresponde a um período de retorno de mil anos (Lencastre, 2018). Conforme explica o mesmo autor, sem regularização pelas Barragens da Aguieira e Fronhas, esta cheia teria atingido 2800 m³/s, com um período de retorno ligeiramente inferior a 25 anos; porém, à data do acontecimento, com regularização no Mondego já existente e com uma gestão adequada, esta deveria originar em Coimbra uma cheia amortecida, com um caudal inferior a 1200 m³/s:

- i. **Contexto meteorológico** - A pluviosidade contínua ocorreu nos inícios de novembro de 2000 e contribuiu diretamente para a saturação dos solos, subida dos níveis freáticos da bacia hidrográfica e o desenvolvimento de pontas de cheias a jusante (Proença Cunha, 2002);
- ii. **Causas** – segundo Lencastre (2018), a causa teve origem numa gestão inadequada das cheias, da manutenção dos diques e da sua reparação de emergência;
- iii. **Consequências** – submersão de uma parte significativa das margens do Mondego, rutura e galgamentos de vários diques a jusante devido ao caudal elevado, danos em infraestruturas rodoviárias e depósito de sedimentos (Proença Cunha, 2002).

A figura 15 é alusiva à cheia de 2001, na zona do Parque da Canção.



Figura 15 - Cheia de 2001 a atingir o Parque da Canção em Coimbra (Temido, 2011)

4.4.1.3 Janeiro de 2016

Sá Marques *et al.*, (2016) refere que entre 9 e 11 de janeiro ocorreram inundações nas margens do Mondego com um valor máximo que afluíu à albufeira da Aguieira de 1777 m³/s. Análises efetuadas por equipas da Universidade de Coimbra e Universidade do Minho concluíram que com a aplicação das regras de operação da

barragem da Agueira, teria sido possível limitar a descarga da Agueira a 450 m³/s, valor bastante inferior ao que se verificou, assim explica Sá Marques *et al.*, (2022):

- i. **Contexto meteorológico** – a queda da chuva, de acordo com a APA para a Rádio Renascença, foi superior às previsões e levou a um incremento dos caudais debitados (Renascença, 2016);
- ii. **Causas** – a operação de descargas não seguiu o protocolo definido, o que não permitiu a redução dos caudais máximos e os níveis de água e consequente mitigação da inundação. Os impactos foram agravados pelo assoreamento do leito junto à cidade de Coimbra e deficiente manutenção das infraestruturas e limpezas das margens (Sá Marques *et al.*, (2022);
- iii. **Consequências** – prejuízos significativos no património da cidade. Foram também provocados danos a jusante dos descarregadores de cheias, existentes no leito central do Mondego, com erosão das estruturas de apoio, degradação do caminho paralelo e consequente inundação dos campos a montante, decorrente da falta de regularização dos caudais afluentes (Pardal *et al.*, 2022).

Na figura 16 é possível ver o Convento de Santa Clara a Velha inundado.



Figura 16 - Convento de Santa Clara a Velha inundado (Miranda, 2016)

5 KEY PERFORMANCE INDICATORS (KPI)

Neste capítulo, em complemento à apresentação do conceito de KPI, suas características e enquadramento para o tema do presente documento, serão evidenciados os KPI's identificados na revisão da literatura, enquadrados em quatro dimensões: ambiental, económica, social e tecnológica. Os indicadores de desempenho (KPI) foram extraídos maioritariamente de artigos científicos que caracterizam estratégias, instrumentos de previsão e sistemas de alerta a nível global. Essa revisão do estado da arte permitiu agrupar conceitos e “conceber” os KPI's.

Os KPI's representam um conjunto de medidas centradas nos aspetos de desempenho mais críticos para o sucesso atual e futuro da organização (Parmenter, 2010). São medidas utilizadas para determinar o sucesso e acompanhar a evolução no cumprimento dos objetivos estratégicos definidos pela organização (Costa, 2018). O mesmo autor, que cita Kerzner (2011), desmonta o conceito literal da palavra KPI (*Key Performance Indicator*), da seguinte forma:

- *Key* - trata-se do principal contribuidor para o sucesso ou fracasso do projeto;
- *Performance* - pode ser medida, quantificada, ajustada e controlada;
- *Indicator* - representação do desempenho presente e futuro.

George T. Doran, em 1981, propôs no seu artigo “*There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives*” o acrónimo S.M.A.R.T. com vista a conceber uma ferramenta capaz de ajudar na formulação de objetivos mais eficazes. Segundo Doran (1981), cada KPI corporativo, departamental e seccional deve ser:

- a. *Specific* (Específico) - define uma área específica a ser melhorada;
- b. *Measurable* (Mensurável) – quantifica um indicador de progresso;
- c. *Assignable* (Atribuível) – especifica quem o executa;
- d. *Realistic* (Realista) – indica que resultados podem ser alcançados de forma realista, tendo em conta os recursos disponíveis;
- e. *Time-related* (Relacionado com o tempo) – define um horizonte temporal em que se define quando é que os resultados devem ser alcançados.

5.1 KPI's Identificados na Revisão da Literatura

Após a revisão da literatura, com a caracterização e comparação de quatro sistemas de alerta de previsão de cheias e inundações entre Portugal e Espanha, bem como outros sistemas presentes noutros países, foram identificados KPI's, divididos em quatro dimensões: ambiental, económica, social e tecnológica. Estes KPI's foram extraídos a partir de informação fidedigna: embora nem sempre estivessem explicitamente nomeados de forma literal, conforme serão apresentados

posteriormente, deduziu-se que seria essa a pretensão dos autores relativamente à conceção desses mesmos conceitos. Juntamente com a referência a cada KPI, será também descrito e caracterizado cada um dos KPI relativamente à:

1. Definição do KPI;
2. Importância do KPI no contexto de sistema de alerta;
3. Aplicabilidade do KPI num sistema de alerta na medida em que se considera um indicador.

Esta análise é deveras importante para avançar com os dezasseis KPI's identificados para o Método *Delphi* e posterior validação dos mesmos.

Existem quatro KPI's que foram encontrados de forma semelhante em vários trabalhos, especificamente naqueles que dispõem de vários autores relativamente à sua caracterização (definição, importância e aplicabilidade), entre os quais de destacam: «Precisão das Previsões Meteorológicas e Hidrológicas», «Historial de Cheias», «Falsos Positivos/Negativos», «Confiabilidade nos Modelos Hidrológicos e Hidráulicos». Os restantes doze KPI's, que não apresentam vários autores nos pontos referidos anteriormente, foram extraídos de uma obra (artigo científico) na sua totalidade, que se encontra devidamente identificada.

5.1.1 KPI's Ambientais

Os indicadores ambientais, após a revisão da literatura, estão diretamente associados aos impactos ambientais, bem como à capacidade do sistema de alerta em prever ou mitigar danos relacionados com o ambiente.

Para esta dimensão, foram considerados os seguintes KPI's identificados: «Precisão das Previsões Meteorológicas e Hidrológicas», «Extensão da Cobertura de Monitorização», «Áreas Inundadas Previstas e Reais» e «Historial de cheias».

Estes indicadores serão caracterizados ao longo desta secção conforme referido anteriormente: definição (1), importância (2) e aplicabilidade (3).

5.1.1.1 Precisão das Previsões Meteorológicas e Hidrológicas

O indicador «Precisão das Previsões Meteorológicas e Hidrológicas», presente em várias obras, é caracterizado da seguinte forma de acordo com os seus parâmetros:

1. Permite, com sistemas de elevada precisão, prever a ocorrência de cheias bem como as suas condições de escoamento e características (Ferreira, 2016);
2. A precisão das previsões dos caudais superficiais e subterrâneos, associadas a incertezas, influencia a eficiência do planeamento e gestão dos recursos hídricos, e revela-se crucial devido às mudanças climáticas e atividades humanas que afetam os processos hidrológicos (Mostaghimzadeh, 2021);

3. Maia *et al.*, (2020) refere que com previsões de precipitação relativamente precisas, conforme os testes de fiabilidade realizados, a probabilidade dos alertas emitidos pelo sistema serem corretos e adequados é bastante elevada.

5.1.1.2 Extensão da Cobertura de Monitorização

Tien *et al.*, (2023) aborda no artigo “*Locating real-time water level sensors in coastal communities to assess flood risk by optimizing across multiple objectives*”, o desenvolvimento de um método de otimização multiobjetivo para definir a localização ideal para a instalação de sensores medidores do nível da água, com vista à monitorização e mitigação do risco de inundações em comunidades costeiras, caracterizando este indicador da seguinte forma:

1. A expansão de uma rede de sensores permite aumentar a área monitorizada e consequentemente diminuir a incerteza nas informações sobre toda a área, baseada nas informações limitadas dos sensores;
2. O aumento da cobertura da rede com novos sensores traduz-se na monitorização de uma área mais ampla durante eventos de inundação e na avaliação de uma área maior, relativamente aos impactos provocados pelas inundações;
3. A cobertura da rede mede-se pelo número total de locais viáveis para os quais a inundação pode ser mapeada dentro de um limite de erro de 20%, com a adição de um sensor num determinado local, o que permite dessa forma maximizar o aumento da cobertura da rede.

5.1.1.3 Áreas Inundadas Previstas e Reais

Wing *et al.*, (2020) aborda a precisão dos mapas de inundação previstos por modelos, ao comparar áreas alagadas por simulação e áreas reais observadas nos Estados Unidos da América, no artigo “*Toward Global Stochastic River Flood Modeling*”, e define assim os seguintes campos:

1. Um mapa de inundação permite, para cada evento, analisar o perfil de risco de uma amostra de um inventário de edifícios ao aplicar os modelos baseados na observação e na simulação, com posterior comparação da sua semelhança no contexto da incerteza e da estimativa de vulnerabilidade;
2. A falta de consideração da dependência espacial nos cálculos de risco provoca frequentemente uma estimativa incorreta dos perfis de risco em grandes áreas (curva probabilidade-perda), quando estes são quantificados com base nesses dados. Embora os mapas de inundação com probabilidade espacial constante possam ser utilizados para estimar as perdas médias anuais, com a integração da área sob a curva probabilidade-perda, estes mapas não permitem conhecer as perdas correntes em anos mais extremos;

3. As relações entre a probabilidade de ocorrência de eventos de inundação e a extensão espacial, observadas após medições no campo, refletem a boa réplica dada pelos métodos baseados nos modelos. A variação do período de retorno e a extensão dos eventos de cheia relacionados com a distância e a gravidade do evento revelou-se semelhante entre as fontes dos dados de entrada, relativamente ao caso de estudo presente no artigo.

5.1.1.4 Historial de Cheias

O indicador «Historial de cheias» foi identificado em duas obras: Gonzalez-Cao *et al.*, (2025) aponta para a sua definição e importância, e Caetano (2025) a sua aplicabilidade, conforme se verifica seguidamente:

1. A perspetiva histórica trata-se de uma ferramenta fundamental capaz de prever cenários futuros, essencial para refinar os cálculos do período de retorno das inundações (Gonzalez-Cao *et al.*, 2025);
2. Gonzalez-Cao *et al.*, (2025) refere que o estudo de eventos históricos ajuda a aprimorar e reforçar as medidas de proteção, o que garante uma melhor preparação, mesmo em situações de cheias comparáveis aos eventos mais catastróficos já registados;
3. As inundações na cidade de Coimbra e no espaço a jusante, resultantes das cheias do Mondego, constituíam um problema histórico que perturbava o normal funcionamento da dinâmica social e urbana de ambas as margens do Mondego em Coimbra, que eram conseqüentemente sinónimo de destruição para as populações ribeirinhas (Caetano, 2025);

5.1.2 KPI's Económicos

Após a revisão da literatura, inferiu-se que os indicadores económicos pretendem avaliar o impacto financeiro relativamente aos sistemas de alerta, tanto ao nível de custos de operação bem como os benefícios económicos gerados.

Para esta dimensão, foram considerados os seguintes KPI's identificados: «Redução de Perdas Materiais», «Custo Total do Sistema» e «Impacto Económico das Inundações Evitadas».

Estes indicadores seguem a mesma lógica de caracterização, conforme referido anteriormente: definição (1), importância (2) e aplicabilidade (3).

5.1.2.1 Redução de Perdas Materiais

Hammood *et al.*, (2021) no seu artigo “*A Systematic Review on Flood Early Warning and Response System (FEWRS): A Deep Review and Analysis*”, analisa modelos e fatores de sucesso na utilização de sistemas de alerta de resposta precoce a inundações, com

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

vista a mitigar as perdas humanas e materiais aquando da ocorrência destes fenómenos:

1. O desastre natural desencadeado pelas cheias provoca perdas económicas, danos materiais e mortes. Dessa forma, neste contexto, o FEWRS trata-se de uma aplicação dos sistemas de informação que fornecem às autoridades locais, gestoras de desastres e serviços de emergência, as informações necessárias para minimizar a perda de vidas e propriedades;
2. A fase pré-desastre permite ao sistema incluir cenários globais de fenómenos de inundações de forma eficaz, bem como a disponibilização em tempo real da informação relacionada com a mitigação e prevenção de inundações. O FEWRS assegura que todas as partes interessadas recebem a informação correta, bem como as orientações e ações essenciais para a resposta, com o intuito de reduzir a perda de vidas e bens durante um fenómeno de inundação;
3. A implementação de um sistema de alerta de resposta a inundações traduz-se numa abordagem que tem como objetivo minimizar e reduzir os riscos provocados por fenómenos de inundação, uma vez que este tipo de sistemas tem a capacidade de fornecer informação e oferecer respostas imediatas.

5.1.2.2 Custo Total do Sistema

Adesina *et al.*, (2025) no artigo “*A survey of flood warning sensor network operational and maintenance practices across the United States*” apresenta um levantamento de informações efetuadas com recurso a entrevistas a 18 agências governamentais, em relação às práticas operacionais e manutenção de redes de sensores para alerta de inundações nos Estados Unidos da América:

1. As entidades locais devem desenvolver uma estratégia operacional que abranja a instalação, aplicação dos sensores, operacionalização e manutenção do sistema durante o período de vida útil atribuído ao equipamento. As redes de sensores de inundações requerem manutenções de rotina, além dos custos iniciais de instalação, caso contrário estas começam a fornecer dados erróneos e inconsistentes ou param o reporte de dados por completo;
2. A manutenção de um sistema merece particular atenção devido ao impacto direto na confiabilidade e sustentabilidade do mesmo. As operações de manutenção abrangem um espectro de parâmetros essenciais, que incluem os funcionários envolvidos, a frequência de atividades de manutenção, a área geográfica que abrange e os custos anuais de manutenção associados;
3. Os dados recolhidos nas entrevistas indicam que a manutenção dos sensores era realizada por funcionários das agências ou consultores/empresas contratadas. Os custos operacionais anuais variaram entre os 55.000 e 1.5 milhão de dólares (USD), e os custos anuais de manutenção oscilaram entre os 25.000 e os 602.000 dólares (USD).

5.1.2.3 Impacto Económico das Inundações Evitadas

Pappenberger *et al.*, (2015) descreve no artigo “*The monetary benefit of early flood warnings in Europe*” um estudo que estima os benefícios monetários de um sistema probabilístico de alerta de inundações a uma escala continental – EFAS:

1. Os danos provocados por inundações podem ser evitados através de alertas precoces, o que permite a adoção de medidas de mitigação por parte dos destinatários dos alertas. Para os autores, o dano potencial máximo causado pela inundação (L_p) relaciona-se com o dano real L_a , da seguinte forma:

$$L_a(t) = n(t) * L_p \quad (14)$$

Onde $n(t)$ é o fator de redução de danos evitados devido ao alerta precoce;

2. Os resultados do estudo apresentam evidências claras de que existe provavelmente um benefício monetário substancial neste sistema de alerta de previsão de cheias;
3. A incerteza nas estimativas dos potenciais danos foi verificada através de uma análise de sensibilidade detalhada ao fator de danos evitados, ao desempenho das previsões, ao impacto dos fatores de desconto e à incerteza dos conjuntos de dados sobre os danos. Assim, o cenário base nesta análise, considerado conservador, demonstra que em cada um euro investido, é criado um retorno de 159 euros após 20 anos de funcionamento do EFAS.

5.1.3 KPI's Sociais

Entende-se como um KPI de dimensão social um indicador que tenha a capacidade de medição do impacto do sistema de alerta na proteção e bem-estar das populações.

Na dimensão social, enquadram-se os seguintes KPI's: «Confabilidade do Sistema entre os Utilizadores», «Índice de Compreensão dos Alertas», «Acessibilidade às Informações Hidrológicas» e «Taxa de Coordenação Interinstitucional».

Estes indicadores seguem a mesma lógica de caracterização, conforme referido anteriormente: definição (1), importância (2) e aplicabilidade (3).

5.1.3.1 Confabilidade do Sistema entre os Utilizadores

Zhong *et al.*, (2021) apresenta indiretamente este KPI, após um estudo de investigação sobre a perceção das inundações e a resposta a alertas de inundações em três tipos de comunidades, e que está exposto no artigo “*Risk Perception, Risk Communication, and Mitigation Actions of Flash Floods: Results from a Survey in Three Types of Communities*”:

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

1. A confiança nos alertas de risco e nas fontes que emitem os avisos traduz-se numa componente importante relativamente à forma como as pessoas interpretam e utilizam a informação quanto aos riscos, visto que as pessoas tendem a ignorar avisos precoces caso não confiem no alerta em si;
2. Os resultados obtidos indicam maior propensão na adoção de medidas de resposta aos avisos em pessoas que confiam nos alertas, registando-se um número mais elevado de ações de proteção nos inquiridos que percecionaram uma alta possibilidade de ocorrência de cheias nas 24 horas seguintes;
3. O estudo mostrou que os moradores de comunidades urbanas e suburbanas tem maior tendência a confiar no alerta de cheias repentinas do que propriamente na precisão do mesmo.

5.1.3.2 Índice de Compreensão dos Alertas

Diakakis *et al.*, (2022) no artigo “*Public Perceptions of Flood and Extreme Weather Early Warnings in Greece*” examina a capacidade de perceção e compreensão das pessoas relativamente aos alertas de inundação e clima extremo na Grécia:

1. A compreensão das perceções e opiniões das pessoas relativamente aos processos e métodos de alerta traduz-se numa componente essencial para o sucesso de qualquer sistema de alerta precoce para cheias e fenómenos meteorológicos extremos;
2. A perceção pública tem o potencial de impactar a eficácia real dos sistemas de alerta, o que conduz a certas implicações práticas para a sua melhoria, especialmente em áreas suscetíveis a vários riscos e sensíveis às mudanças climáticas;
3. Torna-se imperativo adotar medidas e iniciativas para aumentar a compreensão e perceção do risco por parte do público em geral relativamente às cheias, sobretudo em ambientes com multirrisco. As campanhas de consciencialização que realcem o risco de cheias e os seus potenciais impactos podem ser benéficas para o sistema, complementam os autores.

5.1.3.3 Acessibilidade às Informações Hidrológicas

Nigussie *et al.*, (2025) no artigo “*Does a Citizen Science Approach Enhance the Effectiveness of Flood Early Warning Systems? Evidence from the Akaki Catchment, Ethiopia*”, aborda a integração das populações no que diz respeito à acessibilidade, inclusão e confiança da comunidade na receção dos alertas de cheias:

1. As dinâmicas entre as comunidades em risco e as partes interessadas tem levantado preocupações quanto à acessibilidade de informações de alerta provenientes dos EWS (*Early Warning System*) de forma fiável. Essa conjuntura levou à integração de uma “ciência cidadã”, que tem como finalidade

promover a inclusão, as perspectivas locais e distribuir equitativamente o conhecimento especializado referente aos alertas. Esta abordagem teve por base a análise de dados primários recolhidos com recurso a vários métodos, bem como uma extensa revisão de documentos de 2021 e 2022;

2. A abordagem referida pelos autores reduz a dependência de entidades externas, aprimora a capacidade de decisão a nível local e promove um sentimento de confiança, capacidade e apropriação, o que pode transformar a dinâmica e a responsabilidade vinculadas à gestão de inundações;
3. Com o envolvimento dos cidadãos, a análise qualitativa dos dados melhorou de forma significativa a capacidade de comunicação, a credibilidade da informação, bem como a acessibilidade às mensagens de alerta. Antes da participação ativa dos membros da comunidade, o funcionamento dos sistemas de alerta apresentavam uma estrutura de comunicação hierárquica, o que dificultava a preparação das comunidades vulneráveis ante a ameaça iminente de inundações, devido à falta de confiabilidade nas informações.

5.1.3.4 Taxa de Coordenação Interinstitucional

Samansiri *et al.*, (2023) aborda no artigo “*Critical Failure Factors of Flood Early Warning and Response Systems (FEWRS): A Structured Literature Review and Interpretive Structural Modelling (ISM) Analysis*”, a coordenação entre as entidades e as instituições:

1. Para os autores, este indicador resume-se a fatores como a fraca governação municipal, falta de vontade política e de liderança institucional, problemas de transparência na partilha da informação, falta de conhecimento e de sensibilização dos principais intervenientes, falta de financiamento para a operacionalização, modernização e manutenção dos sistemas de alerta, bem como a obtenção de recursos humanos;
2. Os investigadores afirmam que a fraca coordenação e comunicação entre as agências afetam diretamente a eficácia dos sistemas de alerta precoce de cheias, nomeadamente, a fraca coordenação entre as autoridades de gestão de cheias e as organizações de planeamento urbano, bem como os institutos técnicos e as autoridades municipais que emitem os alertas;
3. A coordenação entre os institutos responsáveis pela emissão dos alertas e agências de resposta rápida destaca-se como um dos principais desafios institucionais. Incidentes provocados por inundações demonstraram, tanto em países desenvolvidos como em países em desenvolvimento, que danos e prejuízos inesperados são passíveis de ser provocados pela ligação inadequada entre os emissores dos alertas e os responsáveis pela resposta.

5.1.4 KPI's Tecnológicos

Após a revisão da literatura, deduz-se que um KPI tecnológico materializa a eficácia, a inovação e a confiabilidade tecnológica do sistema de alerta.

Enquadram-se na dimensão tecnológica os seguintes KPI's: «Rapidez na Emissão de Alertas», «Falsos Positivos/Negativos», «Frequência na Atualização de Dados e Alertas», «Confiabilidade nos Modelos Hidrológicos e Hidráulicos» e «Escalabilidade do Sistema».

Estes indicadores seguem a mesma lógica de caracterização, conforme referido anteriormente: definição (1), importância (2) e aplicabilidade (3).

5.1.4.1 Rapidez na Emissão de Alertas

Samansiri *et al.*, (2023) analisa no artigo “*Critical Failure Factors of Flood Early Warning and Response Systems (FEWRS): A Structured Literature Review and Interpretive Structural Modelling (ISM) Analysis*”, os principais fatores de falha nos sistemas de alerta e resposta a cheias:

1. Na previsão de cheias, um tempo de antecedência mais amplo é essencial para reduzir o risco, uma vez que oferece um maior período para alertas e respostas de emergência. Os autores afirmam que o intervalo de tempo entre o alerta e o início da cheia se trata de um desafio fundamental, em parte no sistema FEWRS – *Flood Early Warning and Response System*;
2. Owen e Wendell (1981), citados pelos autores, afirmam que um alerta de inundação recebido demasiado tarde tem pouco ou nenhum valor. Tais sistemas são insignificantes a menos que forneçam alertas oportunos e eficazes que permitam à comunidade em risco agir atempadamente (Samansiri *et al.*, 2023);
3. Os autores, ao citar Parker *et al.*, (2009), sugerem que um maior tempo de antecedência de alertas pode reduzir a taxa de mortalidade e os danos materiais. Com a combinação de estações automáticas de medição, previsão meteorológica e previsão de cheias, o tempo de antecedência será potencialmente melhorado (Samansiri *et al.*, 2023).

5.1.4.2 Falsos Positivos/Negativos

O indicador «Falsos Positivos/Negativos» foi identificado em três obras: Cunha (2019) aponta para a sua definição, De la Fuente *et al.*, (2025) complementa a definição e importância do indicador, e Maia *et al.*, (2020) evidencia a sua aplicabilidade, conforme se verifica seguidamente:

1. Cunha (2019) define falso positivo como um alerta que não deveria ser emitido, ou seja, foi incorretamente identificada uma possível intrusão, ao contrário de um falso negativo, em que ocorre uma intrusão não detetada pelo

sistema. De la Fuente *et al.*, (2025) complementa: falsos negativos são previsões que provocam o acionamento do sistema e os falsos positivos correspondem a previsões em que o modelo perde credibilidade;

2. De la Fuente *et al.*, (2025) sublinha que os falsos positivos são tão problemáticos como os falsos negativos, visto que ambos minam a confiança dos utilizadores no sistema de alerta;
3. O sistema de alerta permite prever e detetar situações de cheias ocorridas, com registo de um falso pré-alerta em período isolado, além de situações de alerta sobrestimadas pelo sistema, em que numa situação real seria de pré-alerta (Maia *et al.*, 2020).

5.1.4.3 Frequência na Atualização de Dados e Alertas

Falck *et al.*, (2021) investiga no artigo “*Assessing the Potential of Upcoming Satellite Altimeter Missions in Operational Flood Forecasting Systems*” o potencial das futuras missões de altimetria por satélite com vista a melhorar a precisão dos sistemas operacionais na previsão e alerta de cheias:

1. Com a assimilação de diferentes frequências temporais e tempos de latência de caudais históricos, os autores avaliaram a qualidade das previsões de um modelo hidrológico distribuído, numa estrutura que simula um sistema operacional de previsão, com recurso ao sistema *European Ensemble Forecasting*;
2. A assimilação de dados (atualização do modelo com dados observados) dos caudais constitui uma forma de melhoria das previsões, com a redução dos erros nas condições iniciais. Embora haja vantagens nessa incorporação de dados nos sistemas de previsão de inundações, estes tendem a ser frequentemente limitados devido à necessidade de informações em tempo real com uma distribuição espacial adequada, particularmente os modelos hidrológicos distribuídos;
3. Os resultados obtidos após a análise de várias experiências (consideradas frequências de atualização de dados de 1, 3, 7 e 11 dias, com os tempos de latência de 0h, 24h, 48h, 78h, como condição inicial do modelo hidrológico) revelou que o aumento da frequência da recolha de dados e a redução do tempo de latência teve um efeito significativo, sobretudo nas sub-bacias de cabeceira com declive acentuado, onde a dinâmica das cheias tem potencial para provocar prejuízos económicos e vítimas humanas. Nas bacias de maior dimensão, os potenciais benefícios limitam-se aos primeiros dias de cheias, embora o aumento da frequência de recolha melhore a precisão das previsões.

5.1.4.4 Confiabilidade nos Modelos Hidrológicos e Hidráulicos

O indicador «Confiabilidade nos Modelos Hidrológicos e Hidráulicos» foi identificado em duas diferentes obras: De la Fuente *et al.*, (2025) aponta para a definição e importância do indicador, e Miranda (2011) a sua aplicabilidade, conforme se verifica seguidamente:

1. Um dos desafios dos sistemas de alerta de inundações corresponde à precisão e confiabilidade das previsões, principalmente em condições extremas que representam uma ameaça às populações humanas e atividades económicas (De la Fuente *et al.*, 2025);
2. Os sistemas de alerta sustentam-se tradicionalmente num único modelo hidrológico, acoplado a uma previsão meteorológica com fontes de incerteza que não garante a confiabilidade do sistema. Dessa forma, a melhoria das previsões de cheias dependerá das previsões em conjuntos, que consideram múltiplos resultados do modelo e a sua incerteza (De la Fuente *et al.*, 2025);
3. Modelos hidrológicos e hidráulicos são utilizados para ajudar na tomada de decisão, e o sucesso da aplicação de determinado modelo está relacionado com as capacidades do próprio modelo (Miranda, 2011).

5.1.4.5 Escalabilidade do Sistema

Nevo *et al.*, (2020) apresenta no artigo “*ML-based Flood Forecasting: Advances in Scale, Accuracy and Reach*” métodos baseados em *Machine Learning* para a previsão de cheias que permitem a criação de sistemas de alerta mais escaláveis:

1. Os sistemas de alerta de cheias tem demonstrado eficiência na redução de danos, embora para a maioria da população vulnerável no mundo, a acessibilidade a sistemas de alerta fiáveis seja nula, devido a desafios centrais relacionados com a escalabilidade do sistema, custos computacionais e a disponibilidade dos dados;
2. A incrementação de novas metodologias, como os modelos hidrológicos e modelos morfológicos, que reduzem a dependência de obtenção de determinados dados e os custos operacionais, representam um passo importante para a escalabilidade dos sistemas de alerta de cheias, com a finalidade de cobrir um perímetro para milhares de milhões de pessoas;
3. Os autores apresentam uma abordagem para a modelação de inundações com melhorias nos modelos hidrodinâmicos em vários aspetos, que incluem a escalabilidade do sistema de alerta, a sua eficiência computacional e a precisão (nomeadamente em contextos com escassez de dados).

6 APLICAÇÃO DO MÉTODO *DELPHI*

No decurso deste capítulo, pretende-se validar os KPI's identificados após a revisão da literatura, com vista à identificação de novos, com a posterior quantificação do seu grau de importância num domínio específico (classe), onde os especialistas teriam de avaliar na escala de *Likert* cada um dos KPI's, enquadrados nas quatro vertentes referidas no capítulo anterior. O Método *Delphi*, que teve início a partir do convite feito por *email*, data do fim do mês de novembro de 2024 com término no final do mês de abril de 2025. Os convites para a participação sondaram alguns especialistas do meu conhecimento, as dezanove autarquias da CIM – Região de Coimbra para submissão de respostas por parte de técnicos especializados, corporações de bombeiros da Região Centro, docentes universitários e empresários que atuam em áreas correlacionadas. No somatório, os *emails* perfazem um total de cinquenta e oito convites enviados para iniciar a primeira ronda.

6.1 Método *Delphi*

Antes de se abordar o método propriamente dito, importa apresentar a definição e os conceitos relevantes do mesmo, para uma melhor compreensão das fases que serão apresentadas posteriormente. De acordo com Dalkey & Helmer (1963), o objetivo do Método *Delphi* passa pela obtenção de um consenso de opinião o mais fiável possível dentro de um grupo de especialistas, com recurso a uma série de questionários intensivos intercalados por *feedbacks* controlados de opiniões. As principais características deste método, segundo Wright & Giovinazzo (2000), resumem-se ao anonimato de quem responde, a distribuição dos resultados, e o *feedback* das respostas do grupo para reavaliação nas fases que se seguem. Os mesmos autores realçam a continuidade do questionário, que é encaminhado até ser obtida uma convergência nas respostas, um consenso, que represente uma consolidação do julgamento intuitivo do grupo.

6.2 Painel de Especialistas

Para uma aplicação bem-sucedida do Método *Delphi*, um dos pontos cruciais assenta numa correta definição e constituição do painel de especialistas, que deve ter em consideração o conhecimento que estes detêm na área em que se materializa o estudo e a sua motivação (Sá, 2016). O mesmo autor refere a necessidade de criar um painel heterogéneo de especialistas, sem colocar em causa o rigor científico necessário para o dito estudo. Com consideração por toda a revisão da literatura, o primeiro passo adotado na organização do painel de especialistas prende-se na formação dos

mesmos. Dessa forma, tendo em conta o conhecimento que estes detêm sobre a área de estudo, foram definidos os seguintes grupos de especialistas:

1. Proteção Civil, desde Coordenadores Municipais e Técnicos Superiores de Proteção Civil, Corporações de Bombeiros Voluntários - especificamente um comandante;
2. Engenheiros Florestais e Biólogos, com conhecimentos no sistema biofísico que interage com os processos urbanos e hidrológicos, planeamento territorial, gestão da vegetação e uso do solo;
3. Técnicos de ordenamento do território, especificamente técnicos superiores com papel decisor nas autarquias locais;
4. Geógrafos e Engenheiros Geógrafos, com conhecimentos em cartografia de risco, planeamento urbano com integração de dados geoespaciais;
5. Engenheiros do Ambiente, com conhecimentos em soluções para mitigar, reduzir o risco e os impactos ambientais provocados pelas cheias;
6. Engenheiros Cívicos com conhecimentos no dimensionamento, operação e resiliência das infraestruturas hidráulicas e urbanas face às inundações.

Embora a visão não seja alargada a nível nacional, houve o cuidado de centrar e incluir no grupo de especialistas, membros da Comunidade Intermunicipal da Região de Coimbra (CIM-RC). Dessa forma, pretendeu-se incluir no painel de especialistas participantes ligados a todos os municípios da mesma CIM. A seleção destes membros, tendo em conta os seis grupos identificados, efetuou-se através de uma amostra por conveniência. Apesar deste tipo de amostragem reunir algumas limitações, poderá ser vantajoso na medida em que a proximidade entre os investigadores e os especialistas permitiu obter um maior número de respostas, sem comprometer a fiabilidade do estudo.

Dos cinquenta e oito convites feitos a especialistas, podemos considerar quarenta convites feitos de forma indireta aos especialistas. Esses quarenta convites, feitos às autarquias, corporações de bombeiros, ICNF e SNIRH, foram conduzidos no sentido de convidar a entidade a nomear um especialista indicado para responder ao questionário. Dos cinquenta e oito convites efetuados, foram obtidas vinte e três respostas na primeira ronda. Na segunda ronda, foram obtidas apenas nove respostas, um número bastante abaixo da primeira.

6.3 Elaboração da Primeira Ronda

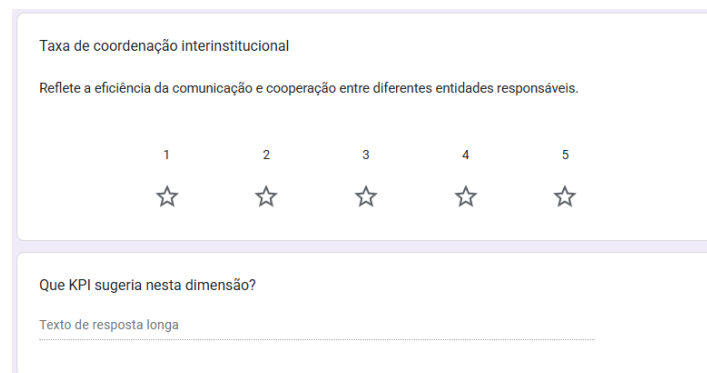
Outra das etapas críticas consiste em fazer chegar o questionário para a primeira ronda de uma forma rápida e acessível a todos os especialistas (Sá, 2016). O mesmo autor explica que submeter um questionário em formato físico (papel) a um conjunto alargado de especialistas, distribuídos por diferentes localizações geográficas, traria

uma maior demora e menor número de respostas. Dessa forma, tomou-se a opção de distribuir o questionário via *web*. Depois de uma análise das ferramentas existentes para a elaboração de questionários *web*, optou-se pelo Google Forms, devido à sua simplicidade e facilidade na construção de questionários.

Em termos de calendarização, a primeira ronda iniciou-se no final do mês de novembro de 2024 e estabeleceu-se como a data de término final janeiro de 2025. Os convites (Anexo C) foram enviados individualmente via *email*, com o link de acesso ao formulário. Atendendo a que, até ao prazo estabelecido como fim da primeira ronda, não se registou um número de respostas satisfatório, prolongou-se o prazo de submissão por mais um mês, até ao fim de fevereiro. No fim deste prazo, vinte e três especialistas tinham respondido com sucesso a esta primeira ronda.

Em termos funcionais, os especialistas ao acederem ao *link* de acesso, deparavam-se com a *dashboard* do questionário. Primeiramente, era solicitado aos especialistas a introdução dos seus dados sociodemográficos. Tal como referido nos capítulos anteriores, uma das características essenciais no Método Delphi é o anonimato e por esse motivo, os dados dos especialistas no decorrer do estudo apenas poderiam ser consultados pelos investigadores. Esta recolha de informação permitiu aos investigadores efetuar e completar a categorização dos perfis dos especialistas, relativamente à sua profissão, área geográfica, idade e habilitações literárias.

Após o preenchimento dos dados sociodemográficos, o questionário solicitou aos especialistas a classificação da importância dos KPI's, com recurso à escala de Likert (1- Muito Pouco Importante, 2 – Pouco Importante, 3 – Importante, 4 – Muito Importante, 5 – Extremamente Importante), para os quatro domínios referidos no capítulo anterior (Ambiental, Económico, Social, Tecnológico). Com a apresentação de cada KPI, foi anexada uma breve definição correspondente ao indicador para melhor contextualizar os especialistas. Na figura 17 apresenta-se uma amostra de um KPI de determinado domínio, escolhida de forma aleatória (neste caso, dimensão Social), bem como a sua breve definição, a classificação consoante a escala de Likert de 1 a 5 e ainda a possibilidade dos especialistas associarem a cada domínio, um novo indicador, em forma de sugestão.



The image shows a screenshot of a questionnaire item. At the top, the title is 'Taxa de coordenação interinstitucional'. Below it is a descriptive sentence: 'Reflete a eficiência da comunicação e cooperação entre diferentes entidades responsáveis.'. Underneath, there is a Likert scale with five points, each marked with a star icon and the number 1 through 5. At the bottom, there is a text input field with the prompt 'Que KPI sugeria nesta dimensão?' and a label 'Texto de resposta longa'.

Figura 17 - Apresentação de um KPI relativo a uma das quatro dimensões (Social)

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

Como estabelecido na aplicação do Método Delphi, nesta investigação também não se pretendeu apresentar somente uma lista preliminar de indicadores, de modo a não limitar e/ou enviesar a opinião dos especialistas. Desse modo, no final de cada dimensão (domínio) estava indicada a possibilidade dos especialistas sugerirem um novo indicador com relevância e enquadramento na dimensão e do estudo em causa.

Após a submissão de vinte e três dos cinquenta e oito convidados, a primeira ronda ficou finalizada e por conseguinte foi possível avançar para a verificação dos resultados.

6.3.1 Resultados da Primeira Ronda

Na primeira ronda, foram obtidas vinte e três respostas em teoricamente cinquenta e oito possíveis. Com base no levantamento sociodemográfico, foi possível validar os perfis dos especialistas - tabela 8 - e o concelho onde pertencem - tabela 9. A tabela 8 apresenta um painel de especialistas que se divide em oito grupos, distribuídos por dez concelhos da Região de Coimbra, nove pertencentes ao distrito de Coimbra e um ao distrito de Viseu (Mortágua), como se apresenta na tabela 9.

Tabela 8 - Perfis de especialistas que responderam na primeira ronda

Quantidade	Perfil de especialista
8	Coordenadores Municipais de Proteção Civil e Técnico Superior de Proteção Civil
2	Engenheiros do Ambiente
4	Geógrafos e Engenheiros Geógrafos
2	Engenheiros Florestais
2	Engenheiros Cívicos (um deles Professor Adjunto)
3	Técnicos Superiores de Autarquias Locais
1	Biólogo
1	Comandante dos Bombeiros Voluntários

Tabela 9 - Quantidade de respostas por cada município onde residem os especialistas com respostas na primeira ronda

Número	Municípios
8	Coimbra
5	Mortágua
2	Miranda do Corvo
1	Cantanhede
1	Penela
1	Góis
1	Soure
1	Montemor-o-Velho
2	Condeixa-a-Nova
1	Vila Nova de Poiares

Destes vinte e três especialistas, um é Doutorado, cinco Mestres, dezasseis Licenciados e um com ensino secundário, com uma média de idades de 44 anos. No sentido de identificar a importância de cada um dos KPI's, calculou-se a média, desvio padrão e o coeficiente de variação das pontuações atribuídas a cada indicador. Foi também determinado, para cada indicador, a percentagem de especialistas que o consideraram importante (Tabela 10 - Média e desvio padrão das pontuações atribuídas). Foi definido como concordância, as atribuições dos especialistas inseridas na escala de *Likert* nos valores de 4 e 5. A concordância foi calculada com recurso ao *software* SPSS. Os especialistas avaliaram dezasseis indicadores de desempenho (KPI) na primeira ronda, agrupados em quatro diferentes dimensões: Ambiental, Económica, Social e Tecnológica. Com recurso à escala de *Likert* - de 1 a 5 – consideraram-se importantes os KPI's com pontuações (médias) iguais ou superiores a 4. Em cada KPI, foi calculada a concordância dos especialistas, definida como percentagem de respostas superior a 4. Em suma, os resultados indicam uma forte aceitação global dos indicadores propostos, com valores de concordância entre 68% e 95% e média global de 85,5%, tal como se verifica na Tabela 10 (Média e desvio padrão das pontuações atribuídas). Todos os dezasseis KPI's transcenderam o limiar mínimo de 50% de concordância. Apesar deste limiar positivo, devido ao reduzido número de respostas, o critério utilizado para a continuidade dos indicadores para a seguinte ronda foi definido nos tangíveis 75%, isto é, para garantir

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

o consenso elevado dos indicadores, optou-se por manter para a segunda ronda, apenas os KPI com níveis de concordância acima de 75%.

Tabela 10 - Média e desvio padrão das pontuações atribuídas

Vertentes	<i>Key Performance Indicator (KPI)</i>	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação	Concordância
Ambientais	Precisão das Previsões Meteorológicas e Hidrológicas	4,57	0,577	12,6	92%
	Extensão da Cobertura de Monitorização	4,48	0,773	17,3	91,7%
	Áreas Inundadas Previstas e Reais	4,43	0,648	14,6	91,7%
	Historial de Cheias	4,24	0,779	18,4	87,5%
Económicos	Redução de Perdas Materiais	4,27	0,750	17,5	91,3%
	Custo Total do Sistema	3,95	0,638	16,1	73,9%
	Impacto Económico das Inundações Evitadas	4,36	0,643	14,7	91,3%
Sociais	Acessibilidade às Informações Hidrológicas	4,09	0,848	20,7	69,6%
	Confiabilidade do Sistema entre os Utilizadores	4,32	0,819	19,0	78,3%
	Índice de Compreensão dos Alertas	4,45	0,722	16,2	87,0%
	Taxa de Coordenação Interinstitucional	4,36	0,771	17,7	91,3%
Tecnológicos	Rapidez na Emissão de Alertas	4,71	0,700	14,8	95,5%
	Falsos Positivos/Negativos	3,95	0,844	21,3	68,2%
	Frequência na Atualização de Dados e Alertas	4,24	0,610	14,4	90,9%
	Confiabilidade nos Modelos Hidrológicos e Hidráulicos	4,33	0,713	16,4	86,4%
	Escalabilidade do Sistema	4,05	0,653	16,1	81,8%

6.3.1.1 Análise por Dimensão

I. Ambiental: os quatro indicadores ambientais obtiveram valores de concordância superiores a 90%, nomeadamente «*Extensão da Cobertura de Monitorização*», «*Áreas Inundadas Previstas e Reais*» (ambos com 91,7%) de concordância e «*Precisão das Previsões Meteorológicas e Hidrológicas*» com 92% de aprovação, à exceção do indicador «*Historial de Cheias*», com 87,5%. Os níveis de concordância revelam um consenso significativo relativamente à importância dos fatores ambientais na previsão e mitigação de cheias;

- II. Económica:** os três KPI's apresentam valores entre os 73,9% e os 91,3%, sendo este último correspondente aos indicadores «*Redução de Perdas Materiais*» e «*Impacto Económico das Inundações Evitadas*». Não obstante, o indicador «*Custo Total do Sistema*» dispõe de um valor menos relevante (73,9%), o que mostra uma menor perceção da sua proeminência. Essa posição poderá indicar diferentes perspetivas em torno dos custos associados a soluções tecnológicas nos variados contextos municipais;
- III. Social:** nesta vertente importa salientar a amplitude nos níveis de concordância, com valores que oscilam entre os 69,6% e os 91,3%, o que revela uma maior dispersão nas respostas. A menor concordância verificou-se no indicador «*Acessibilidade às Informações Hidrológicas*», o que poderá constituir indício de maior clarificação do indicador. O indicador «*Taxa de Coordenação Interinstitucional*» com 91,3%, reflete a importância da articulação eficaz e eficiente entre diferentes instituições na gestão destes fenómenos, indispensável para rápidas intervenções;
- IV. Tecnológica:** verifica-se nesta vertente a maior disparidade de concordância entre indicadores, com valores que oscilam entre os 68,2% - «*Falsos positivos / negativos*» - e 95,5% - «*Rapidez na emissão de alertas*». Ainda assim, quatro dos cinco indicadores obtiveram valores superiores a 81,8%, o que demonstra uma valorização da robustez e eficácia dos sistemas de alerta quanto aos seus componentes, prova do reconhecimento do papel central da tecnologia na mitigação dos riscos e das suas consequências.

Após a análise anterior, atribuiu-se a cada Dimensão um peso correspondente ao quartil onde se encontrava. Dessa forma, os indicadores foram classificados pelos quartis, com a atribuição do valor de peso 4 aos KPI's cuja média se encontrava no quarto quartil, um valor de peso 3 para os itens do terceiro quartil, um valor de peso 2 para os do segundo quartil e um valor de peso 1 para aqueles cuja média se insere no primeiro quartil (Tabela 11 - Representação dos percentis e o peso atribuído a cada um deles; Tabela 12 - Representação do peso atribuído e percentil atribuído a cada KPI, de acordo com o seu nível de concordância)

Tabela 11 - Representação dos percentis e o peso atribuído a cada um deles

Percentis	Peso atribuído
≥ 75	4
50 - 75	3
25 - 49	2
≤ 25	1

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

Tabela 12 - Representação do peso atribuído e percentil atribuído a cada KPI, de acordo com o seu nível de concordância

Key Performance Indicator (KPI)	Peso	Percentil
Precisão das Previsões Meteorológicas e Hidrológicas	4	≥75
Extensão da Cobertura de Monitorização	4	≥75
Áreas Inundadas Previstas e Reais	4	≥75
Historial de Cheias	4	≥75
Redução de Perdas Materiais	4	≥75
Custo Total do Sistema	3	50 - 75
Impacto Económico das Inundações Evitadas	4	≥75
Acessibilidade às Informações Hidrológicas	3	50 - 75
Confiabilidade do Sistema entre os Utilizadores	4	≥75
Índice de Compreensão dos Alertas	4	≥75
Taxa de Coordenação Interinstitucional	4	≥75
Rapidez na Emissão de Alertas	4	≥75
Falsos Positivos/Negativos	3	50 - 75
Frequência na Atualização de Dados e Alertas	4	≥75
Confiabilidade nos Modelos Hidrológicos e Hidráulicos	4	≥75
Escalabilidade do Sistema	4	≥75

Para determinar a consistência de cada atribuição, foi determinado o percentil 75 para a frequência em cada dimensão (Tabela 13 – Consistência de cada atribuição).

Tabela 13 - Consistência de cada atribuição

	Ambiental	Económico	Social	Tecnológico
Concordância	90,7%	85,5%	81,6%	84,6%

A tabela 13 representa os níveis elevados de concordância média nas quatro dimensões analisadas, o que revela um forte consenso entre os especialistas

relativamente aos fatores críticos para o sucesso de um sistema de alerta. Constatou-se uma maior preponderância na dimensão Ambiental, seguida das dimensões Económica e Tecnológica, o que evidencia a importância atribuída pelos especialistas aos fatores ambientais, embora sem esquecer o peso dos aspetos económicos e tecnológicos na eficácia dos sistemas de alerta. Embora a dimensão Social tenha a menor concordância média, a sua posição traduz-se num elevado grau relativamente à sua relevância, ainda que possa indicar uma maior dispersão de opiniões.

6.3.1.2 Sugestões dos Especialistas

Antes de finalizar a primeira ronda, importa referir as críticas construtivas sugeridas por alguns dos especialistas pertencentes ao painel. Na próxima secção serão apresentadas as sugestões dos especialistas que se converteram em KPI's, verificando-se o cumprimento do objetivo inicial nesse âmbito. Ainda assim, existem algumas críticas feitas ao questionário com possível impacto no preenchimento e avaliação de certos KPI's na perspetiva de alguns especialistas. As críticas à primeira ronda do formulário encontram-se transcritas seguidamente:

- “No formulário não há distinção entre os conceitos de cheias e inundações”;
- “Uma cheia provocada pelo aumento de um caudal de um rio deve ter um tratamento diferente de uma inundação provocada por falta de escoamento de uma bacia hidrográfica, e em contexto urbano esta última é em alguns casos particularmente importante”;
- “Atualmente está a ser dado particular relevo às séries longas (históricas), ao estudo das bacias intermédias, aos obstáculos que provocam inundações, aos caudais sólidos, à sensorização alargada, à “identidade” da bacia hidrográfica, à influência de pequenos afluentes, ao balanço entre influência atlântica e mediterrânica (no caso português)”;
- “É difícil encontrar uma graduação em todas as propostas do formulário pois todas são relevantes”.

6.4 Elaboração da Segunda Ronda

Após os resultados da ronda inicial, o próximo passo passa pela execução da segunda. Para tal, como efetuado no formulário, em cada uma das quatro dimensões foi lançado o repto para a sugestão de novos KPI's, relevantes para o tema em causa. Repetindo o processo da primeira ronda, foi realizado um novo formulário.

O convite, efetuado dia vinte e um de março de 2025 para a segunda ronda foi remetido via *email*, com o envio do *link* de acesso para o painel de vinte e três especialistas que responderam à primeira ronda. Foi anunciado como data limite para

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

responder ao questionário até ao final do mês de abril, ou seja, pouco mais que um mês para submissão das respostas. A primeira página a que os especialistas tinham acesso possuía novamente uma breve explicação sobre o objetivo do estudo, bem como as instruções do preenchimento do questionário. Após a validação dos dados sociodemográficos, os especialistas foram direcionados para os indicadores que reuniram o consenso na primeira ronda, nas quatro dimensões.

Uma vez sugeridos os contributos na primeira ronda com o intuito de criar novos indicadores, estes foram inseridos nas dimensões em que melhor se enquadrariam, de acordo com a opinião dos especialistas. Maior parte das sugestões incidiram em frases menos concisas, o que tornou necessário resumir e converter tais observações num indicador, sem redundância, mas com contexto e coerência. De seguida, propõem-se os seguintes indicadores para cada dimensão consoante o contributo, que se apresenta seguidamente transcrito, sugerido pelo painel de especialistas:

I. Dimensão Ambiental

Na dimensão ambiental registaram-se dois contributos por parte dos especialistas com viabilidade para a conversão em KPI - «Tempo de resposta para zonas eventualmente inundadas», «Problemas de assoreamento»:

- a. **Tempo de resposta para zonas eventualmente inundadas** - “Tempo de resposta para zonas que serão eventualmente inundadas. Ou seja, garantir que as ações preventivas são comunicadas rapidamente para evitar impactos ambientais maiores”;
- b. **Problemas de assoreamento** - “Volume de sedimentos ou altura da linha de água devido aos problemas de assoreamento”.

II. Dimensão Económica

Na dimensão económica registaram-se dois contributos por parte dos especialistas com viabilidade para a conversão em KPI - «Comparação de custos perante os benefícios», «Custo total de evento por inundação»:

- a. **Comparação de custos perante os benefícios** - “Comparar custos vs. Benefícios. Benefícios gerados pelo sistema (como redução de perdas) com o custo total de implementação e operação”;
- b. **Custo total de evento por inundação** - “Depende do que se entende por impacte económico. Apenas custos diretos ou também os indiretos? Se não contemplar este tipo de impacte, deveria ser contabilizado com dias de perda de trabalho ou algo do género”.

III. Dimensão Social

Na dimensão social registaram-se três contributos por parte dos especialistas com viabilidade para a conversão em KPI - «Redução de vítimas por evento de

inundação», «Acessibilidade do sistema para grupos vulneráveis», «Conhecimento da população sobre alertas e evacuação»:

- a. **Redução de vítimas por evento de inundação** - “Medir a diminuição de vítimas (feridos e fatalidades) em decorrência de eventos de cheia após a implementação do sistema e apresentar estes dados regularmente à comunidade abrangida pelo sistema”;
- b. **Acessibilidade do sistema para grupos vulneráveis** - “Acesso inclusivo ao sistema de alerta, isto é, os grupos vulneráveis que receberam o alerta e puderam agir ou não”;
- c. **Conhecimento da população sobre alertas e evacuação** - “Um KPI que traduz o grau de conhecimento sobre os sistemas de alerta e evacuação. Quais as rotas a tomar, procedimentos e afins. Outro KPI poderia insistir sobre a divulgação, nomeadamente o papel das escolas. Não me parece que esteja diretamente considerado”.

IV. Dimensão Económica

Na dimensão tecnológica registou-se um contributo por parte dos especialistas com viabilidade para a conversão em KPI - «Redundância e confiabilidade no sistema de alerta»:

- a. **Redundância e confiabilidade no sistema de alerta** - “Redundância do sistema de forma a prevenir eventuais falhas de sensores e comunicações”

Com base nos contributos sugeridos por parte do painel de especialistas, iniciou-se a segunda ronda com oito novos indicadores. Para garantir uma segunda ronda mais rigorosa, com o intuito de manter os indicadores com maior índice de concordância, efetuou-se uma seleção dos melhores indicadores. Dos dezasseis indicadores presentes na primeira ronda, treze situam-se no quartil 4 e três no quartil 3, ou seja, houve três indicadores com concordância abaixo dos 75%, entre os quais: «Custo Total do Sistema», «Acessibilidade às Informações Hidrológicas», «Falsos Positivos/Negativos». Dessa forma, decidiu-se que estes indicadores seriam excluídos da segunda ronda.

Consequentemente, com a exclusão de três indicadores dos dezasseis iniciais e com o acréscimo de oito novos, inicia-se a segunda ronda com um total de vinte e um indicadores, divididos nas quatro dimensões. A dimensão Ambiental possui agora seis indicadores, a dimensão Económica quatro, dimensão Social seis e a dimensão Tecnológica com cinco, o que perfaz um total de vinte e um indicadores, que se apresentam seguidamente, enquadrados por dimensão/domínio:

- **Ambiental:** Precisão das Previsões Meteorológicas e Hidrológicas, Extensão da Cobertura de Monitorização, Áreas Inundadas Previstas e Reais, Historial

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

de Cheias, Tempo de Resposta para Zonas Eventualmente Inundadas; Problemas de Assoreamento;

- **Económica:** Redução de Perdas Materiais, Impacto Económico das Inundações Evitadas, Comparação de Custos perante os Benefícios, Custo Total de Evento por Inundação;
- **Social:** Confiabilidade do Sistema entre os Utilizadores, Índice de Compreensão dos Alertas, Taxa de Coordenação Interinstitucional, Redução de Vítimas por Evento de Inundação, Acessibilidade do Sistema para Grupos Vulneráveis, Conhecimento da População sobre Alertas e Evacuação;
- **Tecnológica:** Rapidez na Emissão de Alertas, Frequência na Atualização de Dados e Alertas, Confiabilidade nos Modelos Hidrológicos e Meteorológicos, Escalabilidade do Sistema, Redundância e Confiabilidade no Sistema de Alerta.

6.4.1 Resultados da Segunda Ronda

O objetivo da segunda ronda do Método *Delphi* passa pela consolidação do consenso entre os especialistas mediante a reavaliação dos indicadores apresentados na ronda inicial. Nesta ronda, consideraram-se os mesmos dados sociodemográficos, visto que os especialistas foram os mesmos, embora sem a submissão de todos os chamados à primeira ronda: dos vinte e três especialistas pertencentes ao painel inicial, apenas nove submeteram respostas na segunda ronda.

Os resultados obtidos podem indicar eventualmente um elevado grau de concordância, com várias métricas que atingem a totalidade da concordância (100%), denotando um consenso total em grande parte dos indicadores propostos. Não obstante, a redução substancial do número de participantes trata-se de um fator que merece consideração na interpretação dos resultados.

A redução do número de participantes reflete um fenómeno comum presente nos métodos *Delphi* – a diminuição da participação à medida que se intensifica a refinação do processo. Este fenómeno originou um aumento da homogeneidade nas respostas, onde a maioria dos KPI's obteve valores médios elevados que transcenderam 4,0 numa escala de 1 a 5, resultando em coeficientes de variação inferiores a 20% e índices de concordância iguais ou relativamente próximos de 100%, o que indica uma aceitação generalizada. Ainda assim, esta uniformidade de resultados deve ser considerada com prudência, visto que a concordância assume apenas três valores diferentes: 77,8% para dois indicadores, 88,9% em dez e 100% nos restantes nove indicadores.

A tabela 14 (Tabela 14 - Atribuição de pontuações para a média, desvio padrão, coeficiente de variação e concordância da segunda ronda) representa os resultados obtidos na segunda ronda, após aplicação do mesmo método aplicado na primeira – com recurso ao *software* SPSS.

Tabela 14 - Atribuição de pontuações para a média, desvio padrão, coeficiente de variação e concordância da segunda ronda

Vertentes	<i>Key Performance Indicator (KPI)</i>	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação	Concordância
Ambientais	Precisão das Previsões Meteorológicas e Hidrológicas	4,56	0,685	15,0	88,9%
	Extensão da Cobertura de Monitorização	4,89	0,314	6,4	100,0%
	Áreas Inundadas Previstas e Reais	4,78	0,416	8,7	100,0%
	Historial de Cheias	4,33	0,816	18,9	77,8%
	Tempo de Resposta para Zonas Eventualmente Inundadas	4,89	0,314	6,4	100,0%
	Problemas de Assoreamento	4,44	0,497	11,2	100,0%
Económicos	Redução de Perdas Materiais	4,33	0,816	18,9	77,8%
	Impacto Económico das Inundações Evitadas	4,78	0,416	8,7	100,0%
	Comparação dos Custos perante os Benefícios	4,44	0,497	11,2	100,0%
	Custo Total de Evento por Inundação	4,56	0,497	10,9	88,9%
Sociais	Confiabilidade do Sistema entre os Utilizadores	4,67	0,667	14,3	88,9%
	Índice de Compreensão dos Alertas	4,67	0,667	14,3	88,9%
	Taxa de Coordenação Interinstitucional	4,56	0,497	10,9	100,0%
	Redução de Vítimas por Evento de Inundação	5,00	0,000	0,0	100,0%
	Acessibilidade do Sistema para Grupos Vulneráveis	4,56	0,956	21,0	88,9%
	Conhecimento da População sobre Alertas e Evacuação	4,78	0,416	8,7	88,9%
Tecnológicos	Rapidez na Emissão de Alertas	4,89	0,314	6,4	100,0%
	Frequência na Atualização de Dados e Alertas	4,33	0,471	10,9	88,9%
	Confiabilidade nos Modelos Hidrológicos e Hidráulicos	4,67	0,667	14,3	88,9%
	Escalabilidade do Sistema	4,44	0,685	15,4	88,9%
	Redundância e Confiabilidade no Sistema de Alerta	4,67	0,471	10,1	88,9%

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

Após a análise da tabela 14, é possível extrair os KPI's com uma concordância total de 100%, o que indica um máximo consenso relativamente ao indicador. Nesse âmbito, apresentam-se os seguintes KPI's e respetiva dimensão a que pertencem:

- Extensão da Cobertura de Monitorização (Ambiental);
- Áreas Inundadas Previstas e Reais (Ambiental);
- Tempo de Resposta para Zonas Eventualmente Inundadas (Ambiental);
- Problemas de Assoreamento (Ambiental);
- Impacto Económico das Inundações Evitadas (Económica);
- Comparação dos Custos perante os Benefícios (Económica);
- Taxa de Coordenação Interinstitucional (Social);
- Redução de Vítimas por Evento de Inundação (Social);
- Rapidez na Emissão de Alertas (Tecnológica).

Os especialistas avaliaram vinte e um indicadores de desempenho na segunda ronda, agrupados nas quatro dimensões definidas inicialmente. Seguindo a mesma metodologia, com recurso à escala de *Likert* – de 1 a 5 – foram considerados importantes os KPI's com pontuações (médias) iguais ou superiores a 4. Para cada KPI, foi calculada a importância do mesmo perante a opinião dos especialistas, definida como valor de respostas superior a 4.

Em suma, os resultados indicam uma maior aceitação global que na primeira ronda, com os valores de concordância a variarem entre 77,8% e os 100%. Uma das condicionantes, responsável por valores elevados na concordância desta segunda ronda, remete-se ao facto de ter havido menos respostas por parte dos especialistas, o que provoca uma menor discrepância e menor variabilidade nos resultados. Seguidamente, apresenta-se uma análise dos resultados por dimensão.

6.4.1.1 Análise por Dimensão

- I. Ambiental:** os seis indicadores presentes nesta dimensão (quatro iniciais, dois provenientes de sugestões) obtiveram valores de concordância que oscilam entre os 77,8% e os 100%. Quatro dos seis indicadores apresentam valores de concordância igual a 100%, o que mostra um elevado consenso quanto aos mesmos, entre os quais são: «*Extensão da Cobertura de Monitorização*», «*Áreas Inundadas Previstas e Reais*», «*Tempo de Resposta para Zonas Eventualmente Inundadas*» e «*Problemas de Assoreamento*». De referir que estes dois últimos indicadores foram sugeridos por especialistas, o que comprova a importância da opinião dos mesmos, dado o valor máximo de concordância de ambos;
- II. Económica:** os cinco indicadores (dois novos) apresentam valores semelhantes relativamente à dimensão ambiental. Por um lado dois dos cinco indicadores apresentam concordância máxima (100%) - «*Impacto Económico das*

Inundações Evitadas» e «*Comparação dos Custos perante os Benefícios*» (este último proveniente do contributo de um especialista). O indicador «*Custo Total de Evento por Inundação*» apresenta valores de 88,9% e o indicador «*Redução de Perdas Materiais*» 77,8%, que embora demonstre uma concordância elevada, sofre uma diminuição relativamente à primeira ronda, em que apresentou um valor de concordância de 91,3%;

- III. Social:** na vertente social, com um total de seis indicadores (quatro iniciais e dois sugeridos), quatro apresentam um valor de concordância de 88,9%, onde dois foram sugeridos por especialistas: «*Acessibilidade do Sistema para Grupos Vulneráveis*» e «*Conhecimento da População sobre Alertas e Evacuação*». Nos outros dois indicadores verifica-se uma concordância máxima de 100% - «*Taxa de Coordenação Interinstitucional*» e «*Redução de Vítimas por Evento de Inundação*», sendo este último um indicador sugerido também por parte do painel;
- IV. Tecnológica:** nesta dimensão apresentam-se apenas dois tipos de concordância – 88,9 e 100%. Com mais especificidade, apenas um indicador teve a concordância com valor de 100% - «*Rapidez na Emissão de Alertas*», que se reflete no valor da primeira ronda, onde obteve 95,5% (o mais alto de toda a primeira ronda), prova da coerência nas respostas por parte dos especialistas. Assim, os restantes quatro KPI's provenientes da primeira ronda mantêm um valor positivo de 88,9%, com a integração do novo KPI, sugerido pelos especialistas - «*Redundância e Confiabilidade no Sistema de Alertas*».

Na primeira ronda atribuiu-se um peso correspondente ao quartil onde cada indicador se encontrava, com a classificação dos indicadores pelos quartis e atribuição do valor de peso 4 aos KPI's cuja média se encontrava no quarto quartil, um valor de peso 3 para os itens do terceiro quartil, um valor de peso 2 para os itens do segundo quartil e um valor de peso 1 para os indicadores do primeiro quartil.

Porém, na primeira ronda, é notória uma maior discrepância nos valores de concordância que se deve a um maior número de respostas, algo que não se verifica na segunda ronda, onde os valores assumem apenas três conjuntos – 77,8%, 88,9% e 100%. Se o mesmo critério for aplicado aqui, irá acontecer uma homogeneidade de resultados – todos terão peso 4 – visto que todos se encaixam no percentil ≥ 75 .

Dessa forma, verificou-se a necessidade de efetuar uma alteração nos quartis, com o acréscimo de um novo percentil. Esta reformulação permitirá uma seleção mais rigorosa e correta dos indicadores. Assim, atribuiu-se para o quinto quartil (≥ 90) um valor de peso 5, quarto quartil (71-89) um valor de peso 4, terceiro quartil (41-70) um valor de peso 3, segundo quartil (21-40) um valor de peso 2, e primeiro quartil (≤ 20) um valor de peso 1, tal como se apresenta na Tabela 15 (Representação dos percentis e o peso atribuído a cada um deles (2ª Ronda)), e conseqüentemente na Tabela 16, a representação do peso e percentil atribuído a cada KPI, de acordo com o seu nível de concordância na segunda ronda.

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

Tabela 15 - Representação dos percentis e o peso atribuído a cada um deles (2ª Ronda)

Percentis	Peso atribuído
≥90	5
71 - 89	4
41 - 70	3
21 - 40	2
≤20	1

Tabela 16 - Representação do peso e percentil atribuído a cada KPI, de acordo com o seu nível de concordância (2ª ronda)

Key Performance Indicator (KPI)	Peso	Percentil
Precisão das Previsões Meteorológicas e Hidrológicas	4	71 - 89
Extensão da Cobertura de Monitorização	5	≥90
Áreas Inundadas Previstas e Reais	5	≥90
Historial de Cheias	4	71 - 89
Tempo de Resposta para Zonas Eventualmente Inundadas	5	≥90
Problemas de Assoreamento	5	≥90
Redução de Perdas Materiais	4	71 - 89
Impacto Económico das Inundações Evitadas	5	≥90
Comparação dos Custos perante os Benefícios	5	≥90
Custo Total de Evento por Inundação	4	71 - 89
Confiabilidade do Sistema entre os Utilizadores	4	71 - 89
Índice de Compreensão dos Alertas	4	71 - 89
Taxa de Coordenação Interinstitucional	5	≥90
Redução de Vítimas por Evento de Inundação	5	≥90
Acessibilidade do Sistema para Grupos Vulneráveis	4	71 - 89
Conhecimento da População sobre Alertas e Evacuação	4	71 - 89
Rapidez na Emissão de Alertas	5	≥90

Key Performance Indicator (KPI)	Peso	Percentil
Confiabilidade nos Modelos Hidrológicos e Meteorológicos	4	71 - 89
Escalabilidade do Sistema	4	71 - 89
Redundância e Confiabilidade no Sistema de Alerta	4	71 - 89
Frequência na Atualização de Dados e Alertas	4	71 - 89

Após a análise aos resultados da segunda ronda, podemos extrair os KPI's com melhor desempenho, isto é, maior peso tendo em conta o percentil. Dessa forma, os indicadores com valor de peso 5 são:

- Extensão da Cobertura de Monitorização;
- Áreas Inundadas Previstas e Reais;
- Tempo de Resposta para Zonas Eventualmente Inundadas;
- Problemas de Assoreamento;
- Impacto Económico das Inundações Evitadas;
- Comparação dos Custos perante os Benefícios;
- Taxa de Coordenação Interinstitucional;
- Redução de Vítimas por Evento de Inundação;
- Rapidez na Emissão de Alertas.

No capítulo seguinte haverá uma seleção neste conjunto de indicadores, com o intuito de fazer uma prova de conceito e perceber realmente a viabilidade e o contributo de determinado KPI para o sucesso de um sistema de alerta de previsão de cheias e inundações, com aplicação num contexto real para a cidade de Coimbra.

7 PROVA DE CONCEITO: APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICOS

De forma a validar os KPI's como prova de conceito, foram selecionados indicadores com maior pontuação, conforme é apresentado do final do capítulo anterior. De tal forma, nesta secção será efetuada a validação de um dos indicadores de desempenho, com aplicação do mesmo em contexto real recorrendo aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Porém, antes disso importa contextualizar a norma europeia, que delimitou e deu origem à disponibilização de informação espacial que será utilizada *a posteriori* – Cartografia de Inundações, que inclui as Cartas de Zonas Inundáveis e Cartas de Risco de Inundação.

7.1 Enquadramento Legal Europeu

De acordo com o Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, a Diretiva 2007/60/CE tem como objetivo estabelecer um quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundações, a fim de reduzir as consequências associadas às inundações na Comunidade Europeia prejudiciais para a saúde humana, ambiente, património cultural e atividades económicas. Esta Diretiva, explica Costa (2020), opta por uma uniformização do conceito à escala europeia; embora se considerem vários tipos de processos causadores de inundação tais como as “*cheias de origem fluvial, cheias repentinas, inundações urbanas e inundações marítimas em zonas costeiras*”, o restante documento opta unicamente pelo termo “inundação” para fazer referência aos efeitos da ocorrência de cada um dos seguintes processos: “*risco de inundações*”, “*cenários de inundações*” e “*impactos negativos de inundações*”.

De acordo com o Capítulo III da Diretiva 2007/60/CE, os Estados-Membros devem elaborar, ao nível da região hidrográfica ou unidade de gestão, Cartas de Zonas Inundáveis e Cartas de Risco de Inundação, na escala mais apropriada para as zonas identificadas. O capítulo atual terá por base as cartas elaboradas e obrigatoriamente disponibilizadas no PGRH-RH4A – Plano de Gestão de Região Hidrográfica – Vouga, Mondego e Lis (RH4A), no qual se insere o caso de estudo.

7.1.1 Cartas de Zonas Inundáveis

As Cartas de Zonas Inundáveis, segundo a Diretiva 2007/60/CE, cobrem as zonas geográficas suscetíveis de serem inundadas, de acordo com os seguintes cenários:

- a) Fraca probabilidade de cheias ou cenários de fenómenos extremos;
- b) Probabilidade média de cheias (periodicidade provável igual ou superior a 100 anos);
- c) Probabilidade elevada de cheias, quando aplicável.

Para cada um destes cenários devem ser indicados os seguintes elementos:

- a) Amplitude da inundação;
- b) Profundidades da água ou nível de água, quando aplicável;
- c) Velocidade da corrente ou o caudal da cheia correspondente, quando aplicável.

7.1.2 Cartas de Risco de Inundação

De acordo com a Diretiva 2007/60/CE, as Cartas de Risco de Inundação devem indicar as potenciais consequências prejudiciais ligadas às inundações, expressas no âmbito de:

- a) Número indicativo de habitantes potencialmente afetados;
- b) Tipo de atividade económica da zona potencialmente afetada;
- c) Instalações relativas à prevenção e controlo integrados da poluição, potenciais causadores de poluição ambiental em caso de inundações e zonas protegidas;
- d) Informações adicionais que os Estados Membros considerem úteis, como a indicação das zonas onde podem eventualmente ocorrer inundações que arrastem volume elevado de sedimentos e detritos, assim como informações sobre outras fontes importantes de poluição.

7.2 Cartografia de Inundações

De acordo com o documento do 1º Ciclo de Planeamento (2016-2021) do Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis (PGRH-RH4A) elaborado pela APA (2016), a Autoridade Nacional da Água promoveu a elaboração da cartografia sobre as inundações, sendo concluída para cada Zona Crítica e para três cenários hidrológicos (associados aos períodos de retorno de 20, 100 e 1000 anos), em que foram considerados os seguintes parâmetros:

- Limite da área de inundação, que corresponde à extensão do fenómeno;
- Profundidade da inundação, em função da altura do escoamento (d);
- Velocidade de escoamento (v);
- Critérios adotados para a valoração das consequências em função dos elementos expostos;
- Perigosidade de inundação, em função da altura e velocidade de escoamento;
- Risco de inundação, combinação entre a perigosidade e a natureza dos elementos expostos.

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

De acordo o mesmo documento (PGRH – RH4A), a Cartografia de Inundações teve por base várias etapas de desenvolvimento:

- a. Recolha dos elementos de base – Dados topográficos e cartográficos, Hidrologia e meteorologia, Socio-economia;
- b. Caracterização das áreas de estudo – Cheias históricas, Morfologia, Hidrometeorologia;
- c. Modelação hidrológica e hidráulica – Modelação hidrológica, Seleção de caudais de ponta, Modelação hidráulica;
- d. Avaliação do risco – Cartas de zonas inundáveis, Avaliação social económica e ambiental, Análise de risco;
- e. Gestão da informação – Cartas de risco, Sistemas de Informação Geográfica, Bases de dados.

Depois do 1º Ciclo previsto para 2016 – 2021, surgiu o Plano de Gestão dos Riscos de Inundações da RH4A – 2º Ciclo (2022 – 2027). Segundo o PGRH - RH4A, APA (2022), a representação cartográfica das zonas inundáveis e dos riscos de inundação, de acordo com o ponto 3 do artigo 6º da DAGRI, deve considerar três cenários de probabilidade de ocorrência, no caso das ARPSI (Áreas de Risco Potencial Significativo de Inundação) associadas a eventos fluviais/pluviais:

- Baixa probabilidade ou cenários de fenómenos extremos;
- Média probabilidade, com periodicidade igual ou superior a 100 anos;
- Elevada probabilidade, com periodicidade inferior a 100 anos.

De acordo com o mesmo plano, Portugal optou por considerar três cenários de probabilidade associados aos períodos de retorno de $T = 20$, $T = 100$ e $T = 1000$ anos, para a respetiva implementação de modelos hidrológicos e hidráulicos, mantendo os cenários avaliados no 1º ciclo de implementação da diretiva. Na eventualidade do cenário de baixa probabilidade de ocorrência, considera-se $T = 1000$ anos, considerado este o período de retorno utilizado para o dimensionamento de infraestruturas hidráulicas, em conformidade com a legislação nacional vigente.

Após esta introdução, é pertinente destacar o significado de período de retorno e a informação existente sobre uma inundação. Segundo o PGRH-RH4A – 2º Ciclo, “o período de retorno de uma cheia é o intervalo de tempo (em anos) estimado para a ocorrência de um determinado evento. Uma cheia com um período de retorno de 100 anos, estima-se que seja igualada ou superada, em valores médios, uma vez a cada 100 anos”.

Na secção seguinte pretende-se avaliar as áreas de perigosidade, consequência/exposição e risco de inundação nas delimitações do município de Coimbra, fazendo uso das ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica para uma abordagem mais rigorosa. Para esse feito, foi utilizada a plataforma QGIS, que

permitiu assim o processamento e análise dos dados de forma rigorosa e integrada. Através da Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP), obteve-se o limite administrativo do concelho de Coimbra, com precisão dos contornos territoriais assegurados e considerados na análise em pós processamento. As informações relativas à perigosidade de inundação, risco de inundação e consequência/exposição de inundação são provenientes do Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG), plataforma gerida pela DGT. Os dados fornecidos e posteriormente convertidos em formato *shapefile* correspondem a diferentes cenários de cheia definidos para os períodos de retorno de 20, 100 e 1000 anos. As previsões de inundações para os períodos de retorno anteriormente referidos, são por norma elaboradas por entidades especializadas em hidrologia e gestão dos recursos hídricos, como a Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Os dados detêm em si áreas de afetação por inundações calculadas, realizadas com base em modelos hidrológicos e hidráulicos, considerando dados topográficos, hidrológicos e meteorológicos.

7.2.1 Análise Espacial de Zonas Inundáveis

Com vista a situar os KPI's do Método *Delphi*, a aplicação da Cartografia de Zonas Inundáveis revela-se ajustada como prova de conceito. Embora não seja aplicada diretamente nesta secção, esta integra parâmetros como a perigosidade, consequência/exposição e o risco de inundação, que permitem analisar as áreas de risco. Com os parâmetros fornecidos para os Períodos de Retorno de 20, 100 e 1000 anos, é possível obter uma visão integrada da extensão espacial do fenómeno físico de inundação, os elementos expostos, consequências, e o risco, que surge como uma combinação dos dois parâmetros anteriores.

7.2.1.1 Perigosidade de Inundação

O PGRH – RH4A (2022) define perigosidade como uma função da altura da água (m) pela velocidade do escoamento (m/s), e considera como classe - de Muito Alto a Muito Baixo. Nesta secção, com recurso ao QGIS para processamento da informação retirada do SNIG, são apresentados mapas de Perigosidade para os períodos de 20, 100 e 1000 anos (Figura 18 – Representação da Perigosidade de Inundação prevista na cartografia de zonas inundáveis para os vários períodos de retorno para o concelho de Coimbra), que permitem identificar, comparar e calcular as áreas potencialmente afetadas, em função da magnitude dos eventos.

A observação dos mapas de Perigosidade de Inundação permitiu identificar padrões espaciais distintos. Nos três cenários, verificou-se uma manutenção das zonas adjacentes ao leito principal do rio Mondego com classificação de nível de perigosidade Muito Alto ou Alto. A progressão expansiva das áreas de perigosidade média e alta estendem-se a áreas de cariz mais urbano, agrícolas e infraestruturas relevantes, à medida que o Período de Retorno aumenta. Por outro lado, verifica-se

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

um agravamento de áreas que apresentam inicialmente níveis Baixos ou Muito Baixos de Perigosidade, em possíveis cenários extremos de cheia, o que evidencia a complexidade do risco no território em causa.

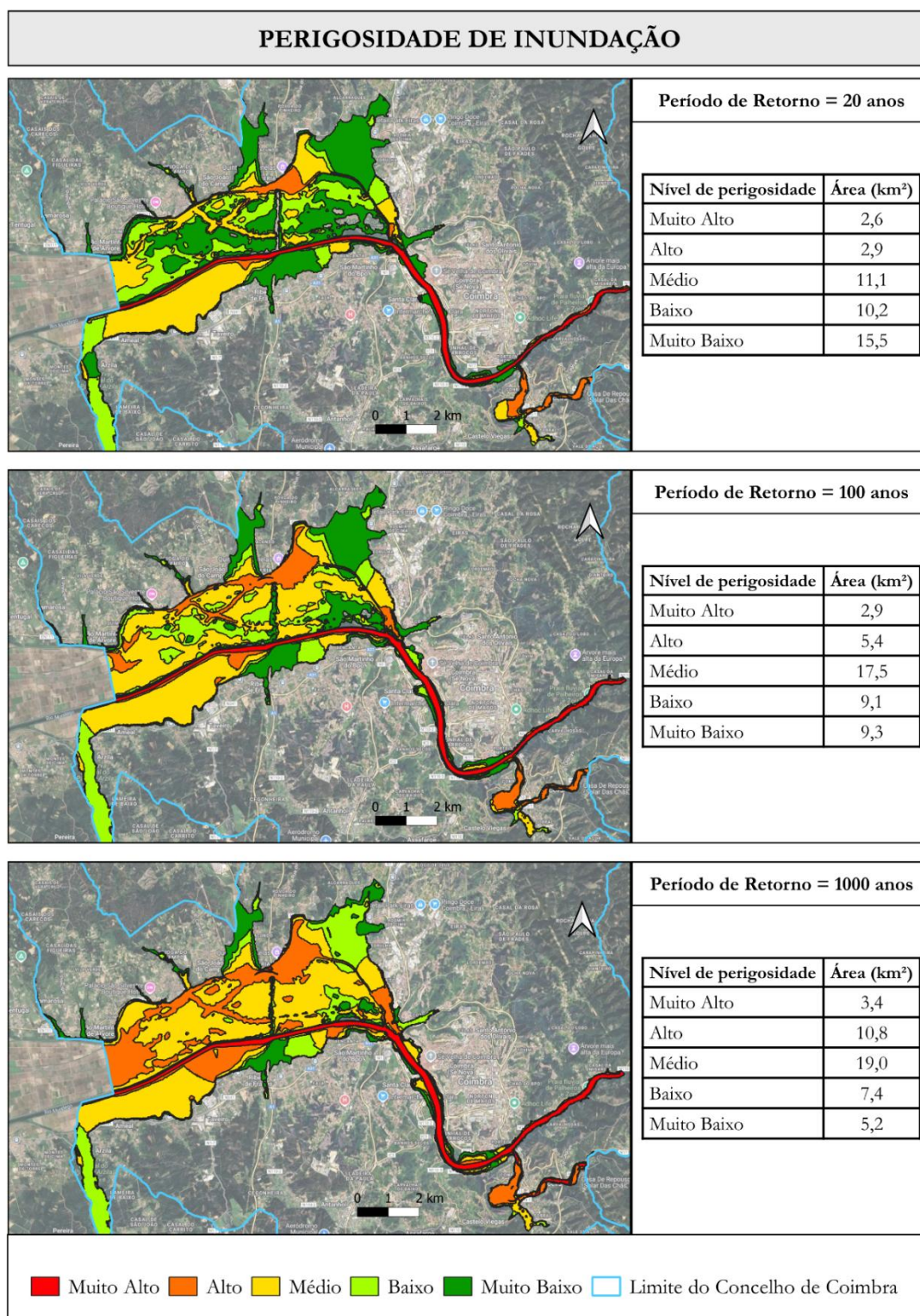


Figura 18 - Representação da Perigosidade de Inundação prevista na cartografia de zonas inundáveis para os vários períodos de retorno para o concelho de Coimbra

Quantitativamente, a avaliação das áreas ocupadas por cada nível de perigosidade confirma as tendências verificadas visualmente. Especificamente, para o período de retorno de 20 anos, o nível “*Muito Alto*” abrange 2,6 km², aumentando para 2,9 em T = 100 anos e 3,4 km² em T = 1000 anos, o que prova o aumento da tendência de eventos extremos. Os níveis *Alto* e *Médio* demonstram uma escalabilidade dos seus valores à medida que o período de retorno aumenta, com uma transgressão progressiva das áreas para níveis acentuados. Consequentemente, os níveis *Baixo* e *Muito Baixo*, apresentam uma diminuição substancial à medida que o Período de Retorno aumenta, resultado direto da expansão das classes de maior perigosidade.

7.2.1.2 Consequência / Exposição de Inundação

Embora não exista uma definição literal de consequência/exposição de inundação presente na Diretiva 2007/60/CE e no PGRH – RH4A, é possível desconstruir o conceito com base neste último plano. De acordo com o PGRH – RH4A (2022), o mapeamento dos impactos das zonas inundáveis permite a identificação das potenciais consequências negativas das inundações na população, no ambiente, nas atividades económicas e no património, bem como a identificação dos elementos cuja exposição à ameaça de inundação é elevada, o que pode exigir a definição de medidas que reduzam o impacto e o nível de perigosidade a que estão expostos.

Após a análise espacial dos mapas de Consequência/Exposição de Inundação para os três períodos de retorno (Figura 19 – Representação da Consequência/Exposição de Inundação prevista na cartografia de zonas inundáveis para os vários períodos de retorno para o concelho de Coimbra), verificou-se na grande maioria uma exposição *Reduzida* ou *Mínima*. Os níveis de alta exposição são evidentes em pontos específicos do território, maioritariamente localizados nas zonas urbanas densamente edificadas junto à Baixa de Coimbra, Santa Clara e ao longo das principais zonas urbanas. Também é possível constatar a ligeira expansão das áreas com níveis de exposição *Média*, *Alta* e *Máxima*, à medida que o período de retorno aumenta, nomeadamente junto aos corredores de inundação e em setores de transição entre a área urbana e zonas agrícolas do Baixo Mondego.

Conforme os dados apresentados nas tabelas da Figura 19, verifica-se um *Reduzido* nível de exposição dominante em todos os cenários, ocupando 25,9 km² para T= 20 anos, 26,7 km² em T= 100 anos e 27,1 km² para T = 1000 anos. A exposição *Mínima* preserva também valores elevados e relativamente estáveis, na ordem dos 14 e 15 km² para os três cenários. As áreas de nível de exposição *Máxima* exibem uma ligeira tendência de crescimento à medida que o período de retorno aumenta, oscilando de 0,5 km² para 0,6 km² e por fim para 0,7 km². Tal se verifica de forma semelhante para as classes *Alta* e *Média*, embora com valores absolutos inferiores. Os resultados em causa transmitem um acréscimo do potencial de impacto em cenários extremos de cheia.

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

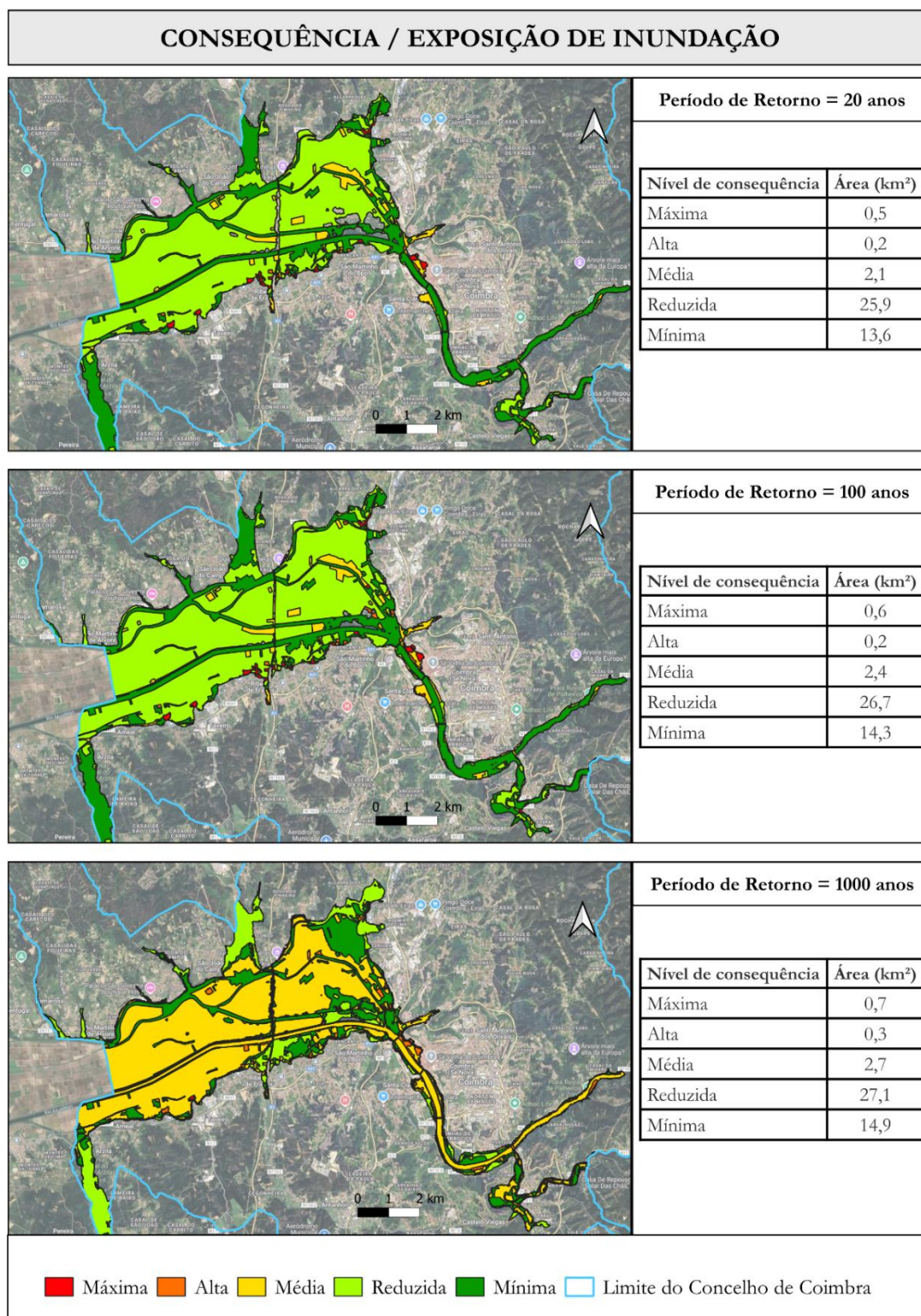


Figura 19 - Representação da Consequência/Exposição de Inundação prevista na cartografia de zonas inundáveis para os vários períodos de retorno para o concelho de Coimbra

7.2.1.3 Risco de Inundação

De acordo com a Diretiva 2007/60/CE, risco de inundação corresponde à combinação da probabilidade de inundações e das suas potenciais consequências prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, património cultural e atividades económicas. Este conceito é reforçado no PGRH – RH4A (2022), que acrescenta que as consequências prejudiciais são avaliadas através da identificação do número e tipo de atividade afetada, e que pode por vezes ser apoiada numa análise quantitativa.

Nesta secção apresentam-se os mapas de risco de inundação para os períodos de retorno de 20, 100 e 1000 anos (Figura 20 – Representação do Risco de Inundação previsto na cartografia de zonas inundáveis para os vários períodos de retorno para o concelho de Coimbra), onde se verifica uma clara evolução espacial dos diferentes níveis de risco.

As áreas de risco mais elevado – *Muito alto* e *Alto* – para o Período de Retorno de 20 anos manifestam-se de forma consideravelmente restritas e localizadas, nomeadamente junto ao leito principal do rio Mondego e nas zonas mais vulneráveis do território. Conforme se consideram fenómenos de cheia de maior magnitude, isto é, $T = 100$ e $T = 1000$ (menos frequentes), constata-se uma expansão significativa dos níveis de risco *Médio* e *Alto*, com o aumento destas áreas de forma progressiva ao longo do território municipal de Coimbra.

As tendências de aumento da área de classe de maior risco por Período de Retorno observadas visualmente confirmam-se após a análise das áreas dos mapas. O nível de risco *Muito Alto* perpetua-se com uma expressão territorial bastante limitada, com semelhança de 0,1 km² entre $T = 20$ anos e $T = 1000$ anos. Em contraste, o nível *Alto* mais que duplica a sua extensão ao longo dos 3 cenários, com um aumento de 0,4 km² para 1 km² (no período temporal máximo). Destaca-se no nível *Médio* uma tendência crescente, com valores apresentados a variarem entre 12,6 km² em $T = 20$ anos para 21,1 km² em $T = 100$ anos e 27 km² em $T = 1000$ anos. Outrora, regista-se progressivamente uma diminuição das áreas dos níveis de risco *Baixo* e *Muito Baixo*, onde se verifica na última uma redução de 16,1 km² para 7,2 km², à medida que o período de retorno aumenta.

Na figura 20 apresenta-se o Risco de Inundação para os vários Períodos de Retorno – 20, 100 e 1000 anos, para o concelho de Coimbra.

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

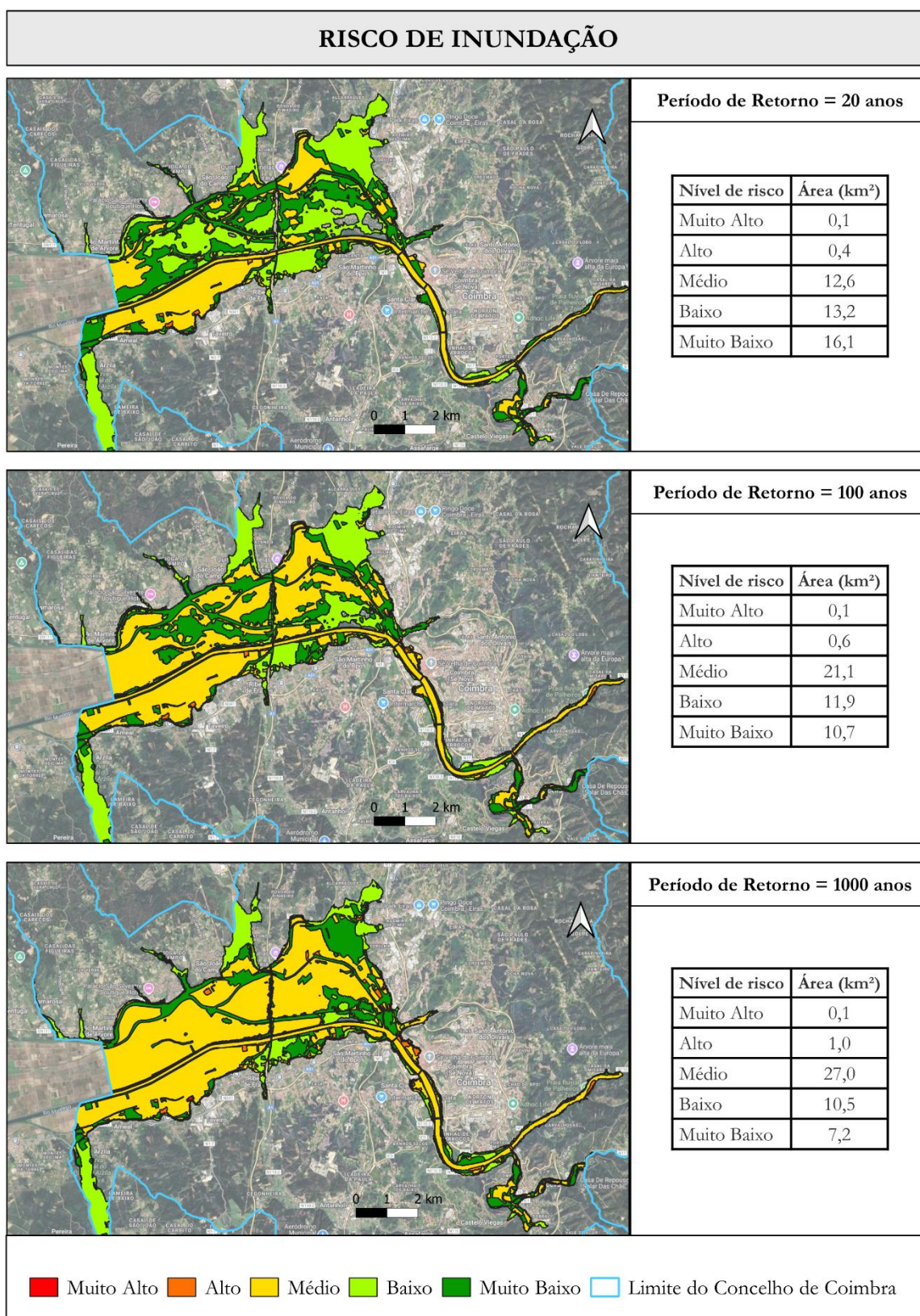


Figura 20 - Representação do Risco de Inundação previsto na cartografia de zonas inundáveis para os vários períodos de retorno para o concelho de Coimbra

7.3 Prova de Conceito – Teste de KPI

Após o Método *Delphi*, tornou-se possível evidenciar KPI's com maior concordância, ou seja, os indicadores mais importantes para um bom funcionamento de um sistema de alerta de previsão de cheias e inundações, de acordo com o painel de especialistas em causa. Ao longo desta seção, será apresentado e explorado como prova de conceito um dos nove indicadores que registou máxima concordância na segunda ronda do Método *Delphi* - Áreas Inundadas Previstas e Reais.

7.3.1 Áreas Inundadas Previstas e Reais

Conforme apresentado no Capítulo 5, derivado da revisão da literatura, o indicador «Áreas Inundadas Previstas e Reais» assenta na seguinte definição: “Um mapa de inundação permite, para cada evento, analisar o perfil de risco de uma amostra de um inventário de edifícios, ao aplicar os modelos baseados na observação e na simulação, com posterior comparação da sua semelhança no contexto da incerteza e da estimativa de vulnerabilidade”.

Para explorar este KPI, definiu-se como referência duas informações cartográficas:

- Limite da Área de Inundação, proveniente da Cartografia de Risco de Inundação para as áreas previstas;
- Cartografia relativa à Inundação de Janeiro de 2001, evento histórico onde se registou um caudal em Coimbra perto do limiar de colapso nas infraestruturas hidráulicas no Baixo Mondego, em conformidade com a afirmação de Proença Cunha (2002) presente no Capítulo 4.

A escolha deste indicador como Prova de Conceito incidiu na máxima concordância nele verificada, por via do Método *Delphi*, e que culminou com a disponibilidade relativamente ao acesso à informação adequada para o abordar de forma rigorosa e científica – dados abertos georreferenciados providos pelo governo português.

Na sequência da análise da Cartografia de Zonas Inundáveis, que incluem a Perigosidade, Consequência/Exposição e Risco de Inundação, a um nível mais generalizado aos limites do concelho de Coimbra, segue-se uma análise mais direcionada para a Cartografia de Risco de Inundação, especificamente o Limite da Área de Inundação, tendo em conta o Indicador abordado e Área de Interesse em causa.

7.3.1.1 Área Inundada na Cheia de 2001

Com recurso à cartografia disponibilizada pelo Dados.GOV - Portal de Dados Abertos da Administração Pública, foi possível consultar as zonas inundadas durante a cheia de Janeiro de 2001 em Coimbra. Esta informação cartográfica, conhecida

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

pelo programa Polis como o limite máximo de cheia nesse mesmo ano, foi calculada com base nos níveis hidrométricos registados na cheia de 27 de janeiro de 2001, com recurso ao modelo HEC-1 e com a incorporação dos perfis transversais obtidos no levantamento topográfico efetuado pela extinta DGRAH (Direção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos).

Na figura 21 apresentam-se as zonas inundadas causadas pela cheia de janeiro de 2001, bem como o perfil do rio Mondego em períodos normais - perfil este disponibilizado pelo *Copernicus*, satélite europeu.

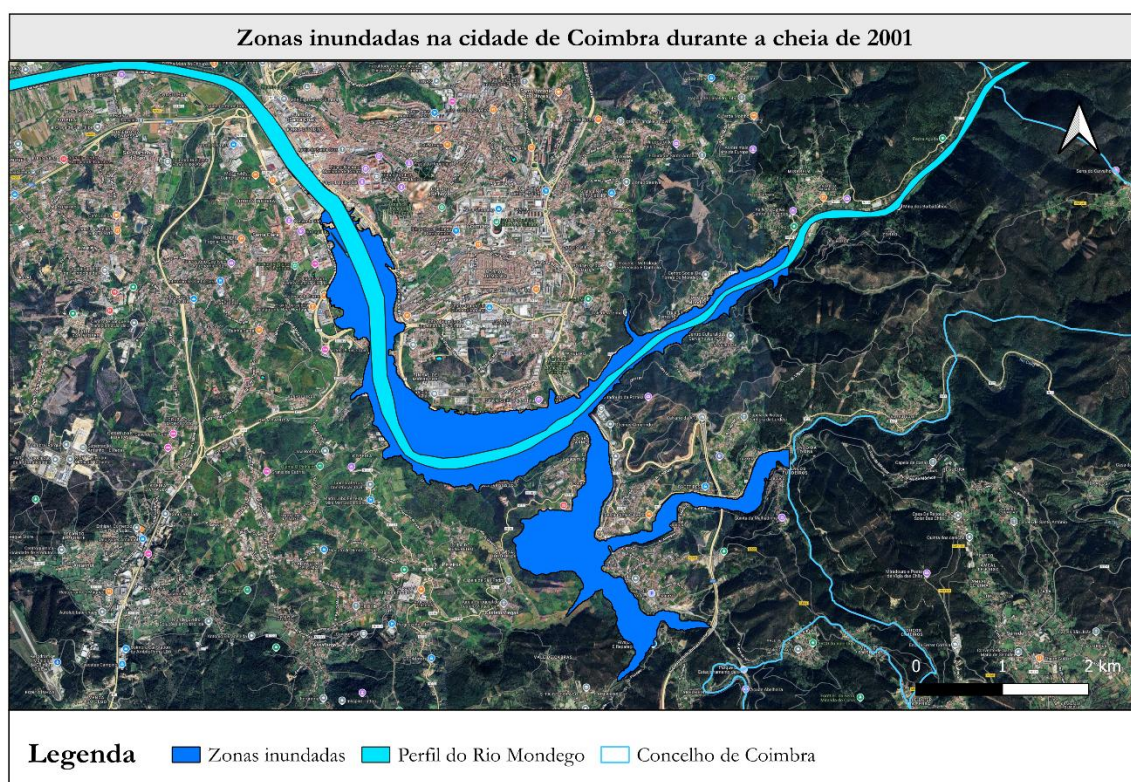


Figura 21 - Representação das zonas inundadas na cheia de 2001 e do perfil do rio Mondego em períodos normais

7.3.1.2 Área de Interesse

No sentido de definir a Área de Interesse, recorreu-se à informação disponibilizada pelos Censos de 2021: não diretamente os dados estatísticos, mas, as grelhas quadriculadas com 1 km² cada uma, que assumem um papel delimitador das áreas pertinentes. Foram selecionadas 3 grelhas que abrangem uma área total de 3 km², o que permite uma análise crítica mais aprofundada.

Atendendo às zonas historicamente mais vulneráveis durante os fenómenos de cheia em Coimbra, e especificamente a cheia de Janeiro de 2001, selecionou-se como Área de Interesse uma zona central ribeirinha na área urbana de Coimbra, atravessada pelo rio Mondego, e cuja caracterização é apresentada na Figura 22 – Representação da Área de Interesse.

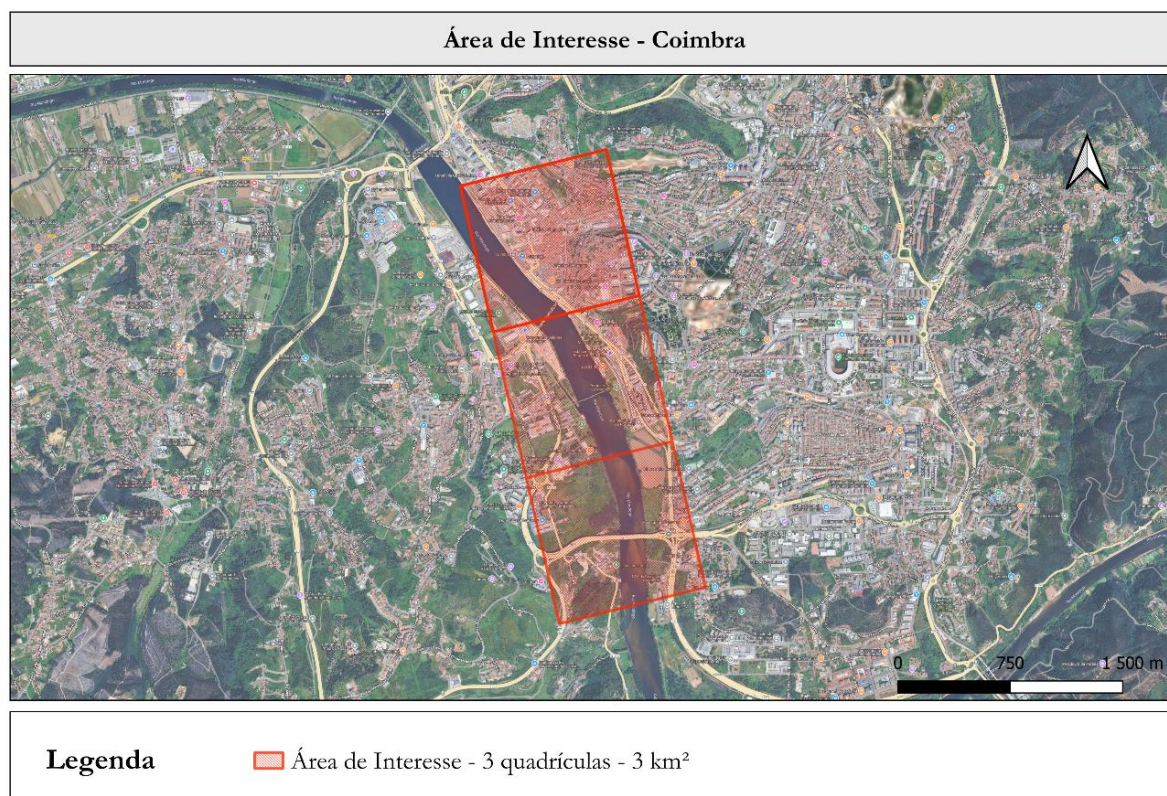


Figura 22 - Representação da Área de Interesse

7.3.1.3 Limite da Área de Inundação

A partir da Cartografia de Risco de Inundação foi possível extrair a previsão dos Limites da Área de Inundação para os três Períodos de Retorno – 20, 100 e 1000 anos, tal como está presente nas figuras 23, 24 e 25, respetivamente.

Em cada uma destas três figuras apresentam-se dois mapas: à esquerda um mapa que representa apenas o polígono delimitador da área de inundação prevista em tons de verde, que escurece à medida que aumenta o Período de Retorno; e no mapa da direita é apresentado o limite da área de inundação simultaneamente, porém com a sobreposição do perfil do rio Mondego, que se destaca num polígono azul.

A figura 26 corresponde à junção das figuras 23, 24 e 25, onde se verifica a sobreposição dos três limites para os três Períodos de Retorno – 20, 100 e 1000 anos, respetivamente. Além desta sobreposição de camadas, a camada do perfil do Rio Mondego é incorporada também, ao mesmo estilo das figuras anteriores. Este tipo de análise permite visualizar a expansão e evolução das áreas dos limites de inundação à medida que o Período de Retorno aumenta.

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

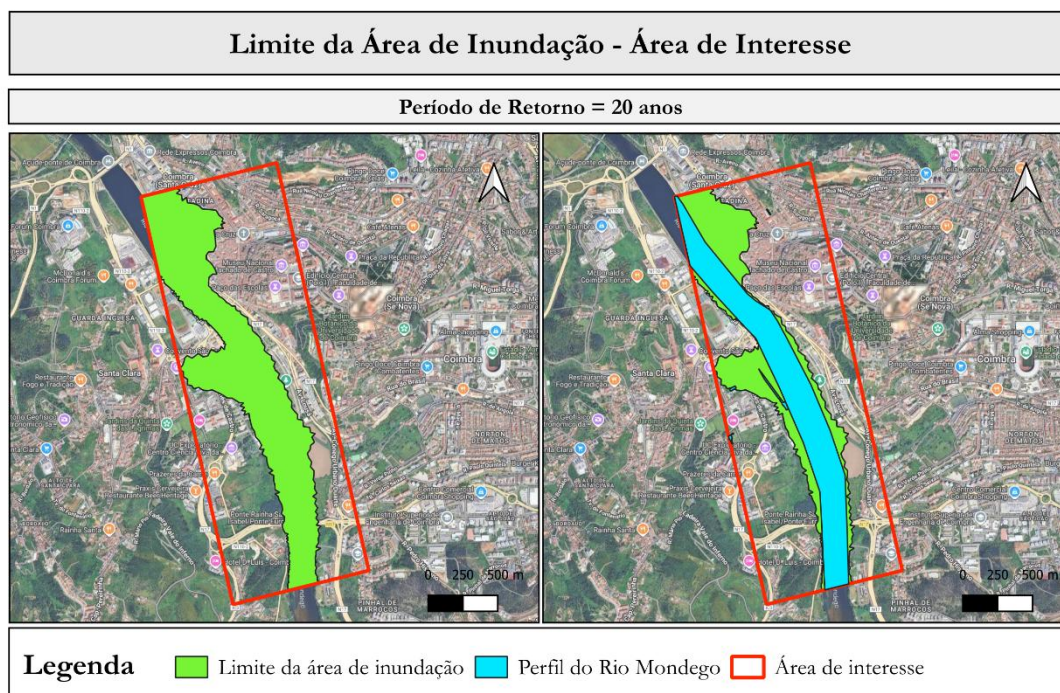


Figura 23 - Representação dos Limites da área de inundação e do perfil do rio Mondego para um Período de Retorno de 20 anos

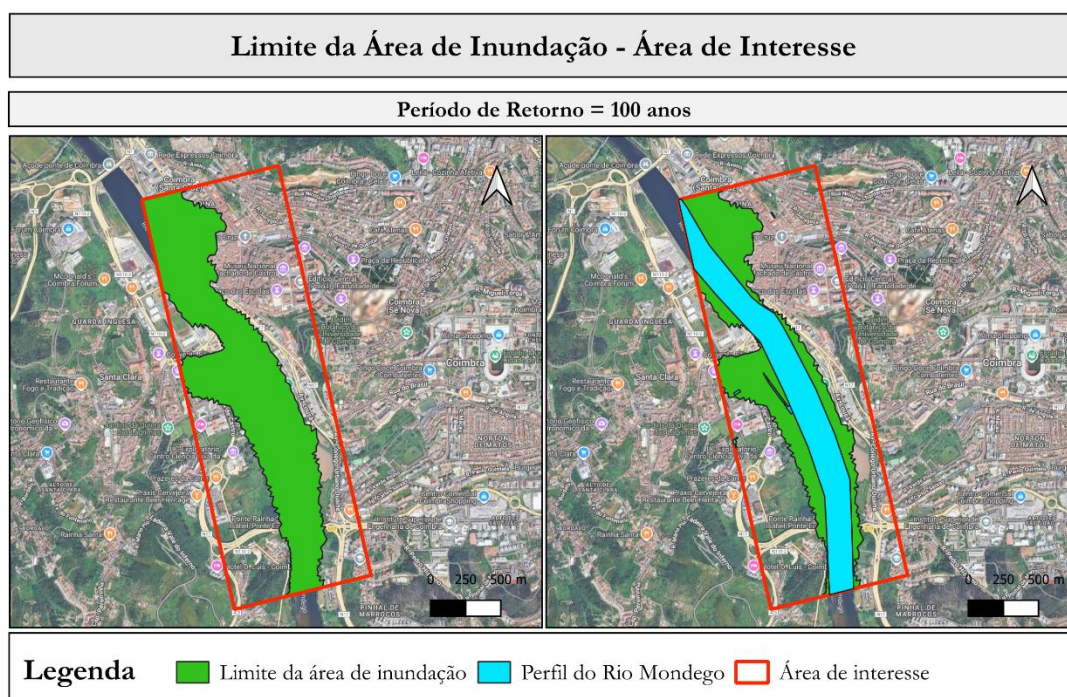


Figura 24 - Representação dos Limites da área de inundação e do perfil do rio Mondego para um Período de Retorno de 100 anos

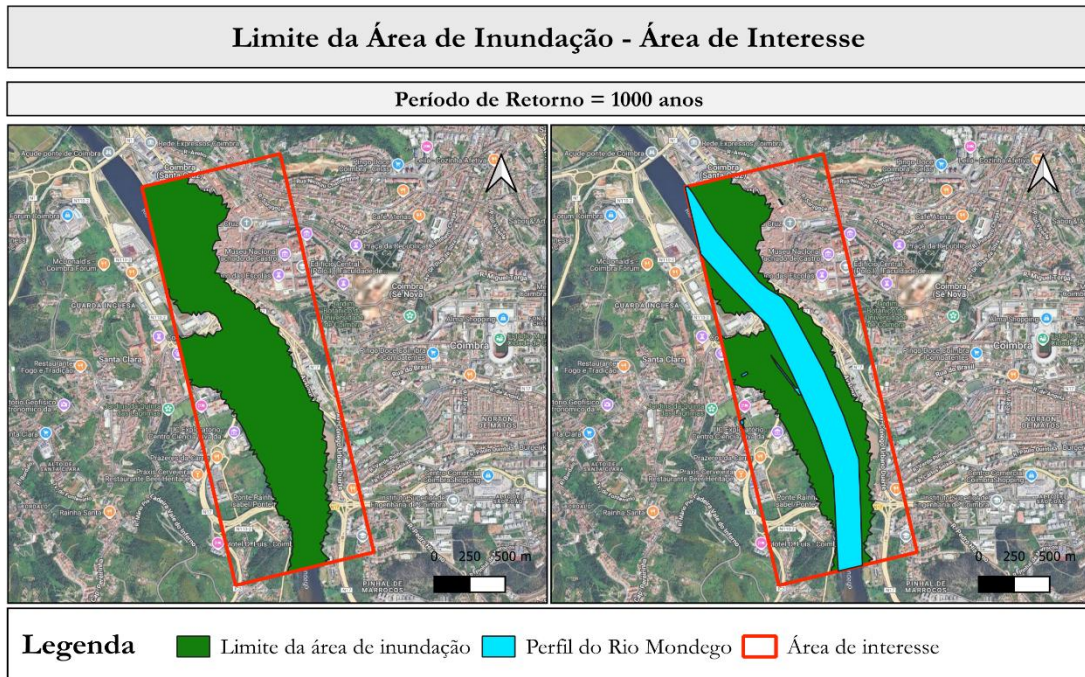


Figura 25 - Representação dos Limites da área de inundação e do perfil do rio Mondego para um Período de Retorno de 1000 anos

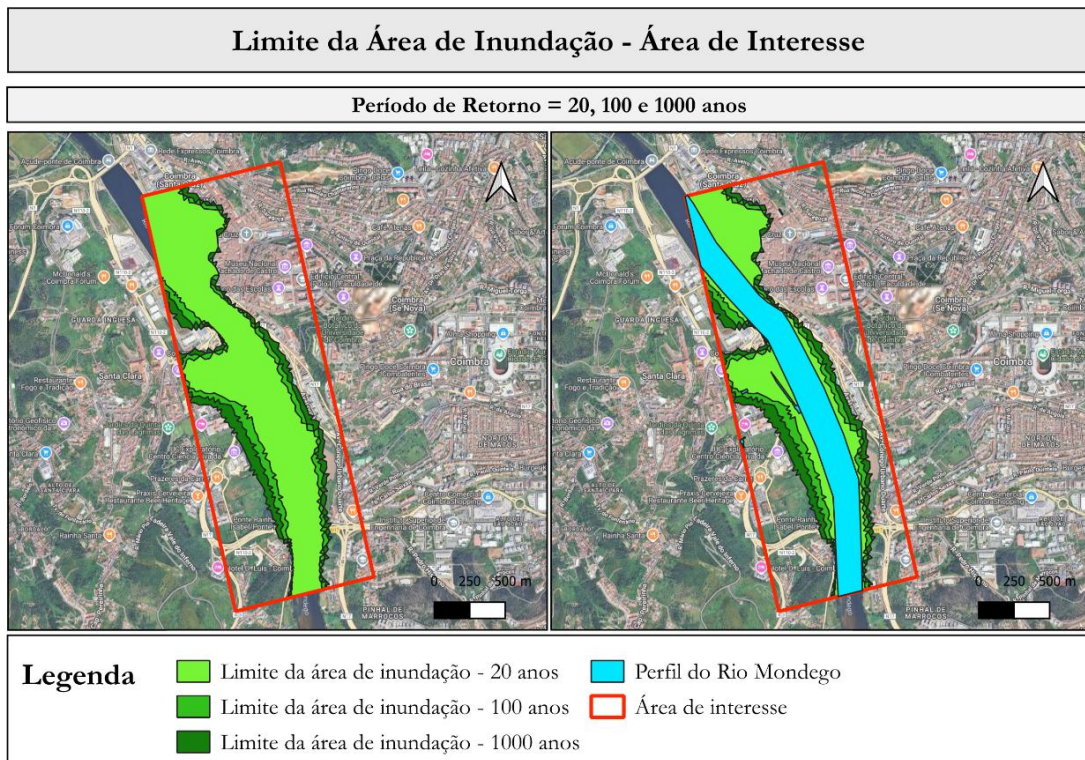


Figura 26 - Representação dos Limites da área de inundação e do perfil do rio Mondego para todos os Períodos de Retorno (junção)

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

Com recurso à calculadora de atributos do QGIS, efetuou-se o cálculo das áreas de cada uma das camadas que representam os limites de inundação para os diferentes Períodos de Retorno (20, 100 e 1000 anos), tal como está simbolizado na tabela 17 – Área dos limites de inundação em km² para os períodos de retorno.

Tabela 17 - Área dos limites de inundação em km² para os períodos de retorno

Área de Interesse - 3 km ²	
Limite da área de inundação	Área (km ²)
Período de Retorno - 20 anos	1,01
Período de Retorno - 100 anos	1,18
Período de Retorno - 1000 anos	1,37

7.3.1.4 Zonas Inundadas na Área de Interesse

Após visualizar as áreas de inundação na cheia de 2001 na figura 21 para o concelho de Coimbra, verifica-se a necessidade de especificar e aplicar a informação cartográfica para a Área de Interesse. A área total inundada dentro da Área de Interesse é de 1,18 km². Dessa forma, a figura 27 representa as zonas inundadas provocadas pelo fenómeno de cheia no mapa da esquerda, bem como a interseção do perfil normalizado do rio sobreposto com as zonas inundadas no mapa da direita.

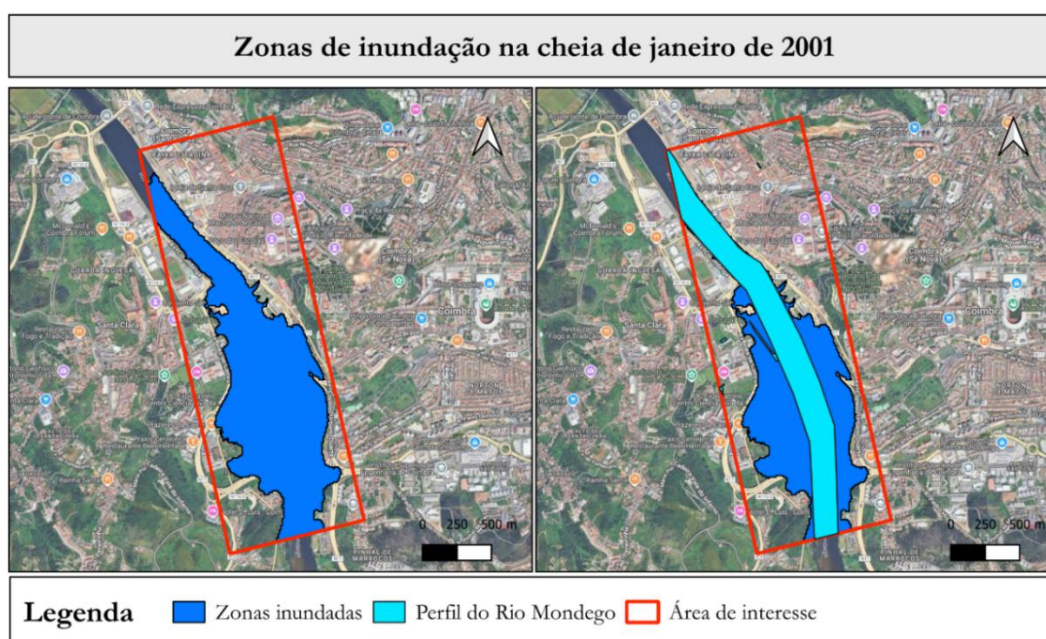


Figura 27 - Representação das zonas de inundação à esquerda, com a interseção do perfil do Rio Mondego nas zonas inundadas à direita

7.3.1.5 Comparação de Áreas Inundadas e Limites Previstos de Inundação

De forma a cumprir com a génese do KPI «Áreas Inundadas Previstas e Reais», aplicar-se-á a metodologia desenvolvida ao longo deste subcapítulo.

De um lado, temos os limites vetoriais das áreas de inundação previstos para os vários Períodos de Retorno – informação disponibilizada pelo SNIG oriunda da APA – e por outro, temos a informação cartográfica relativa às zonas inundadas no evento de cheia de janeiro de 2001, um dos mais marcantes na história de Coimbra.

A sobreposição das quatro camadas sobrepostas na figura 28 - três camadas de áreas previstas e uma de área real, comprova a dimensão catastrófica da cheia de 2001.

No mapa da esquerda da figura 28, apresentam-se os limites das áreas de inundação previstos que estão sobrepostos às zonas inundadas em 2001, e no mapa da direita, as zonas inundadas sobrepõem os limites de inundação previstos.

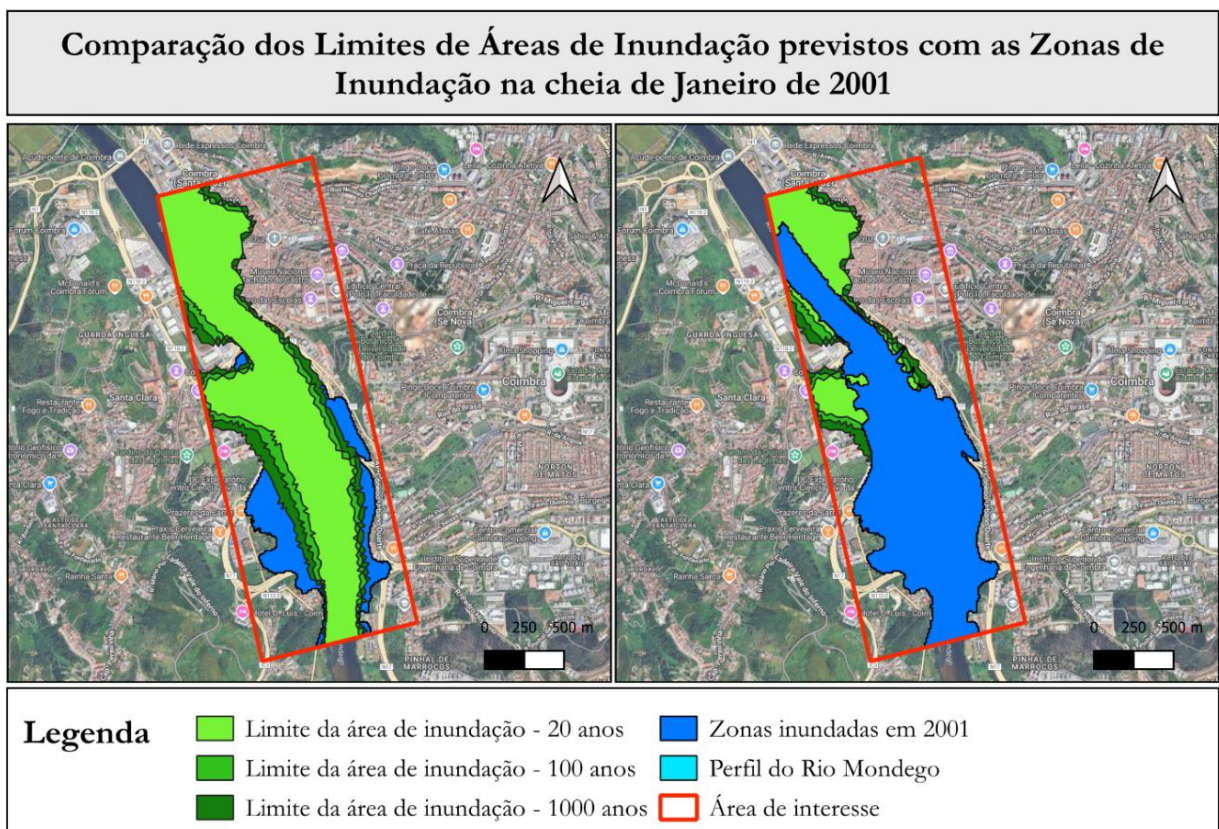


Figura 28 - Comparação dos limites de áreas de inundação previstos com as zonas de inundação do evento de cheia de janeiro de 2001 em Coimbra

Dessa forma, no mapa da esquerda visualiza-se a sobreposição dos limites de inundação para 20, 100 e 1000 anos, e no mapa da direita vemos a extensão real da cheia de 2001. Após a observação dos mapas, conclui-se que a mancha azul da cheia de 2001 cobre praticamente toda a área prevista para o período de 20 anos, e ultrapassa em algumas zonas os limites para 100 e 1000 anos. Por conseguinte, é notório que a cheia de 2001 atingiu maior extensão na sua área do que o limite previsto para 20 anos, embora não abranja de forma sistemática essa mancha na totalidade.

Existem limites previstos pela APA como inundáveis, especificamente em zonas mais periféricas, que se encontram dentro do limite de 1000 anos e que não foram atingidos na cheia de 2001. Pode igualmente ser feita uma interpretação da cheia de 2001 com o cruzamento das áreas previstas pela APA. O evento de 2001 teve uma magnitude superior ao cenário de 20 anos compreendido nos limites da área de inundação.

A sobreposição apresentada na figura 28 aparenta uma semelhança da área inundada com o limite de inundação para 100 anos, tanto que área é precisamente igual em ambos os casos - 1,18 km². Como é visível nos mapas, a cheia de 2001 não atingiu o total de área prevista para um período de retorno de 1000 anos.

Importa analisar espacialmente as zonas afetadas e as que poderão vir a ser afetadas. Desse modo, analisou-se as zonas efetivamente inundadas em 2001 e zonas previstas como inundáveis:

a. Zonas inundadas em 2001

As zonas inundadas são visíveis na margem direita do rio – Baixa de Coimbra – que inclui uma parte significativa de área urbanizada, entre os quais as ruas da Baixa de Coimbra e zonas próximas da Estação ferroviária; margem esquerda – Santa Clara, zona ribeirinha – que incluem áreas adjacentes ao rio, nomeadamente zonas baixas junto ao Portugal dos Pequenitos e o mosteiro de Santa Clara-a-Velha, vulneráveis por tradição; e o leito de cheia natural, onde se verifica o galgamento de várias zonas agrícolas e espaços abertos junto às margens, nomeadamente a jusante da Ponte de Santa Clara.

b. Zonas previstas como inundáveis

Como já mencionado anteriormente, as zonas do limiar de inundação estão previstas para três períodos de retorno: 20, 100 e 1000 anos. Ao analisar o mapa da esquerda da figura 28, verifica-se para o período de 20 anos que este abrange áreas ribeirinhas adjacentes ao rio, ou seja, zonas que são inundadas de forma recorrente em eventos desta dimensão, e é notório que muitas destas zonas coincidem com as zonas efetivamente inundadas em 2001.

Para um período de 100 anos, verifica-se uma mancha semelhante à que representa a cheia de 2001, embora a primeira se estenda para zonas mais periféricas, especificamente na margem direita do rio como a zona da Baixa de Coimbra,

Portagem, e também na margem esquerda. Desse modo, podemos aproximar o cenário presenciado em 2001 com o limiar previsto para um período de retorno de 100 anos, tendo em conta as áreas que se mantêm vulneráveis a cheias mais severas.

Para o período de retorno de 1000 anos, é possível denotar que este abrange zonas mais extensas e com maior altitude, que não foram atingidas em 2001, visto que estas áreas correspondem a cenários raros extremos, porém através das previsões, verifica-se uma certa potencialidade em se tornarem situações excepcionais.

c. Comparação

Em suma, verifica-se que as zonas inundadas em 2001 coincidem em grande parte com os cenários previstos para 20 e 100 anos, embora existam zonas previstas que não foram atingidas em 2001, nomeadamente limites previstos para cenário de 1000 anos. Esta comparação pode revelar aparentemente alguma imprecisão, que pode ser justificada com uma sobreavaliação da área efetivamente inundada em 2001 ou uma mal definição para os cenários de período de retorno para 20, 100 e 1000 anos.

Consequentemente, conclui-se:

- O evento de 2001 foi mais grave que um evento típico de 20 anos – as áreas abrangidas também o indicam - período de retorno de 20 anos com uma área de 1,01 km² e a cheia de 2001 com 1,18 km²;
- A extensão da inundação verificada em 2001   compatível com o cenário de 100 anos de período de retorno, também comprovado pela semelhança da área de ambos - 1,18 km²;
- O cenário previsto para um período de retorno de 1000 anos não se concretizou em 2001, embora apresente alguns indícios dessa magnitude. Ainda assim, este panorama serve como um aviso prévio para as potenciais consequências do risco máximo, que representa a maior área - 1,37 km².

8 CONCLUSÕES

Ao longo da dissertação, procurou-se identificar e validar indicadores de desempenho que pudessem ser aplicados num sistema de alerta de previsão de cheias e inundações, no sentido de avaliar a sua eficácia e relevância relativamente ao caso de estudo – cidade de Coimbra - com a posterior seleção de um indicador, submetido a uma prova de conceito para teste da sua aplicabilidade prática.

Neste último capítulo, são apresentadas várias considerações finais no âmbito das ideias centrais que foram desenvolvidas nos capítulos anteriores, bem como os principais resultados e as possibilidades de trabalho futuro.

8.1 Principais conclusões

O trabalho efetuado constitui um relevante contributo para o desenvolvimento e estudo de sistemas de alerta de previsão de cheias e inundações em contexto urbano, com foco especial na cidade de Coimbra. Apresentou-se uma sólida revisão literária, de forma genérica e sistemática, com a posterior aplicação de metodologias inovadoras, onde se destacam a extração e validação de indicadores de desempenho (KPI) através do Método *Delphi*. Este método permitiu selecionar os KPI (indicadores de desempenho) com maior concordância por parte dos especialistas, que originou posteriormente a prova de conceito, onde foi explorada a importância de um KPI, suportada em cartografia digital homologada e com recurso a ferramentas de processamento – Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Os elevados níveis de concordância nos resultados obtidos após o Método *Delphi* revelam a pertinência dos KPI identificados. Embora a máxima concordância (100%) tenha sido consensual após o fim da segunda ronda, importa referir a redução da adesão ao método da primeira para a segunda ronda, passando de vinte e três para nove especialistas, respetivamente. Na primeira ronda não se verificou concordância a 100% em nenhum indicador, onde oito indicadores em dezasseis obtiveram pontuação acima dos 90%. Na segunda ronda, após descartar indicadores com menor pontuação e acrescentar outros sugeridos pelo painel de especialistas, constatou-se que nove indicadores em vinte e um apresentaram concordância máxima. Podemos considerar que houve determinado consenso entre os especialistas mas sem ignorar a diminuição de respostas, que condicionou os resultados, tornando-os mais homogêneos.

Com recurso à cartografia, procurou-se analisar o caso de estudo – Coimbra. A apresentação de mapas temáticos com o cálculo das áreas por nível de Perigosidade,

Consequência/Exposição e Risco de Inundação para três Períodos de Retorno serviu para enquadrar as Cartas de Zonas Inundáveis disponibilizadas pelo SNIG e dessa forma passar ao próximo passo: comparar a cartografia descritiva de um indicador que obteve máxima concordância com a cartografia de risco oficial.

Desse modo, comparou-se a cartografia do limite de risco de inundação para os três Períodos de Retorno (20, 100 e 1000 anos), após a definição da área de interesse. Esse limiar previsto de inundação permitiu contrastar com os limites excedidos durante o evento de inundação de 2001, representado também em cartografia oficial. A análise espacial indica que a cheia de 2001 se enquadra em cenários elevados de severidade, o que confirma a importância da integração deste tipo de *datasets*. O cruzamento de informação proveniente de diferentes entidades revelou um nível interessante de coordenação interinstitucional (Anexo D), tratando-se também de um indicador submetido a prova de conceito, derivado da exploração do KPI – Áreas Inundadas Previstas e Reais – e que se trata de um aspeto fundamental para a eficácia de um sistema de alerta eficiente.

Do ponto de vista prático, verificou-se a importância da aplicação das ferramentas digitais de geoprocessamento, por permitirem a validação de indicadores, bem como a capacitação e apoio ao planeamento urbano e à proteção civil municipal. Embora com algumas limitações, o estudo apresenta resultados consistentes e aplicáveis, com potencial utilidade futura relativamente à construção e desenvolvimento de sistemas de alerta mais automatizados e robustos. Em síntese, este trabalho alia rigor científico a uma clara utilidade prática, em que oferece contributos precisos para mitigar o risco provocado pelas inundações urbanas e para aumento da resiliência das comunidades historicamente mais vulneráveis a este tipo de fenómeno.

8.2 Possibilidades de Trabalho Futuro

Este projeto de investigação não se esgota na presente dissertação, uma vez que, em termos de trabalho futuro, existem linhas de desenvolvimento que podem ser seguidas. O trabalho aqui desenvolvido corresponde somente a uma etapa num longo caminho relativamente à investigação e aplicação de sistemas de alerta para a previsão de cheias e inundações urbanas. Considerando a ideia inicial, que passaria pela construção de um modelo a aplicar num sistema de alerta de previsão de inundações, e tendo em conta o contexto académico em que o trabalho se enquadra, com as respetivas restrições temporais, a abordagem convergiu para a identificação e validação de indicadores com relevância na implementação de um sistema de alerta.

A revisão da literatura permitiu extrair informação relativa à hidrologia que culminou com o estudo dos seus impactos em meio urbano, especialmente nas cidades. O Anexo A apresenta os conceitos relativos à Drenagem Urbana, os efeitos, bem como estratégias de mitigação inteligentes, como por exemplo os Sistemas de Drenagem

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

Urbana Sustentáveis. Esta conjectura pode ser aprimorada no futuro, com o objetivo de estudar a capacidade que os novos sistemas e tecnologias têm de prever, resolver ou mitigar os fenômenos de cheias e inundações.

Dada a natureza do tema e o potencial das tecnologias emergentes, pretende-se continuar o estudo, efetuando uma profunda validação de indicadores, com a integração de técnicas de Inteligência Artificial (Anexo B) – conceitos como *Data Mining*, *Machine Learning* – com o intuito de otimizar a previsão e detecção dos fenômenos de inundação. A inclusão de vários algoritmos, apresentados no Anexo B, permitirá a análise de um grande volume de informação, nomeadamente dados meteorológicos, hidrológicos e hidráulicos que alimentarão os respetivos modelos.

Outra linha de investigação, complementar à anterior, deverá ter por base a obtenção e ampliação de dados e a automação na recolha dos mesmos em tempo real. Numa fase inicial da dissertação, destaca-se o contacto efetuado com o CEO de uma empresa no sentido de explorar dados provenientes de estações meteorológicas e hidrométricas. A informação acabou por me ser entregue, onde se verificava os dados registados pelas estações pertencentes à Região de Coimbra durante o ano civil de 2024. A utilização desta informação passaria pela integração em plataformas de análise de dados, como o Power BI ou ferramentas equivalentes, com o objetivo de detetar padrões de comportamento associados à ocorrência de cheias e inundações. Contudo, esta análise não se verificou devido à profundidade da informação fornecida, aliada às restrições temporais acima referidas.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adesina, M., Brake, N., & Hariri Asli, H. (2025). *A survey of flood warning sensor network operational and maintenance practices across the United States*. *Developments in the Built Environment*, 23, 100689;
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2015). *Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis (RH4): 2.º ciclo de planeamento – Parte 2*. Lisboa: Agência Portuguesa do Ambiente, I.P;
- Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. (2022). *Plano de Gestão dos Riscos de Inundações da RH4A – Vouga, Mondego e Lis, 2022-2027*. Lisboa: Agência Portuguesa do Ambiente;
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2022). *Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis (RH4A): 3.º Ciclo 2022–2027, Parte 2, Volume A – Anexo II: Fichas das Massas de Água Fortemente Modificadas e Artificiais*. Lisboa: Agência Portuguesa do Ambiente, I.P;
- Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. (2023). *Plano de Gestão dos Riscos de Inundações da RH1 – Minho e Lima (PGRI RH1): 2.º ciclo de planeamento 2022-2027*. Lisboa: Agência Portuguesa do Ambiente;
- Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. (2016). *Plano de Gestão dos Riscos de Inundações: Região Hidrográfica 4 – Vouga, Mondego e Lis (PGRI RH4), 2016-2021*;
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2016). *Plano de Gestão dos Riscos de Inundações: Região Hidrográfica 6 – Sado e Mira, 2016–2021*. Lisboa: Agência Portuguesa do Ambiente, I.P;
- Albino, C. I. C. (2013). *Sistemas urbanos de drenagem de águas residuais e pluviais: Contributo para a análise da problemática da interferência dos dois tipos de sistemas – caso de estudo: Cidade de Olhão (Relatório de mestrado, Universidade do Algarve)*. Universidade do Algarve;
- Alves, C. C. S. (2011). *Métodos e medições de caudais: Análise e comparação de diversos métodos hidrométricos (Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa)*;

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

- Alves, F. L., & Ascensão, E. (2007). Ficha de atividades nº 13-B – Bacia Hidrográfica. *SETA* – Sociedade Portuguesa para o Desenvolvimento da Educação e Turismo Ambientais;
- Andrade, J. A. (2011). A água no sistema climático (Apontamentos para aulas de microclimatologia dos habitats). Departamento de Geociências, Universidade de Évora;
- Andrade, J., & Basch, G. (2017). Clima e estado do tempo. Fatores e elementos do clima. Classificação do clima. In S. Shahidian, R. C. Guimarães & C. M. Rodrigues (Eds.), *Hidrologia agrícola* (2.^a ed., pp. 23–71). Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade de Évora & ICAAM – Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas;
- Anselmo, F. C. G. (2017). Regras de associação – *market basket analysis*: Itens frequentes e itens raros (Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto);
- Baptista, F. M. D. S. (2023). Soluções para a minimização do efeito das cheias no Parque Oriental do Porto [Dissertação de Mestrado, FEUP];
- Belousov, S. L., Berkovich, L. V., Sitnikov, I. G., & Shnaidman, V. A. (2003). *Mathematical modeling in meteorology and weather forecasting*. In *Mathematical Models of Life Support Systems* (Vol. I). Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), UNESCO;
- Bertoni, J. C., & Tucci, C. E. M. (2001). Precipitação. In C. E. M. Tucci (Org.), *Hidrologia: Ciência e aplicação* (4.^a ed., pp. 177 – 242). Editora da Universidade/UFRGS; Associação Brasileira de Recursos Hídricos;
- Biffi, V. H. R., Santos, M. V., & Terassi, P. M. B. (2021). Aplicação das leis de Horton na bacia hidrográfica do rio Quatro, alto rio Uruguai, sul do Brasil. Anais do XII Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar (EPCC);
- Boiten, W. 2000, *Hydrometry, the Delft Lecture Note Series*;
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS 5.0 Reference Manual* (CPD-69). U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center;
- Butler, D., Digman, C., Makropoulos, C., & Davies, J. W. (2018). *Urban drainage* (4th ed.). CRC Press/Taylor & Francis Group;
- Caetano, P. M. D. (2025). Aplicação da ferramenta *Scorecard (Disaster Resilience Scorecard for Cities)* na avaliação da resiliência urbana. Perspetiva da proteção civil nas inundações urbanas em Coimbra (Dissertação de Mestrado, Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra);

- Camacho, R. F. (2015). Caracterização, simulação (à escala) e modelação do escoamento em canais artificiais: Aplicação a caso de estudo (Dissertação de mestrado, Universidade da Madeira). Universidade da Madeira;
- Cardielos, J. P. (Coord.), Lobo, R., Peixoto, P., Mota, E., Duxbury, N., & Caiado, P. (2015). Mondego: o surdo murmúrio do rio. Imprensa da Universidade de Coimbra;
- Carriço, N., & Ferreira, B. (2023). Estudo do impacto das alterações climáticas numa bacia de drenagem urbana: Caso de aplicação. In XVII Congreso Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento, Saneamiento y Riego (SEREA23): Smart Water – Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes (pp. 1–8). INCITE, Instituto Politécnico de Setúbal;
- Casado, J. L., Martínez Marco, I., Fernández-Peruchena, C. M., Gastón, M., Garcia-Moya, J. A., Manzano, A., & Martín, A. (2016). *Deterministic and probabilistic weather forecasting* (Technical Report D4.3, PreFlexMS, H2020 Grant No. 654984). Agencia Estatal de Meteorología; CENER;
- Castelo Branco, J. H. A. (2022). Redes de drenagem de águas pluviais – Bacias de retenção – Modelação de um caso de estudo (Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto);
- Castro, M. A. T. A. (2003). Agrupamento – “*Clustering*” (Projeto de Licenciatura, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Informática);
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill;
- Coelho, P. F. (2018). Modelos de *Data Mining* como Serviço – Interpretação de Imagens (Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia);
- Conde, R. A. N. G. (2007). Análises de sensibilidade em modelação numérica de escoamentos em leito móvel com *HEC-RAS*. Aplicação ao rio Mondego (Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa);
- Conselho de Ministros. (2016, 20 de setembro). Resolução do Conselho de Ministros n.º 52/2016, que aprova os Planos de Gestão das Regiões Hidrográficas de Portugal Continental (Minho e Lima, Cávado, Ave e Leça, Douro, Vouga e Mondego, Tejo e Ribeiros Oeste, Sado e Mira, Guadiana e Ribeiros do Algarve). Diário da República;
- Correia, C. D. D. (2017). *Data mining e data quality* em dados da saúde (Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia);

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

- Costa, F. da S. (2020). Riscos de inundação e suas manifestações. Em L. Lourenço & A. Vieira (Coords.), *Catástrofes naturais: Uma abordagem global* (pp. 71–118). Imprensa da Universidade de Coimbra;
- Costa, J. F. P. da. (2018). Indicadores de desempenho para a gestão de projetos de sistemas de informação (Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia);
- Costa, V. L. N. M. M. (2019). Trabalho em grupo no ensino de geografia: Aplicação aos riscos de cheia e inundação (Relatório de Estágio de Mestrado, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra);
- Cunha, T. F. M. da. (2019). Detecção de falsos alertas de intrusão em redes de computadores (Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores);
- Dalkey, N. C., & Helmer, O. (1963). *An experimental application of the Delphi method to the use of experts*. *Management Science*, 9(3), 458–467;
- De la Fuente, A., Meruane, C., & Meruane, V. (2025). *Ensemble weather-runoff forecasting models for reliable flood early warning systems*. *Progress in Disaster Science*, 26, 100420;
- Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de outubro. *Diário da República*, 1.ª série, n.º 206;
- Decreto-Lei n.º 2/2019, de 11 de janeiro (2019). *Diário da República*, 1.ª série, n.º 8, 105-108;
- Decreto-Lei n.º 23/95, de 23 de agosto. Aprova o Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais (Anexo I). *Diário da República*, 1.ª série-A, n.º 195, 23-08-1995;
- Devesa e Cunha, P. N. B. (2010). Medição de caudais em rios: Métodos tradicionais versus novos equipamentos (Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
- Diakakis, M., Skordoulis, M., & Kyriakopoulos, P. (2022). *Public perceptions of flood and extreme weather early warnings in Greece*. *Sustainability*, 14(16), 10199;
- Doran, G. T. (1981). *There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives*. *Management Review*, 70(11), 35–36;
- Falck, A., Tomasella, J., & Papa, F. (2021). *Assessing the potential of upcoming satellite altimeter missions in operational flood forecasting systems*. *Remote Sensing*, 13(21), 4459;

- Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., & Smyth, P. (1996). *From data mining to knowledge discovery in databases*. *AI Magazine*, 17(3), 37–54;
- Fernandes, S. A. M. (2019). *Reinforcement Learning para problemas de otimização* (Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto);
- Fernández-Nóvoa, D., García-Feal, O., González-Cao, J., de Gonzalo, C., Rodríguez-Suárez, J. A., Ruiz del Portal, C., & Gómez-Gesteira, M. (2020). MIDAS: *A new integrated flood early warning system for the Miño River*. *Water*, 12(9), 2319;
- Ferreira, B. A. S. (2018). *Seleção de atributos usando árvores de decisão não-binárias* (Dissertação de Mestrado, Universidade Lusíada – Norte, Faculdade de Engenharias e Tecnologias);
- Ferreira, F. M., Matos, J. S., & Marecos, H. (2000). O comportamento de sistemas pseudo-separativos em zonas urbanas costeiras. In 6º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (pp. 1–11). Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos;
- Ferreira, J. P. L. (2016). *Sistema de previsão e alerta de cheias e inundações para as bacias dos rios Selho e Este* (Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho). Universidade do Minho, Escola de Engenharia;
- Ferreira, S. M. (2022). *Inundações em meio urbano: o caso da cidade de Olhão* (Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Faculdade de Letras);
- Fraga, I., Cea, L., Puertas, J., Mosqueira, G., Quinteiro, B., Botana, S., Fernández, L., Salsón, S., Fernández-García, G., & Taboada, J. (2021). MERLIN: Una nueva herramienta para la predicción del riesgo de inundaciones en la demarcación hidrográfica Galicia-Costa. *Ingeniería del Agua*, 25(3), 215–227;
- Franco, G. B., Souza, C. M. P., Betim, L. S., Marques, E. A. G., Gomes, R. L., & Chagas, C. S. (2011). Diagnóstico ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Almada (BA). *Geografia (Londrina)*, 20(3), 71–94;
- González-Cao, J., Barreiro-Fonta, H., Fernández-Nóvoa, D., & García-Feal, O. (2025). *Enhancing flood risk management: A review on numerical modelling of past flood events*. *Hydrology*, 12(6), 133;
- GeeksforGeeks. (2025, 27 janeiro). Gráfico ilustrativo de formação de *clusters* em *Machine Learning* [Imagem]. GeeksforGeeks: Clustering in Machine Learning;

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

- Girão, L. F. de O. (2014). Modelação hidráulica e de qualidade da água de sistemas de drenagem em meios urbanos [Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra]. Estudo Geral;
- Goerl, R. F., Kobiyama, M., & Santos, I. (2012). Hidrogeomorfologia: Princípios, conceitos, processos e aplicações. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 13(2), 143–154;
- Góis, A. R. A. de. (2023). O impacto da Inteligência Artificial nas Relações Públicas (Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Comunicação Social);
- Gueirez, J. E. J. (2014). Árvores de decisão desequilibradas para deteção de erros em transações de comércio externo usando técnicas de *data mining* (Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto);
- Guimarães, R. C., Shahidian, S., & Rodrigues, C. M. (Eds.). (2017). *Hidrologia Agrícola* (2ª ed.). ECT e ICAAM. Universidade de Évora;
- Guimarães, R. C. (2017). Capítulo 2 – Bacias hidrográficas e Capítulo 5 – Escoamento superficial. In S. Shahidian, R. C. Guimarães & C. M. Rodrigues (Eds.), *Hidrologia agrícola* (2.ª ed. rev. e ampl., pp. 21–48). Universidade de Évora, Escola de Ciência e Tecnologia & ICAAM – Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas;
- Hammood, W. A., Abdullah Arshah, R., Mohamad Asmara, S., Al Halbusi, H., Hammood, O. A., & Al Abri, S. (2021). *A systematic review on flood early warning and response system (FEWRS): A deep review and analysis*. *Sustainability*, 13(1), 440;
- Hu, Z., & Xing, E. P. (2022). *Toward a 'Standard Model' of Machine Learning*. *Harvard Data Science Review*, 4(4), artigo e1;
- IBM. (2023). *What are weather models?* IBM Think. Recuperado em 18 de setembro de 2025, de <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/weather-models>;
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (s.d.). Previsão numérica do tempo. Em *Enciclopédia IPMA* [Página web]. Recuperado em 28 de julho de 2025, de <https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/otempo/previsao.numerica/index.html>;
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T. F. Stocker et al., Eds.). Cambridge University Press;
- Kampf, S. K., Burges, S. J., Hammond, J. C., Bhaskar, A., Covino, T. P., Eurich, A., Harrison, H., Lefsky, M., Martin, C., McGrath, D., Puntteney-Desmond, K., & Willi, K. (2020). *The case for an open water balance*:

Re-envisioning network design and data analysis for a complex, uncertain world. Water Resources Research, 56(6), e2019WR026699;

- Lages, A. C. L. (2023). Detecção de Pose 3D de Utilizadores Humanos e Posterior Interação (Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia);
- Leal, M. (2019). Cheias e inundações urbanas: Tipos, características e danos materiais. In *Água e Território: Um tributo a Catarina Ramos* (pp. 131–146). Centro de Estudos Geográficos, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, ULisboa;
- Leitão, R. I. M. N. (2014). Sustentabilidade na gestão do ciclo urbano da água: Simulação e análise de cenários (Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia);
- Lencastre, A. (2018). Regularização fluvial do Baixo Mondego (Memórias da Academia das Ciências de Lisboa, Tomo XLV). Academia das Ciências de Lisboa;
- Lencastre, A. e Franco, F. M. (1992) - Lições de Hidrologia. Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa;
- Lírio, M. A. R. (2022). Bacias de retenção em redes de drenagem urbanas: Funcionamento hidráulico (Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto);
- Lopes, J. P. P. (2017). Modelação hidrológica das bacias hidrográficas de Monte Novo e Vigia em cenários de alterações climáticas (Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa);
- Lourenço, L., & Nunes, A. (Coords.). (2022). Risco de cheias e risco de inundações fluviais: Aprender com o passado (1.ª ed.). RISCOS – Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança;
- Lourenço, R. R. A. (2014). Sistemas urbanos de drenagem sustentáveis (Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Instituto Politécnico de Coimbra);
- Louro, S., & Lourenço, L. (2005). O comportamento hidrológico do rio Mondego perante valores de precipitação intensa, em Coimbra. *Territorium*, (12), 19–27;
- Lousada, S. A. N., & Camacho, R. F. (2018). Hidrologia, recursos hídricos e ambiente: aulas teóricas (1.ª ed., Vol. I) [Manual]. Universidade da Madeira, Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia. ISBN 978-989-8805-33-1;

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

- Machado, F. M. C. (2013). Modelação hidráulica de sistemas urbanos de drenagem sustentável [Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra];
- Machado, H., & Silva, S. (2024). Desafios sociais e éticos da inteligência artificial no século XXI. Braga: UMinho Editora;
- Madruga, L. M. C. (2013). Análise do escoamento na bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Couto de Andreiros com recurso a sistemas de informação geográfica [Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa]. Repositório do IST;
- Maia, R., Andrade, J., Alemi, M., & Mendes, J. (2020). Sistema integrado para a previsão e alerta de cheias na parte portuguesa de um rio transfronteiriço. Aplicação à zona ribeirinha de Ponte de Lima. *In Actas do XI Congresso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua* (pp. 438–447). Fundación Nueva Cultura del Agua;
- Malardel, S. (2025). *Weather forecasting models*. Encyclopédie de l'Environnement;
- Manoel, J. L. (2016). Levantamento e análise das densidades de drenagens das bacias hidrográficas dos rios Aguapeí e Peixe. XVIII Encontro Nacional de Geógrafos;
- Marchezini, V., Londe, L. R., Bernardes, T., Conceição, R. S., dos Santos, E. V., Saito, S. M., Soler, L., da Silva, A. E. P., Bortoletto, K. C., Medeiros, M. D. S., & Gonçalves, D. A. (2017). Sistema de alerta de risco de desastres no Brasil: desafios à redução da vulnerabilidade institucional. *In Reduction of vulnerability to disasters: from knowledge to action* (pp. 287–308);
- Marques, J. A. A. de Sá, & Pina, R. D. (2013). Previsão ou gestão de cheias? Um caso de estudo numa cidade de média dimensão: Coimbra (UC-826). Centro de Coordenação para o Desenvolvimento da Região Centro (CCDRC);
- Martins, W. A. X. (2016). Drenagem urbana: Centro histórico de Leiria (Dissertação de mestrado, Instituto Politécnico de Leiria, Escola Superior de Tecnologia e Gestão);
- Matias, E. M. A. (2016). Avaliação do impacto dos órgãos de entrada no comportamento dos sistemas de drenagem urbanos (Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia);
- Mendes, J. M. M. (2017). Previsão e alerta de cheias em bacias regularizadas: Aplicação ao caso de uma bacia portuguesa (Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto);
- Mesquita, M. F. S. (2008). *An approach to the clustering of correlated data* (Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Informática);

- Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. (2002). Plano de Bacia Hidrográfica do Mondego (PBHM). Decreto Regulamentar n.º 9/2002, de 1 de março. Diário da República, I Série-B, n.º 51, 1695–1705;
- Miranda, A. (Fotógrafo). (2016, 16 de fevereiro). [Fotografia de cheias no Mondego]. Em C. Soldado & S. C. Andrade, “Assoreamento no Mondego aumentou impacto das cheias em Coimbra”. Público;
- Miranda, O. L. (2011). Comparação dos modelos hidráulicos *HEC-RAS e LISFLOOD-FP* na avaliação do risco de inundação num troço do Rio Lis (Dissertação de Mestrado, Universidade de Évora, Departamento de Engenharia Rural);
- Mostaghimzadeh, E., Ashrafi, S. M., Adib, A., & Geem, Z. W. (2021). *Investigation of forecast accuracy and its impact on the efficiency of data-driven forecast-based reservoir operating rules*. *Water*, 13(19), 2737;
- Mourato, S., Fernandez, P., Marques, F., Rocha, A., & Pereira, L. (2021). *An interactive Web-GIS fluvial flood forecast and alert system in operation in Portugal*. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 58, 102201;
- Mourato, S. de J. M. (2009). Modelação do impacto das alterações climáticas e do uso do solo nas bacias hidrográficas do Alentejo (Tese de doutoramento, Universidade de Évora). Universidade de Évora;
- Naghettini, M. (2012). Introdução à hidrologia aplicada [Notas de aula]. Universidade Federal de Minas Gerais;
- Nevo, S., Elidan, G., Hassidim, A., Shalev, G., Gilon, O., Nearing, G., & Matias, Y. (2020). *ML-based flood forecasting: Advances in scale, accuracy and reach*. arXiv preprint arXiv:2012.00671;
- Nigussie, L., Bekele, T. W., Haile, A. T., Mdee, A., Nicol, A., Cohen, J., Osei-Amponsah, C., Tedla, Z. H., & Demissie, K. (2025). *Does a citizen science approach enhance the effectiveness of flood early warning systems? Evidence from the Akaki Catchment, Ethiopia*. *Citizen Science: Theory and Practice*, 10(1), 9, 1–14;
- Nunes, A. & Pardal, J., (Coords.). (2021). Guia de boas práticas: Resiliência e adaptação aos riscos naturais e tecnológicos em territórios de baixa densidade (XIV Encontro Nacional de Riscos – ENR). Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança (RISCOS);
- Nunes, A., & Pardal, J. (Orgs.). (2021). Risco de cheias e risco de inundações fluviais: O exemplo da área ribeirinha do rio Mondego na cidade de Coimbra / *Flood risk and river flood risk: The example of the riverside area of the Mondego River in the city of Coimbra*: Livro-guia da visita técnica, XIV Encontro Nacional de Riscos, Coimbra, 16–17 de julho de 2021. RisCos – Associação Portuguesa

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

de Riscos, Prevenção e Segurança; Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra. ISBN 978-989-9053-02-1;

- Oliveira, V. I. P. S. (2022). A integração das redes hidrográficas e pluviais no ciclo urbano da água: Problemas, perspetivas, implicações e soluções (Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto);
- Oliveira, V. M. A., Paiva, G. S., Prates, C. A. B., & Rotta, B. M. M. (2023). Caracterização física das bacias hidrográficas das áreas verdes de Presidente Prudente/SP. *Colloquium Exactarum*, 15, 1–12;
- Olszewski, N., Fernandes Filho, E. I., Costa, L. M., Reynaud Schaefer, C. E. G., Souza, E., & Vinhas Costa, O. D. (2011). Morfologia e aspectos hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Preto, divisa dos estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais. *Revista Árvore*, 35(3), 485–492;
- Paiva, I. (2019). Risco de inundação em Coimbra: Fatores físicos e ação antrópica. As inundações urbanas e as cheias do Mondego (1950-51 / 2003-04). Fundação Eng. António de Almeida, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra;
- Paiva, I. M. R. (2011). A educação ambiental no contexto da investigação em hidrologia: As cheias do Mondego e as inundações urbanas em Coimbra enquanto caso de estudo. In L. Cunha & R. Jacinto (Coords.), *Interioridade/Insularidade – Despovoamento/Desertificação: Paisagens, riscos naturais e educação ambiental em Portugal e Cabo Verde* (pp. 259–277). Centro de Estudos Ibéricos;
- Palma, J. M. M. da. (2018). Implementação e validação do modelo de previsão meteorológica *Weather Research and Forecasting* para Portugal Continental (Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa);
- Pappenberger, F., Cloke, H. L., Parker, D. J., Wetterhall, F., Richardson, D. S., & Thielen, J. (2015). *The monetary benefit of early flood warnings in Europe*. *Environmental Science & Policy*, 51, 278–291;
- Pardal, J., Cunha, L., Tavares, A. O., Pinto dos Santos, P., & Leitão, L. (2022). Impactos das grandes cheias do rio Mondego na região de Coimbra: uma resenha histórica. In L. Lourenço & A. Nunes (Coords.), *Risco de cheias e risco de inundações fluviais: Aprender com o passado* (pp. 75–108). RISCOS – Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança;
- Parmenter, D. (2010). *Key performance indicators: Developing, implementing, and using winning KPIs* (2nd ed.). John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-54515-7;
- Lima, J. (Coord.), Martins, C. M. T., Mendes, M. G. T., Abreu, J. M., Almeida, J. P. L., & Pedroso de Lima, I. (2010). *Hidrologia urbana – Conceitos básicos*

(Série Cursos Técnicos 1). Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR); Universidade de Coimbra;

- Pereira, J. J. R. (2005). Modelos de *data mining* para multi-previsão: aplicação à medicina intensiva (Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia);
- Pessoa, P. I. (2024). Árvores de decisão com *splitting* oblíquo (Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Departamento de Matemática);
- Pião, J. T. R. (2013). Influência da contração lateral em diferentes saídas de caixas de visita (Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra);
- Pinto, N. L., Holtz, A. C. T., Martins, J. A., & Gomide, F. L. S. (1976). Hidrologia básica (2ª ed.). Editora Blucher;
- Pires, D. M. T. E. (2020). *Reinforcement Learning* aplicado ao *trading* (Dissertação de Mestrado, Instituto Universitário de Lisboa, ISCTE, Faculdade de Ciências);
- Proença, J. M. (2020). O aproveitamento hidráulico do Mondego e a redução do risco de inundação do Baixo Mondego [Apresentação]. XIV Encontro Nacional de Riscos, Universidade de Coimbra. Agência Portuguesa do Ambiente;
- Proença Cunha, P. (2002). Vulnerabilidade e risco resultante da ocupação de uma planície aluvial – o exemplo das cheias do rio Mondego (Portugal central), no Inverno de 2000/2001. *Territorium*, (9), 13–28;
- Quintela, A. C. (1996). Hidrologia e Recursos Hídricos. Instituto Superior Técnico. Lisboa;
- Raimundo, F. J. S. N. (2021). Melhorar a Sustentabilidade da Irrigação usando *Machine Learning* (Dissertação de Mestrado, ISCTE-IUL);
- Ramos, C. (2009). Perigos naturais devidos a causas meteorológicas: O caso das cheias e inundações. Centro de Estudos Geográficos, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa;
- Regulamento (UE) 2024/1689 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de junho de 2024, relativo a regras harmonizadas em matéria de inteligência artificial (Regulamento da Inteligência Artificial). *Jornal Oficial da União Europeia*, L 1689, 12.7.2024;
- Renascença. (2016, 13 de janeiro). Cheias em Coimbra: EDP não se compromete com estragos em mosteiro;

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

- Rocha, J. S. (1998). O risco das inundações e a sua gestão: Uma visão nacional e uma visão europeia. Comunicação apresentada no Congresso da Água 98, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, Lisboa;
- Rocha, J. S., Antunes do Carmo, J. S., Lemos, L. J. L., Dias da Silva, V., & Rebelo, C. A. S. (2008). Pontes construídas sobre fundos aluvionares: O colapso da ponte Hintze Ribeiro. *Recursos Hídricos*, 29(2), 41–57. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos;
- Rodrigues, C. M. (2017). Capítulo 4 – Precipitação. In R. C. Guimarães, S. Shahidian & C. M. Rodrigues (Eds.), *Hidrologia Agrícola* (2ª ed., pp. 81–118). ECT e ICAAM, Universidade de Évora;
- Rodrigues, C. M., Shahidian, S., & Guimarães, R. C. (2017). Capítulo 5 - Escoamento superficial. In S. Shahidian, R. C. Guimarães, & C. M. Rodrigues (Eds.), *Hidrologia Agrícola* (2.ª ed., pp. 119–132). Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade de Évora; ICAAM – Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas;
- Rojas, E. M. (2020). *Machine Learning: análisis de lenguajes de programación y herramientas para desarrollo*. Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação, E28, 586–599;
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2010). *Artificial intelligence: A modern approach* (3rd ed.). Pearson Education. ISBN 978-0-13-604259-4;
- Sá, F. A. A. N. de. (2016). Metodologia para Avaliação do Governo Electrónico Local Online (Tese de doutoramento). Universidade de Vigo;
- Sá Marques, J. A., Mendes, P. A., & Seabra Santos, F. J. (2005). Cheias em áreas urbanas: A zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra. [Artigo];
- Sá Marques, J. A., Simões, N. E., & Seabra Santos, F. (2022). Contributos do Laboratório de Hidráulica da Universidade de Coimbra para o estudo das cheias do Mondego. In L. Lourenço & A. Nunes (Coords.), *Risco de cheias e risco de inundações fluviais: Aprender com o passado* (pp. 53–74). RISCOS – Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança;
- Samansiri, S., Fernando, T., & Ingirige, B. (2023). *Critical failure factors of flood early warning and response systems (FEWRS): A structured literature review and interpretive structural modelling (ISM) analysis*. *Geosciences*, 13(5), 137;
- Sampaio, G., & Silva Dias, P. L. (2014). Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima. *Revista USP*, 103, 41–54;
- Santos, A. R. (2019). *Forecasting Portuguese inflation rate: A comparison between classical econometric models and machine learning algorithms* (Dissertação de Mestrado, Instituto Universitário de Lisboa, ISCTE Business School);

- Santos, D. P. (2014). Mitigação do impacto das alterações climáticas na drenagem urbana (Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia);
- Santos, L. L. (2009). Modelos hidrológicos: Conceitos e aplicações. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 2(3), 1–19;
- Santos, M. S. M. (2015). Análise hidro-meteorológica de cheias na região Norte de Portugal (Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território);
- Santos, P. M. P. dos. (2015). Cheias e inundações: Avaliação, impactos e instrumentos para a gestão do risco (Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território). Universidade de Lisboa;
- Sena, H. A. V. V. (2012). Técnicas de *data mining* aplicadas à melhoria de gestão de medicamentos: estudo de uma farmácia comunitária (Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho);
- Shahidian, S., Guimarães, R. C., & Rodrigues, C. M. (Eds.). (2017). *Hidrologia Agrícola* (2.^a ed.). Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade de Évora; ICAAM – Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas;
- Silva, A. F. F. (2013). Modelação em SIG de um sistema de drenagem superficial urbano / *Modelling in GIS of an urban superficial drainage system* (Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Matemática);
- Silva, M. F. (2023). Responsabilidade civil dos entes dotados de inteligência artificial (Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Escola de Direito). Orientação: Prof^a Doutora Eva Sónia Moreira Silva;
- Simão, H. M. M., & Sá Marques, J. A. A. (2022). Sistemas urbanos de drenagem sustentável. In J. F. Silva Gomes *et al.* (Eds.), *Proceedings CLME2022/VICEM - 9º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia / VI Congresso de Engenharia de Moçambique* (pp. 621–623). INEGI/FEUP;
- Sousa, A. J. T. da S. (2022). Aplicação de técnicas de *machine learning* para a previsão de processos industriais (Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia). Orientador: Professor Doutor Paulo Alexandre Ribeiro Cortez;
- Spörl, C., Castro, E. G., & Luchiari, A. (2011). Aplicação de redes neurais artificiais na construção de modelos de fragilidade ambiental. *Revista do Departamento de Geografia – USP*, 21, 113–135;

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

- Suquina, P. D. S. O. (2019). Estudo e construção de árvores de decisão: aplicação ao ensino (Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Escola de Ciências);
- Tavares, A. O., & Cunha, L. (2008). Perigosidade natural na gestão territorial: O caso do Município de Coimbra. *A Terra: Conflitos e Ordem*, 89–100;
- Temido, J. (2011). Cheias de 22 a 31 de janeiro de 2001, Coimbra, vista a partir da margem esquerda [Fotografia]. ResearchGate;
- Terêncio, H. (2017). O Mondego a caminho do Portugal 2020 [Apresentação em PowerPoint]. Câmara Municipal de Coimbra;
- Tien, I., Lozano, J.-M., & Chavan, A. (2023). *Locating real-time water level sensors in coastal communities to assess flood risk by optimizing across multiple objectives*. *Communications Earth & Environment*, 4(96), 1–13;
- Tucci, C. E. M. (1997). Inundações urbanas. In C. E. M. Tucci (Org.), *Hidrologia: Ciência e aplicação* (pp. 1–29). Editora da Universidade/UFRGS, ABRH;
- Turban, E., Sharda, R., Delen, D., & King, D. (2011). *Business intelligence: A managerial approach* (2nd ed.). Pearson Education. ISBN 978-0-13-610066-9;
- União Europeia. (2007). Diretiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de outubro de 2007, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 288, 27–34;
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2017). *Early warning system*. Em *The Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction*;
- U.S. Army Corps of Engineers. (s.d). *HEC-HMS, Hydrologic Modeling System: HEC Fact Sheet*. Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC);
- U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (s.d). Visualização da interface do *software HEC-HMS* [Imagem]. *HEC-HMS: Hydrologic Modeling System*. Recuperado em setembro de 2025, de <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>;
- Vairinhos, J. L. E. (2017). Modelação hidráulica de sistemas urbanos de drenagem sustentável: Aplicação de soluções de controlo na origem a um caso de estudo (Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia);
- Vale, B. M. M. (2020). Avaliação da gestão de albufeiras para cenários de alterações climáticas (Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto);
- Vasco, J. R. J. (2016). Sistemas urbanos de drenagem sustentável (Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa);

- Veiga, M. A. G. T. (2021). Ética e adoção da inteligência artificial (Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Economia e Gestão, Universidade de Lisboa);
- Veladas, R. G. (2021). Classificação automática de eventos na linha de saúde SNS24 (Dissertação de Mestrado, Universidade de Évora, Escola de Ciências e Tecnologia);
- Villela, S. M., & Mattos, A. (1975). Hidrologia aplicada. McGraw-Hill do Brasil;
- Willems, P., Olsson, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Beecham, S., Pathiara, A., Bülow Gregersen, I., Madsen, H. e Nguyen, V.T.V. (2012). *"Impacts of Climate Change on Rainfall Extremes and Urban Drainage Systems"*. IWA Publishing, London;
- Wing, O. E. J., Quinn, N., Bates, P. D., Neal, J. C., Smith, A. M., Sampson, C. C., Coxon, G., Yamazaki, D., Sutanudjaja, E. H., & Alfieri, L. (2020). *Toward global stochastic river flood modeling*. Water Resources Research, 56(8), e2020WR027692;
- Wright, J. T. C., & Giovinazzo, R. A. (2000). Delphi – Uma ferramenta de apoio ao planejamento prospectivo. Caderno de Pesquisas em Administração, 1(12), 54–65;
- Zhong, M., Xiao, L., Zhang, Q., & Jiang, T. (2021). *Risk perception, risk communication, and mitigation actions of flash floods: Results from a survey in three types of communities*. Sustainability, 13(22), 12389;
- Zhou, Q. (2014). *A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts*. Water, 6(4), 976–992.

ANEXOS

ANEXO A – DRENAGEM URBANA

A interação entre a atividade humana e o ciclo natural da água obriga à necessidade de sistemas de drenagem em áreas urbanas desenvolvidas (Butler *et al.*, 2018). Para os autores, a drenagem urbana assume duas formas principais: a captação de água do ciclo natural para fornecimento para a vida humana e a cobertura do solo com superfícies impermeáveis que desvirtuam a água proveniente da chuva do sistema natural de drenagem local. Estes explicam que ambas as interações originam dois tipos de águas requerentes de drenagem: águas pluviais e águas residuais. Nesse sentido, Girão (2014), caracteriza os dois tipos de água que necessitam de condução pelos sistemas de drenagem:

- i. Águas pluviais – resultam da precipitação atmosférica e consequente formação de escoamentos superficiais, que se não forem devidamente controlados, podem originar inundações com os danos materiais e humanos que lhes são adjacentes;
- ii. Águas residuais – provêm da utilização da água pela população para fins domésticos e industriais, que sem drenagem e tratamento conveniente, podem originar poluição e problemas de saúde para a população.

Albino (2013) reforça o ponto anterior, afirmando que a existência de interferências nos sistemas de drenagem urbana tem consequências negativas quer nos sistemas de águas pluviais – afluência e ligações indevidas de águas residuais; quer nos sistemas de águas residuais – infiltração e afluência de águas pluviais, águas do mar e do nível freático. A drenagem urbana apresenta um conjunto clássico de desafios ambientais modernos, refere Butler *et al.*, (2018), quanto à necessidade de melhorias técnicas que sejam viáveis a nível económico e social e aceitáveis de acordo com os sistemas já existentes; bem como a necessidade de avaliação do impacto dos sistemas existentes e a procura por soluções consideradas sustentáveis e resilientes.

Relativamente a esta secção, importa referir conceitos do ciclo urbano da água, efeitos da urbanização na drenagem de águas pluviais, o impacto das alterações climáticas na drenagem urbana, as estratégias de mitigação que estão a ser concebidas (soluções inovadoras), e a parte mais técnica, ao nível dos tipos de sistemas de drenagem, bem como os respetivos componentes.

Ciclo urbano da água

Leitão (2014) explica que a gestão urbana da água efetua-se tradicionalmente com base em três partes distintas, entre as quais: abastecimento de água, saneamento de águas residuais e saneamento de águas pluviais. O mesmo autor detalha que o ciclo urbano da água engloba duas componentes: componente abastecimento de água

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

(saneamento de águas residuais urbanas) e o componente precipitação (escoamento de águas pluviais):

a. Componente abastecimento de água – saneamento de águas residuais urbanas:

- I. Captação: recolha da água em captações superficiais ou subterrâneas;
- II. Tratamento de água: realizado numa ETA, para possibilitar o consumo humano da água tratada;
- III. Adução: transporte entre a ETA e os reservatórios de distribuição;
- IV. Armazenamento: a água é armazenada de forma temporária em reservatórios;
- V. Distribuição: condução da água pela rede de distribuição até aos locais de consumo;
- VI. Recolha: depois de utilização, a água dá origem a águas residuais, que têm de ser necessariamente recolhidas;
- VII. Drenagem: transporte de águas residuais desde os locais de recolha até ao local de tratamento, antes destas serem rejeitadas no meio recetor;
- VIII. Tratamento: efetuado nas ETAR, com parâmetros de descarga dependentes dos objetivos de qualidade fixados para os respetivos meio recetores;
- IX. Rejeição: lançamento das águas residuais após tratamento no meio recetor.

b. Componente precipitação – escoamento de águas pluviais:

- I. Recolha: resultantes da precipitação, as águas de escoamento superficial são conduzidas para sistemas de drenagem de águas pluviais;
- II. Drenagem: transporte das águas desde os locais de recolha até ao local de rejeição no meio recetor, com possibilidade de um eventual armazenamento temporário no percurso até ao lançamento final e/ou tratamento antes da descarga final;
- III. Rejeição: lançamento das águas pluviais no meio recetor.

Efeitos da urbanização na drenagem de águas pluviais

O processo de urbanização e o conseqüente aumento das superfícies impermeáveis nas cidades provoca vários impactos ao nível da drenagem das águas pluviais (Vairinhos, 2017). A urbanização tem vindo a aumentar, induzindo alterações nos sistemas de saneamento básico, especialmente, nos sistemas de drenagem (Girão, 2014). Matias (2016) descreve as várias alterações que a urbanização introduz nas bacias hidrográficas, entre as quais se destacam:

- Aumento do escoamento superficial devido à impermeabilização do solo e redução da infiltração de água, que provoca um escoamento mais acelerado;
- Diminuição do nível do lençol freático por via da redução da infiltração, o que reduz o escoamento subterrâneo;
- Redução da evapotranspiração devido à substituição da cobertura vegetal;
- Aumento da produção de sedimentos que obstruem as redes de drenagem;
- Deterioração da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, em função da lavagem das ruas, transporte de material sólido e ligações clandestinas.

O mesmo autor refere assim a tendência de urbanização nos próximos anos, o que obriga ao desenvolvimento de medidas que reduzam estes problemas, por parte das entidades responsáveis pelo planeamento e desenvolvimento das cidades. Tucci (1997) refere que a impermeabilização do solo provoca um aumento do escoamento superficial, o que exige maior capacidade das secções para escoamento. O mesmo autor construiu um hidrograma hipotético de uma bacia natural resultante da urbanização, representado na figura 1.1, onde se verifica o aumento do caudal máximo como efeito da urbanização.

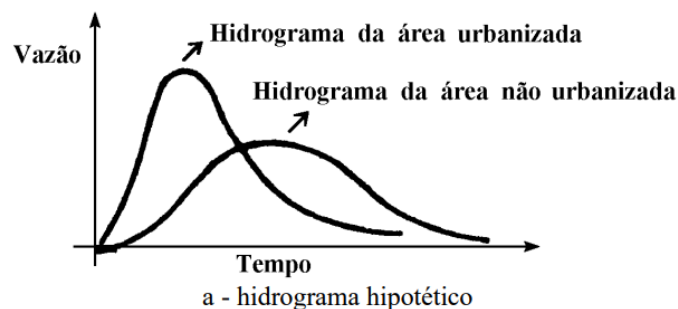


Figura 1.1 - Hidrograma hipotético (Tucci, 1997)

Impacto das alterações climáticas na drenagem urbana

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2013) define alterações climáticas como uma mudança no estado do clima que pode ser identificado por alterações na variabilidade das suas propriedades e que perdura durante um período alargado, por norma uma década ou mais. A mudança climática pode ser causada por processos naturais internos ou devido a forças externas, entre os quais se destacam: as variações dos ciclos solares, erupções vulcânicas e alterações antropogénicas que se verificam de forma contínua na composição da atmosfera e uso dos solos. As alterações climáticas e a crescente urbanização encontram-se num processo de convergência que desafiará as infraestruturas de drenagem das cidades, por via dos impactos adversos das precipitações extremas no ambiente urbano (Zhou, 2014). A alteração dos regimes de precipitação, nos quais se verifica uma diminuição do número de eventos de precipitação e um aumento da sua intensidade, tornar-se-á cada vez mais

comum, o que agrava a problemática das inundações (Carricho & Ferreira, 2023). As consequências destes fenómenos são visíveis e segundo *Willems et al.*, (2012), que cita (Berggren, 2008), podem ser: técnicas, ambientais, socioculturais, económicas e ao nível da saúde. De acordo com *Willems et al.*, (2012) e Santos, D. (2014), as consequências provocadas pelas alterações climáticas na drenagem urbana são:

- **Técnicas:** danos nos equipamentos de sistemas de drenagem urbanos e infraestruturas habitacionais, como condutas, instalações, bombas hidráulicas, erosão e deslizamentos de terras;
- **Ambientais:** aumento da concentração e propagação de poluentes e substâncias perigosas na água, solo e ar, que afetam o ambiente e os ecossistemas em contacto com essas águas;
- **Económicas:** custo dos danos, custos de tratamento do ambiente poluído e custos secundários, na eventualidade de limitações na rotina habitual da população devido a falhas nas infraestruturas;
- **Socioculturais:** desenvolvimento da desigualdade social provocada pela diferença espacial do impacto causado. Algumas populações serão mais afetadas que outras, bem como o património local, caso não existam iniciativas de adaptação às alterações climáticas.

Estratégias de mitigação dos impactos

Lourenço (2014) reflete sobre as principais diferenças entre a abordagem convencional de gestão das águas pluviais e uma abordagem alternativa na sua dissertação, onde afirma que as técnicas alternativas diferem dos sistemas de drenagem tradicionais ao nível dos seus métodos de projeto, construção e de manutenção, bem como pela capacidade de controlo das taxas de escoamento em contexto urbano, com o intuito de evitar prejuízos ambientais. Perante o cenário constante de inundações, surge a necessidade de projetar sistemas de drenagem mais eficientes e sustentáveis: conceito de drenagem sustentável, cujo principal objetivo consiste na regeneração do ciclo hidrológico natural, com recurso a novas técnicas que têm como finalidade amortecer os caudais de ponta e atenuar o nível de poluição presente nas águas das chuvas descarregadas nos meios recetores (Lourenço, 2014). Para (Lourenço, 2014) contrariamente ao sistema convencional de drenagem, no qual se processa a drenagem acelerada das águas pluviais com recurso a um sistema de coletores enterrados, a drenagem sustentável tem como objetivo controlar o escoamento superficial o mais próximo possível do local onde a precipitação atinge o solo. A redução do escoamento verifica-se consequentemente devido à infiltração do excesso de água no subsolo, evaporação, evapotranspiração e armazenamento temporário.

Simão & Marques (2022) referem a importância de maior controlo na origem das águas pluviais e necessidade de elaboração de projetos de obras pluviais de pequeno

porte, métodos de dimensionamento simples e fiáveis dispositivos de controlo. Segundo estes autores, o estudo de novas alternativas pode envolver uma combinação de diversos dispositivos ou medidas de controlo na fonte. Desse modo, e considerando apenas o aspeto quantitativo de retenção e/ou redução do escoamento superficial, sem abordar a problemática do controlo da qualidade da água, os autores destacam os seguintes sistemas: pavimentos permeáveis; trincheira de infiltração, vala de infiltração, poço de infiltração, micro-reservatório, coberturas verdes, paredes verdes, bacias de retenção e bacias de detenção. Sucintamente, as alternativas referidas anteriormente classificam-se como Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis (SUDS), que surgem como alternativa aos sistemas tradicionais e são “dimensionados e projetados” para maximização das oportunidades e benefício decorrentes do controlo das águas pluviais na origem, com o intuito de se enquadrarem na paisagem e potenciarem a infiltração (Simão & Marques, 2022). Vasco (2016) refere que o principal princípio aplicado à filosofia de dimensionamento dos SUDS é rentabilizar o maior benefício possível de caudais do escoamento de águas pluviais. O mesmo autor explica que os tipos de benefícios obtidos pela utilização dos SUDS enquadram-se em 4 pilares base:

- Controlo de caudais - gestão do risco de inundações; manutenção e proteção do ciclo natural da água;
- Qualidade da água – gestão da qualidade do escoamento de modo a prevenir a poluição;
- Amenidade – criação e manutenção de melhores lugares para as pessoas;
- Biodiversidade – criação e manutenção de melhores lugares para a natureza.

Sistemas de Drenagem

O enquadramento legislativo relativo a sistemas de drenagem assenta, como parte integrante do Decreto Regulamentar n.º23/95, de 23 de agosto, no Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais (RGSPPDADAR). O Decreto Regulamentar n.º23/95 define as diretrizes do regulamento geral dos sistemas públicos e prediais de distribuição de água e de drenagem de águas residuais, onde aborda conceitos como a conceção dos sistemas, dimensionamento, rede de distribuição e elementos acessórios, relativamente aos sistemas públicos e de distribuição predial de água, bem como aos sistemas de drenagem pública e predial de águas residuais - domésticas, pluviais e industriais (Decreto Regulamentar n.º23/95, de 23 de agosto, Anexo I). O presente regulamento define os tipos de sistemas de drenagem pública de águas residuais possíveis: unitários, separativos, mistos e separativos parciais (Decreto Regulamentar n.º23/95, de 23 de agosto, Anexo I, artigo 116º). Nas secções seguintes, apresenta-

se a breve definição dos tipos de sistemas de drenagem previstos de acordo com a regulamentação.

Sistemas Unitários

Segundo o artigo 116º do Decreto Regulamentar nº23/95, os sistemas de drenagem unitários são constituídos por uma única rede de coletores, onde se admitem conjuntamente as águas residuais domésticas, industriais e pluviais. Estes recolhem e drenam a totalidade das águas a afastar dos aglomerados populacionais, tal como indica Oliveira (2022). Lourenço (2014) refere que as águas são transportadas para uma estação de tratamento durante o tempo seco, e após tratamento são descarregadas para os meios recetores. Segundo esta, perante a ocorrência de precipitação, a capacidade do sistema ou da ETAR poderá ser insuficiente, devido aos caudais elevados e as águas residuais podem ser descarregadas diretamente nos meios recetores por via dos descarregadores de tempestade. A figura 1.2 representa de forma sistemática um sistema de drenagem unitário.

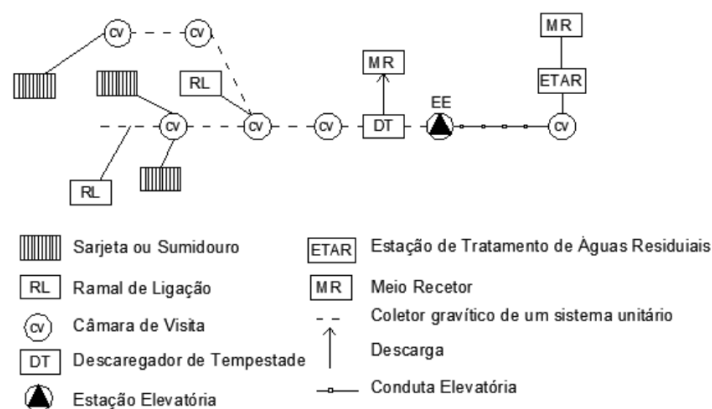


Figura 1.2 - Representação esquemática de um sistema do tipo unitário (adaptado de Rossana Lourenço, 2014)

Sistemas Separativos

O Decreto Regulamentar nº23/95 (artigo 116º) explica que os sistemas de drenagem separativos podem ser constituídos por duas redes de coletores distintas, uma destinada às águas residuais domésticas e industriais e outra à drenagem das águas pluviais ou similares. O regulamento clarifica que na conceção dos sistemas de drenagem pública, em novas áreas de urbanização, deve ser adotado em princípio, o sistema separativo. Um sistema separativo evita o problema ligado aos sistemas unitários devido às duas redes de coletores com diâmetros que resultam dos caudais afluentes e inclinações, que permitem a redução do depósito de partículas nos coletores (Martins, 2016). Este sistema apresenta um custo superior, segundo Girão (2014), tanto ao nível da infraestrutura necessária como ao nível da monitorização e limpeza dos coletores, além de ocupar uma área superior. Em contrapartida, Ferreira *et al.*, (2000) refere que a construção de sistemas do tipo separativo nem sempre revelou eficácia devido ao transporte de águas pluviais em simultâneo nas redes domésticas, em virtude da infiltração e da existência de ligações domiciliárias

errôneas, sendo assim frequente a descarga direta de excedentes nos meios recetores. Na figura 1.3 é apresentada uma esquematização do tipo separativo.

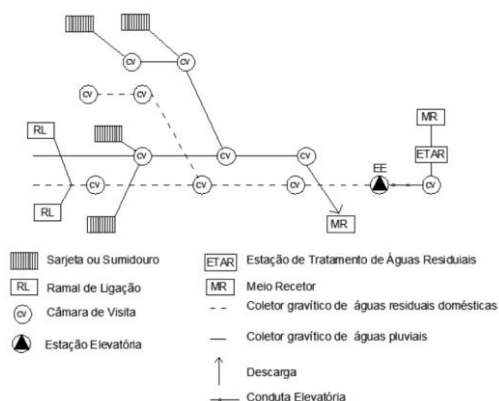


Figura 1.3 - Representação em esquema de um sistema de drenagem separativo e respetiva simbologia (adaptado de Rossana Lourenço, 2014)

Sistemas Mistos

O Decreto Regulamentar n.º 23/95 (artigo 116.º) refere que a conjugação dos sistemas unitários e separativos origina os sistemas do tipo misto, em que parte da rede de coletores funciona como sistema unitário e a restante como sistema separativo. Lourenço (2014).

Sistemas separativos parciais ou pseudo-separativos

Sistema que admite em condições excecionais, a ligação de águas pluviais de pátios interiores ao coletor de águas residuais domésticas (Decreto Regulamentar n.º 23/95, artigo 116.º). Lourenço (2014) exemplifica um sistema deste tipo - a ligação de tubagens de drenagem de telhados, pátios e logradouros à rede separativa de águas residuais domésticas devido às dificuldades físicas e construtivas de ligação à rede pluvial. Este tipo de sistema é projetado devido às dificuldades relacionadas com as inclinações adversas e grandes distâncias relativamente a coletores pluviais (Martins, 2016).

Componentes dos Sistemas de Drenagem

Na constituição dos sistemas de drenagem, segundo Castelo Branco (2022), devem-se abordar separadamente os componentes que incorporam os sistemas de drenagem de águas domésticas dos que integram as águas pluviais. O sistema de drenagem dispõe de dois componentes base: rede de coletores e elementos acessórios; porém existem por vezes instalações complementares à parte destes componentes principais mais comuns (Lourenço, 2014). De seguida, serão apresentadas breves definições dos componentes base – rede de coletores, elementos acessórios e instalações complementares.

Redes de coletores

De acordo com artigo 131º do RGSPDADAR (Decreto Regulamentar nº23/95), os coletores tem a funcionalidade de assegurar a condução de águas residuais domésticas, industriais ou pluviais, provenientes das edificações ou da via pública, ao destino final adequado.

Elementos acessórios

Conjunto de órgãos constituídos pelos dispositivos de entrada - sarjetas e sumidouros, as câmaras ou caixas de visita (Castelo Branco, 2022). O mesmo autor, que cita Lima *et al.*, (2013), não considera o descarregador como elemento acessório, mas sim como uma instalação complementar, ao contrário de Lourenço (2014):

1. Dispositivos de entrada

Os dispositivos de entrada, segundo Lourenço (2014) que cita Sousa, E. (2001), são os órgãos do sistema que garantem o acesso das águas pluviais às redes de drenagem (sarjetas de passeio e sumidouros):

- **Sarjetas de passeio** – dispositivos por norma integrados no lancil do passeio, permitindo a entrada lateral de água na rede;
- **Sumidouros** – dispositivos geralmente aplicados no pavimento que permitem a entrada de água pela parte superior;
- **Câmaras ou caixas de visita** - destinam-se à inspeção e limpeza dos coletores, a remoção de obstruções e a verificação das características de escoamento e da qualidade das águas residuais (Pião, 2013).

2. Instalações complementares

Destacam-se as bacias de retenção, câmaras de infiltração, desarenadores e instalações elevatórias (Lourenço, 2014). Castelo Branco (2022) acrescenta ainda as bacias de detenção e os descarregadores de emergência:

- **Bacias de retenção** - definidas como estruturas destinadas à regularização do escoamento pluvial afluyente, amortecendo os caudais de ponta e permitindo compatibilizar o seu valor com limites previamente fixados, de acordo com o RGSPDADAR (Decreto Regulamentarº23/95);
- **Câmara de infiltração ou drenantes** – destinam-se à retenção e infiltração da água pluvial e podem ser associadas ou não a sistemas de drenagem convencionais constituídos por coletores enterrados (Lourenço, 2014);
- **Desarenadores** - permitem a remoção de partículas com dimensão igual ou superior a 0,2mm, com o intuito de evitar a deposição de materiais granulares presentes nas águas pluviais (Lourenço, 2014);
- **Instalações elevatórias** - permitem elevar as águas para cotas superiores (Castelo Branco, 2022);

- **Bacias de detenção** - caracterizam-se por se encontrarem constantemente com água, mesmo não estando sob um evento pluviométrico (Lírio, 2022);
- **Descarregadores de emergência** - destinam-se a prevenir a sobrecarga da rede, um troço a jusante de inundar ou mesmo de prevenir a entrada de caudais superiores ao admissível nas estações de tratamento ou instalações elevatórias, caso ocorram eventos mais extremos (Lourenço, 2014).

ANEXO B – INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)

Inicialmente, foi suscitada a intenção de desenvolver a dissertação com base em conceitos de Inteligência Artificial, com a introdução de dados e posterior manipulação dos mesmos. Devido a alterações no fio condutor deste trabalho, tal não se verificou, o que limitou a pesquisa para esta temática. Ainda assim, de forma a desenvolver trabalho futuro no âmbito desta dissertação, é necessário enquadrar conceitos relativos à IA e seus ramos e componentes. Conceitos como *KDD*, *Data Mining*, *Clustering*, *RNA's*, integram de forma divergente o ramo da Inteligência Artificial, que ganhará potencialidades ao longo do tempo, com previsão de avanços significativos neste ramo. Machado e Silva (2024) no seu livro explicam que os primórdios da Inteligência Artificial (IA) remontam à década de 1950, e estão associados a três marcos históricos principais:

1. Publicação do artigo *Computing Machinery and Intelligence*, em 1950, da autoria do matemático e cientista da computação Alan Turing, que desenvolveu conceitos de algoritmo e computação por meio da máquina de Turing, e que pode ser vista como um protótipo de computador de uso geral;
2. O uso da expressão “Inteligência Artificial” pela primeira vez em 1955, num texto relativo a uma proposta de projeto sobre a Inteligência Artificial (*Proposal for the Dartmouth summer research project on artificial intelligence*);
3. Oficialização do termo Inteligência Artificial em 1956 durante a Escola de Verão na Universidade de Dartmouth, num evento que reuniu um grupo de investigadores interessados em explorar maneiras que fizessem as máquinas imitar funções cognitivas humanas, tais como a aprendizagem, raciocínio e resolução de problemas.

Embora não haja consenso entre os investigadores sobre aquilo que é a inteligência, contudo existem várias conceções comuns entre estas, como a capacidade lógica, compreensão, planeamento, autoconhecimento, criatividade, resolução de problemas e aprendizagem (Góis, 2023). O termo “artificial” é relativamente incontroverso, como explica Silva (2023), por remontar a algo sintético que não é criado pela natureza. Silva (2023) refere-se à IA como um conjunto de tecnologias em rápida evolução capaz de oferecer um vasto leque de benefícios económicos e sociais. Para o mesmo autor, diante do desenvolvimento de tecnologias que simulam a inteligência humana, os mesmos elementos e técnicas que produzem benefícios podem também trazer novos riscos ou consequências negativas para os utilizadores.

O Regulamento 2024/1689 do Parlamento Europeu e Conselho, 13 de junho de 2024 – conhecido como o Regulamento da Inteligência Artificial – estabelece as regras para a União Europeia em torno da IA, sendo o primeiro enquadramento jurídico europeu sobre esta temática. O artigo 3º do Regulamento (EU) 2024/1689 define Sistema de IA como “um sistema baseado em máquinas concebido para funcionar com níveis de autonomia variáveis, e que pode apresentar capacidade de

adaptação após a implantação e que, para objetivos explícitos ou implícitos, e com base nos dados de entrada que recebe, infere a forma de gerar resultados, tais como previsões, conteúdos, recomendações ou decisões que podem influenciar ambientes físicos ou virtuais”.

Sousa (2022) explica que a Inteligência Artificial tem como principal objetivo a procura de métodos e formas dos computadores que façam o mesmo tipo de análises que a mente humana faz sistematicamente. Embora simples de compreender, esta definição não revela a tamanha complexidade e potencial deste tema, tal como explica o mesmo autor. Russell & Norvig (2010) definem IA como o estudo de agentes recetores de perceções do ambiente e que realizam ações. Cada um desses agentes, de acordo com os autores, implementa uma função que mapeia sequências de ações e abordam diferentes formas de representar tais funções, tais como os agentes reativos, planos em tempo real e sistemas teóricos de decisão. Já Veiga (2021) que cita Wang (2019), refere que o conceito de Inteligência Artificial, tal como em grande parte das tecnologias torna-se incapaz de gerar consenso na comunidade de especialistas uma vez que, embora não haja uma definição unânime, existem determinados princípios e valores teóricos com bases fundamentais.

KDD (Knowledge Discovery in Databases)

Knowledge Discovery in Databases (KDD) em português, Descoberta de Conhecimento em Bases de Dados, de acordo com Fayyad *et al.*, (1996), refere-se ao processo global de descoberta de conhecimento útil dos dados. Trata-se do processo não trivial de identificação de padrões válidos, novos e potencialmente úteis, e em última análise, compreensíveis nos dados, tal como explicam os mesmos autores. Em termos gerais, é necessário obter um conhecimento prévio dos dados, bem como identificar o objetivo do processo *KDD*, antes de se iniciar qualquer processo (Anselmo, 2017). Posteriormente, segundo o mesmo autor, é essencial formar-se um conjunto de dados ou amostra de dados que se tornará alvo de análise.

Processo de *KDD*

Consiste no processo de identificação de padrões válidos percetíveis a partir dos dados, com o intuito de criar conhecimento válido e com capacidade de serem compreendidos e interpretados pelos humanos (Sena, 2012). Este processo, tal como explica o mesmo autor, depende de um conjunto de ferramentas e técnicas de análise de dados, que envolve várias etapas, com foco no processo global de descoberta de conhecimento a partir de dados, desde o seu armazenamento e acesso até ao modo em que como os resultados são interpretados e apresentados.

De acordo com Fayyad *et al.* (1996), o processo de *KDD* ocorre de uma forma interativa e iterativa, ao longo de nove (9) etapas. A etapa de *Data Mining* é considerada das mais importantes, e que forma o núcleo do processo, sendo

Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra

confundida por vezes com o processo em si (Sena, 2012). As nove etapas, de forma resumida, são as seguintes:

1. Definição do domínio de aplicação e pré-conhecimento relevante, bem como a identificação do objetivo do processo do ponto de vista do cliente;
2. Criação de um conjunto de dados-alvo;
3. Limpeza e pré-processamento dos dados;
4. Redução e projeção de dados;
5. Escolha do método de *Data Mining* mais adequado;
6. Escolha da técnica de *Data Mining* mais apropriada;
7. Processo de *Data Mining*, com a procura de padrões relevantes numa forma de representação específica;
8. Interpretação dos dados identificados;
9. Utilização, incorporação e documentação do conhecimento obtido.

A figura 1.4 representa as fases do processo de *KDD*, de acordo com as etapas acima mencionadas.

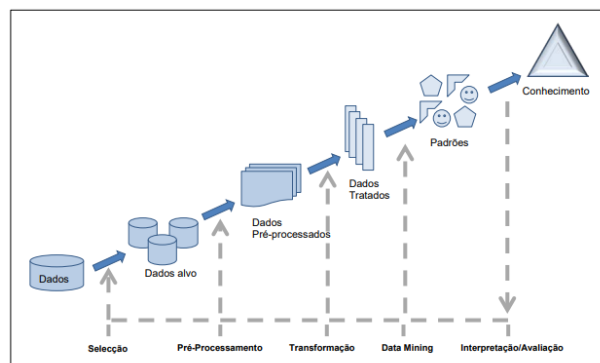


Figura 1.4 - Fases do processo de *KDD*, segundo (Fayyad et al., 1996) (adaptado de Sena, 2012)

Data Mining

Turban *et al.*, (2011) numa definição simples, refere-se a *Data Mining* como um termo utilizado para descrever a descoberta ou “extração” de conhecimento a partir de grandes quantidades de dados. Em termos técnicos, os mesmos autores explicam que se trata de um processo que recorre a técnicas estatísticas, matemáticas e de inteligência artificial para extração e identificação de informações úteis e conhecimentos subsequentes (padrões) a partir de grandes conjuntos de dados.

Coelho (2018) afirma que *Data Mining* é um processo que manipula tipicamente dados previamente recolhidos, sem assumir qualquer relevância na estratégia de aquisição de dados. Tal como explica Sena (2012), muitos investigadores e profissionais na área consideram *Data Mining* como um sinónimo do processo do

termo *KDD*, enquanto outros consideram-no como um passo essencial no processo de descoberta de conhecimento.

Categorização

Segundo Fayyad *et al.*, (1996), os principais objetivos do *Data Mining* tendem a ser a previsão e a descrição. A previsão envolve a utilização de variáveis ou campos na base de dados responsáveis pela previsão de valores desconhecidos ou futuros de outras variáveis de interesse, de acordo o mesmo autor, enquanto que a descrição tem como objetivo encontrar padrões compreensíveis por humanos que descrevam os dados. Fayyad *et al.*, (1996), bem como Pereira (2005) ou Correia (2017) agrupam os objetivos de Data Mining da seguinte forma: Classificação e Regressão enquadram-se na Previsão; Associação, Sumarização e Segmentação, enquadram-se na segunda, tal como está representado na figura 1.5.

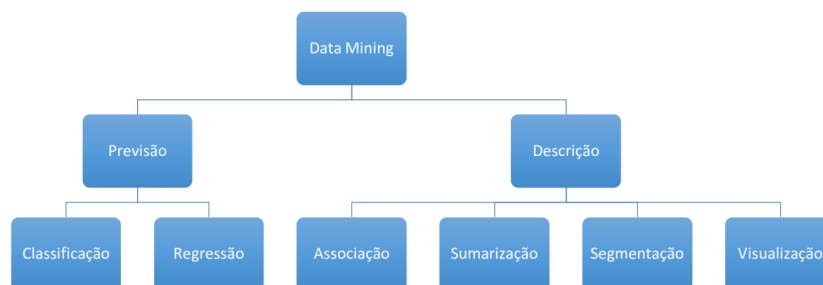


Figura 1.5 - Objetivos / Categorização e subcategorização de Data Mining (Correia, 2017) (adaptado de Pereira (2005))

De acordo com Fayyad *et al.*, (1996), Pereira (2005) e Correia (2017), a subcategorização de *Data Mining* é feita da seguinte forma:

- a. **Classificação** – corresponde à atribuição de classes a determinados objetos consoante as suas características;
- b. **Regressão** – utilizada para definir um valor real a uma variável contínua desconhecida;
- c. **Associação** – consiste em determinar quais os dados que tendem a concorrer na mesma transação;
- d. **Sumarização** – recorre a métodos para encontrar descrições compactas e detalhadas de um subconjunto de dados;
- e. **Segmentação** – do inglês *Clustering*, trata-se do processo de partição (ou divisão heterogénea) de uma população em vários subgrupos ou segmentos homogéneos;

- f. **Visualização** – trata das apresentações dos resultados de *Data Mining* de uma forma visual, por norma representado por gráficos, o que permite uma boa representação de padrões e tendências.

Machine Learning

Para Hu & Xing (2022), *Machine Learning* refere-se a métodos computacionais que permitem às máquinas aprender conceitos por via da experiência. Ao lidar com uma ampla variedade de experiências, desde instâncias de dados, conhecimentos e restrições até recompensas, adversários e interações contínuas num espectro de tarefas em expansão, a pesquisa contemporânea em ML/IA originou uma série de múltiplos paradigmas e metodologias de aprendizagem, explicam os mesmos autores. Santos (2019) define *Machine Learning* como um domínio da Inteligência Artificial, baseada na ideia em que os sistemas podem aprender com os dados, identificar padrões e tomar decisões com o mínimo de intervenção humana.

Esta é utilizada com frequência para fazer previsões com recurso a computadores, e embora não seja uma tecnologia nova, tem vindo a ganhar importância nos últimos anos, com uma atual utilização numa grande variedade de aplicações. *Machine Learning* não se trata de programação, mas sim autoaprendizagem de dados e experiência para criar padrões e resolver novas tarefas (Rojas, 2020). Esta aprendizagem é a combinação de técnicas, dados, conceptualização de análise de dados e algoritmos para gerar novos padrões ou modelos de previsão, seguindo a linha de pensamento do autor. Rojas (2020) explica que o objetivo de gerar mais dados baseia-se em técnicas capazes de reconhecer padrões, extrair conhecimento, descobrir informação e fazer previsões, entre as quais se destacam: regressão linear e polinomial, árvores de decisão, redes neurais, rede Bayesiana e cadeias de Markov.

Tipos de Aprendizagem

De acordo com Santos (2019), os modelos de *Machine Learning* podem experienciar diferentes técnicas, mas por norma, os seus métodos são classificados em três tipos de aprendizagem: supervisionada, não supervisionada, e por reforço:

- a. **Supervisionada** – os dados de entrada e o resultado desejado são fornecidos previamente ao algoritmo de aprendizagem. A utilização deste método é comum na previsão ou explicação de determinados dados;
- b. **Não supervisionada** – são fornecidos dados não rotulados ao algoritmo de aprendizagem, sendo a este solicitado o reconhecimento de padrões nos dados fornecidos. Este método é utilizado quando se pretende relacionar e agrupar dados sem um objetivo de saída;
- c. **Por reforço** – um ambiente dinâmico é criado para interagir com o algoritmo de aprendizagem que tem como objetivo fornecer uma avaliação sobre a resposta do sistema.

Algoritmos

Nesta secção, serão representados alguns algoritmos de *Machine Learning*, um pertencente a cada uma das categorias (supervisionada, não supervisionada e por reforço), entre os quais:

- **Redes Neurais Artificiais** - Veladas (2021) integra as RNA's na categoria de aprendizagem supervisionada, “as redes neuronais artificiais supervisionadas aprendem ao receber pares de entrada absolutos”;
- **Árvores de Decisão** – algoritmo de aprendizagem supervisionada, que em conjunto, forma o algoritmo *Random Forest* – grande número de Árvores de Decisão individuais que funcionam como um conjunto (Lages, 2023);
- **Clustering** – define-se como um processo de aprendizagem não supervisionada, que agrupa itens de dados baseados numa medida de similaridade (Mesquita, 2008);
- **Q-Learning** – algoritmo de aprendizagem por reforço, que não segue um modelo de forma a aprender as ações que deve escolher consoante as circunstâncias (Raimundo, 2021).

De seguida, apresenta-se a breve definição de cada um dos algoritmos anteriormente referidos (Redes Neuronais Artificiais, Árvores de Decisão, *Clustering*, *Q-Learning*).

Redes Neurais Artificiais (RNA's)

De acordo com Spörl *et al.*, (2011), Redes Neuronais Artificiais são algoritmos computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes na tentativa de replicar o funcionamento do cérebro humano em máquinas, de forma simplificada. RNA's são capazes de aprender e tomar decisões com base na sua própria aprendizagem, que se podem interpretar como um esquema de processamento capaz de armazenar conhecimento com base na aprendizagem (experiência) (Spörl *et al.*, 2011). Na figura 1.6 está representada a estrutura de uma rede neuronal artificial, bem como a sua constituição: camada de entrada, camada oculta, camada de saída e os neurónios.

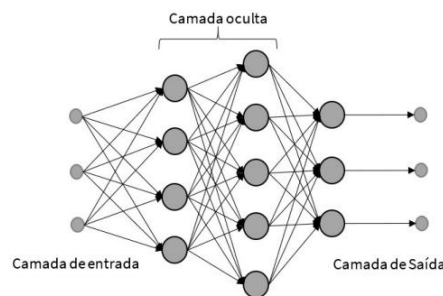


Figura 1.6 - Representação de uma rede neuronal artificial (Veladas, 2021)

Árvores de Decisão

Árvores de decisão fazem parte de um conjunto de vários tipos de algoritmos de *Machine Learning*, que tem como objetivo efetuar previsões através dos dados fornecidos; utilizam-se em problemas de classificação e permitem trabalhar com dados quantitativos e qualitativos (Pessoa, 2024). O objetivo deste algoritmo é prever um ou vários resultados a partir de um conjunto de dados, através da análise dos atributos e valores para a previsão de classes, explica o mesmo autor. Para Suquina (2019), existem diversas formas de representação de uma árvore: hierárquica, diagrama de inclusão, diagrama de barras e numeração por níveis. Segundo Ferreira (2018), as árvores de decisão são compostas por nós, ramos e folhas:

- Nó-raiz representa a escolha que resulta da subdivisão de todos os exemplos em 2 ou mais conjuntos exclusivos;
- Nós internos representam uma das opções disponíveis nesse ponto da árvore, onde se conecta ao nó pai na parte superior e aos nós filhos na parte inferior;
- Ramos traduzem-se em resultados ou ocorrências do nó raiz e nós internos;
- Folhas representam o resultado de uma combinação de decisões.

Deste modo, cada caminho do nó raiz por via dos nós internos para uma folha, representa uma regra de decisão de classificação (Ferreira, 2018). O processo de indução de árvores de decisão exige grande poder computacional e após a sua construção, o seu uso é imediato, sendo uma vantagem da sua utilização (Gueirez, 2014). Na figura 1.7 apresenta-se uma árvore de decisão do tipo hierárquica, com representação no nó-raiz e o seguimento do processo, até ao nó-folha.

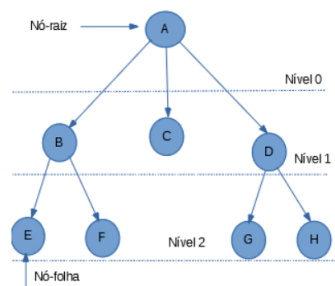


Figura 1.7- Representação de uma rede neuronal artificial (Suquina, 2019)

Clustering

O processo de *Clustering* consiste na criação de classes, subconjuntos de registos que representam valores mais próximos em certos atributos, que produzem um esquema de agrupamento que divide o conjunto de dados em classes (Castro, 2003). Este autor define *cluster* como um conjunto de objetos similares entre si dentro do mesmo *cluster* e dissimilares em relação a outros objetos noutros *clusters*. Assim, a análise de *cluster* trata-se do processo de partição de um conjunto de dados em subclasses mais pequenas com características comuns, de forma a garantir uma melhor homogeneidade e separação dos grupos. Mesquita (2008) refere que os algoritmos

de *clustering* podem ser classificados de acordo com as diferenças e semelhanças entre si, onde é possível identificar na maioria dos artigos dois grandes grupos: algoritmos partitivos e algoritmos hierárquicos. Algoritmos partitivos determinam todos os *clusters* de forma simultânea, em que o número inicial de clusters não se altera até o algoritmo terminar; algoritmos hierárquicos identificam *clusters* sucessivos através da fusão ou divisão de clusters estabelecidos previamente, criando uma hierarquia (Mesquita, 2008). Na figura 1.8 visualiza-se um processo de *clustering* de partição.

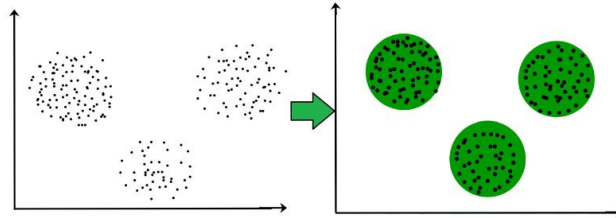


Figura 1.8- Representação de um processo de *clustering* de partição (GeeksforGeeks, 2025)

Q-Learning

Q-Learning consiste numa técnica de *Reinforcement Learning* que aprende um procedimento e maximiza a recompensa obtida sem necessidade de um modelo do ambiente, através do uso de uma matriz Q em que as linhas correspondem ao conjunto de estados possíveis e as colunas correspondem ao conjunto de ações disponíveis (Fernandes, 2019). O objetivo deste algoritmo, explica Pires (2020), é gerar através da equação de Bellman ótima, uma aproximação sucessiva dos valores da função Q ótima. Para tal acontecer, o agente tem de interagir com o sistema observando as consequências das suas ações em forma de recompensa única. Fernandes (2019) refere que a fórmula de atualização dos valores da matriz Q , designada por equação de Bellman, se representa da seguinte forma:

$$Q(s, a) := Q(s, a) + \alpha \times [r(t + 1) + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)], \quad (1.1)$$

Em que:

- s corresponde ao estado atual;
- a corresponde à ação atual;
- α trata-se da taxa de aprendizagem, sendo esta definida entre 0 e 1;
- r representa a recompensa que o algoritmo recebe dependendo do seu desempenho;
- t representa o passo temporal atual;
- γ consiste no fator de desempenho, definido entre 0 e 1;
- s' representa o estado seguinte;
- a' representa a ação seguinte.

ANEXO C – CONVITE – MÉTODO *DELPHI*

Título *email*: Pedido de inclusão em painel de especialista - Método *Delphi*

Exmo,

No âmbito da realização da minha dissertação relativa à identificação de KPI's para a arquitetura de um sistema de alerta de previsão de inundações, inserida no mestrado em Cidades Sustentáveis e Inteligentes, no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, sob a orientação do Professor Doutor Filipe Sá, estamos a identificar KPI's que poderiam avaliar e qualificar um sistema de alerta, com base na dimensão ambiental, económica, social e tecnológica.

Dada a natureza e o objetivo deste estudo, o seu sucesso e os contributos que dele poderão advir dependem fortemente da recolha de conhecimento, visões, perceções e experiências que os diversos intervenientes possuem sobre sistemas de alerta e proteção civil.

Nesse contexto, gostaria de apelar a que, no seu melhor espírito de colaboração, participasse num estudo Delphi sobre esta temática.

Prevê-se que o estudo envolva a realização no mínimo de duas rondas, a iniciar em Novembro de 2024. A estimativa do esforço que terá de despender para responder ao questionário rondará os 10 minutos. Todas as suas respostas serão mantidas confidenciais, sendo apenas do conhecimento do investigador e dos orientadores. De forma a facilitar a sua participação, todos os questionários serão conduzidos via internet.

Para facilitação do processo, o link do formulário encontra-se em baixo,

<https://forms.gle/HeQnZESAYjQTzFgu5>

Agradecendo desde já uma resposta sobre o pedido de colaboração,

Com os melhores cumprimentos,

Rafael Morgado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

rafael.morgad@hotmail.com

ANEXO D – TAXA DE COORDENAÇÃO INTERINSTITUCIONAL

A taxa de coordenação interinstitucional, como KPI, pode ser avaliada de várias formas. Em contexto de um sistema de alerta, pode-se enquadrar na forma como as entidades estatais são acionadas para alertas de inundação, a forma como se coordenam entre si e a sua prontidão perante os eventos de catástrofe. Neste sentido, este indicador foi avaliado com base no conjunto de entidades envolvidas na disponibilização de informação útil e necessária para a elaboração da cartografia na presente dissertação. Tal se reflete no modo em como a articulação entre diferentes entidades públicas permitem a integração e a divulgação de dados, que favorecem a transparência. Dessa forma, é necessário após a prova de conceito, refletir acerca da fonte da informação geoprocessada. Para concretizar a prova de conceito, recorreu-se a informação proveniente de cinco entidades, que correspondem a oito conjuntos de dados distintos:

- **Agência Portuguesa do Ambiente (APA):** definição das políticas e normas do PGRI – RH4A, responsável pela política ambiental, ordenamento do território e recursos hídricos (1 *dataset*);
- **Instituto Nacional de Estatística (INE):** grelha estatística dos Censos 2021 (1 *dataset*);
- **Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG):** Cartografia de Zonas Inundáveis e Risco de Inundação incluída na PGRI – RH4A para três diferentes Períodos de Retorno: Perigosidade de Inundação, Consequência / Exposição de Inundação, Risco de Inundação, Limite da Área de Inundação)(4 *datasets*);
- **Direção Geral do Território (DGT):** Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP) (1 *dataset*);
- **Dados.gov da Agência para a Modernização Administrativa (AMA):** cartografia da zona máxima de cheia no Mondego (cidade de Coimbra) em janeiro de 2001 (1 *dataset*).

A possibilidade de reunir, processar e utilizar a informação proveniente das entidades competentes demonstra a existência de um nível efetivo de coordenação interinstitucional e de transparência na disponibilização da informação. Dessa forma, a validação deste KPI é visível no número de entidades envolvidas (cinco) e os *datasets* integrados (oito), o que se revelou fundamental para uma análise objetiva e suportada em dados oficiais.

*Modelo para Sistema de Alerta de Previsão de Cheias e Inundações – Identificação e
Validação de KPI's com aplicação ao caso de Coimbra*



**Instituto Superior
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra