

DM

Análise Geomorfológica da Propensão de Cheias
Casos de estudo dos concelhos de Câmara de Lobos,
Santa Cruz, São Vicente e Porto Moniz

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Mariela Concepcion Ornelas Lopes

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

novembro | 2022

Análise Geomorfológica da Propensão de Cheias
Casos de estudo dos concelhos de Câmara de Lobos,
Santa Cruz, São Vicente e Porto Moniz

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Mariela Concepcion Ornelas Lopes

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO

Sérgio António Neves Lousada

COORIENTAÇÃO

Leonardo Bazilio Gonçalves



Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

**Análise Geomorfológica da Propensão de Cheias:
Casos de Estudo dos Concelhos de Câmara de Lobos,
Santa Cruz, São Vicente e Porto Moniz**

Licenciada em Engenharia Civil (Pós-Bolonha)

Dissertação submetida para o grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade da
Madeira

por

Mariela Concepcion Ornelas Lopes

Orientador

Prof. Doutor Sérgio António Neves Lousada

(Universidade da Madeira)

Coorientador

Prof. Leonardo Bazilio Gonçalves

(Universidade da Madeira)

novembro 2022

Título: Análise Geomorfológica da Propensão de Cheias: Casos de Estudo dos Concelhos de Câmara de Lobos, Santa Cruz, São Vicente e Porto Moniz.

Palavras-Chave: escoamento superficial; Gestão ambiental; Hidrologia; Inundações; Planeamento urbano.

Keywords: Environmental management; Floods; Hydrology; Surface runoff; Urban planning.

Autora: Mariela Concepcion Ornelas Lopes

FCEE - Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

Campus Universitário da Penteada

9020-015 Funchal – Portugal. s/n

Telefone +351291705230

Correio eletrónico: secretariadocentros@uma.pt

Funchal, Madeira

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado representa o culminar de um sonho a nível académico e pessoal, um esforço na vida que com muito empenho e foco foi possível atingir as metas esperadas. Não foi um período fácil, mas pôde contar com a ajuda de várias pessoas e entidades aos quais agradeço:

Primeiramente aos meus pais, pelo esforço e sacrifícios nas suas vidas para que nada me faltasse e pelo apoio incondicional em poder alcançar todos os meus objetivos;

Ao meu marido, que nunca me permiti-o desistir e sempre me apoiou e fez com que os momentos mais difíceis fossem superados;

Aos meus familiares, ao meu filho que é a minha alegria e força de viver, aos meus irmãos que sempre estiveram presentes e também aos meus avós que apesar de não estarem presentes sempre foram a minha fonte de inspiração e força para lutar e seguir sempre em frente;

Aos meus orientadores, Professor Doutor Sérgio António Neves Lousada e Engenheiro Leonardo Bazílio Gonçalves, por toda a atenção e disponibilidade dispensada na realização desta dissertação, pela orientação e também pela amizade;

Aos professores que me acompanharam neste percurso e que com eles aprendi muita coisa;

E por último e não menos importante, aos meus amigos e colegas da UMa, pela amizade e apoio durante todo este ciclo.

RESUMO

As cheias são fenómenos que têm vindo a impactar a ilha da Madeira de forma relativamente recorrente ao longo dos últimos séculos. Na verdade, nas décadas mais recentes, a regularidade com que este tipo de fenómeno ocorre nesta região tem vindo a aumentar. Se, por um lado, a preponderância do crescente alcance e difusão dos meios de comunicação não pode ser ignorada, o impacto de fatores como as alterações climáticas, o excessivo grau de impermeabilização dos solos, sobretudo nas áreas urbanizadas, ou o surgimento tardio de instrumentos de ordenamento de território na ilha deverá ser também tido em conta.

Durante o fenómeno de precipitação, a água precipitada que cai sobre uma determinada bacia hidrográfica, à medida que a taxa de infiltração diminui, irá ser conduzida, por meio dos cursos de água que compõem essa mesma bacia, até à secção de saída – a foz. Assim, é perceptível que o maior ou menor grau de exposição de uma determinada bacia hidrográfica à ocorrência de cheias está, em grande medida, relacionado com as características da mesma; aspetos como a rugosidade, a altura e a largura dos cursos de água, o material com que este é constituído, o declive da bacia ou a presença de sedimentação e/ou vegetação nos canais são fundamentais para uma correta análise à propensão de ocorrência de cheias numa determinada região.

Do ponto de vista da ilha da Madeira, o presente estudo virou atenções para os casos específicos dos concelhos de Câmara de Lobos, Santa Cruz, São Vicente e Porto Moniz, mais concretamente para as seguintes bacias hidrográficas: Ribeira dos Socorridos, Ribeira do Vigário, Santa Cruz, Porto Novo, Ribeira da Vargem, São Vicente, Seixal e Ribeira da Janela. Assim, considerando parâmetros como o tempo de concentração, a densidade e o padrão de drenagem, por exemplo, em adição a fatores relacionados com a quantificação da forma das bacias (fatores de forma e de alongamento e índice de compacidade) e com a caracterização das mesmas, é realizada uma análise à probabilidade de ocorrência de transbordo, tendo em conta o caudal de ponta de cheia de cada uma das bacias hidrográficas.

Para esse efeito, e de modo a obter dados com um maior grau de fiabilidade, recorre-se ao *software ArcGIS*, desenvolvido pela *Esri*; num segundo momento, perante a incapacidade de escoamento que os cursos de água em análise apresentam, considerando o caudal precipitado estimado para um período de retorno de 100 anos, é sugerida, como medida de prevenção, a construção de uma bacia de detenção, procedendo-se, posteriormente, ao seu dimensionamento. Esta medida surge com o intuito de evitar que ocorra o transbordo na zona da foz do curso de água, assegurando que esta funcionará adequadamente perante um fenómeno de precipitação extrema.

Palavras-chave: Escoamento superficial; Gestão ambiental; Hidrologia; Inundações; Planeamento urbano.

ABSTRACT

Floods are events that have been impacting Madeira on a relatively recurrent basis over the last few centuries. In fact, in recent decades, the regularity with which this type of phenomenon occurs in this region has been increasing. If, on the one hand, the importance of the media's growing reach and diffusion power cannot be ignored on this matter, the impact of factors such as climate change, the excessive degree of soil sealing, especially in urbanized areas, or the late appearance of urban planning on the island should also be considered.

During precipitation, as the infiltration rate decreases, the precipitated water that falls on a certain watershed will be conducted, through the water courses that make up that same basin, to the mouth of the river. Thus, it is noticeable that the degree of exposure of a river basin to the occurrence of floods is, to a large extent, related to its characteristics. Aspects such as its roughness, its height and width, the material with which it is made, the slope of the basin or the presence of sedimentation and/or vegetation in the channels are fundamental for a correct and precise analysis regarding the propensity of flooding.

From Madeira's perspective, the present study turned its attention to the specific cases of four cities – Câmara de Lobos, Santa Cruz, São Vicente and Porto Moniz – more specifically to the following river basins: Ribeira dos Socorridos, Ribeira do Vigário, Santa Cruz, Porto Novo, Ribeira da Vargem, São Vicente, Seixal and Ribeira da Janela. Therefore, considering factors such as concentration time, density and drainage pattern, for example, in addition to factors related to the quantification of the shape of the basins (shape and elongation factors and compactness index) and with their characterization, an analysis is carried out on the probability of transshipment, taking into account the peak flow of each of the hydrographic basins.

For this purpose, and in order to obtain reliable data, *ArcGIS* software, developed by *Esri*, is used; secondly, given the inability of the watercourses under analysis to flow, considering the precipitated flow estimated for a return period of 100 years, it is suggested, as a preventive measure, the construction of a detention basin, proceeding, later, to its dimensioning. This step aims to prevent transshipment at the mouth of the watercourse, ensuring that it will function properly in the event of extreme precipitation.

Keywords: Environmental management; Floods; Hydrology; Surface runoff; Urban planning.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA.....	3
1.2. METODOLOGIA	5
1.3. ESTRUTURA	6
ENQUADRAMENTO	8
2.1. ENQUADRAMENTO LOCAL.....	9
2.1.1. Localização e População	9
2.1.2. Economia Local.....	11
2.1.3. Formação Geomorfológica.....	13
2.1.4. Climatologia.....	14
2.1.4.1. Precipitação	15
2.1.4.2. Pluviometria	18
2.1.4.3. Infiltração	19
2.1.4.4. Uso e Ocupação do Solo	21
2.1.4.5. Aluviões e Cheias.....	21
2.1.5. Panorama Climatológico da Ilha da Madeira	25
2.1.5.1. Clima e Precipitação.....	25
2.1.5.2. Pluviometria	28
2.1.5.3. Infiltração e Ocupação do Solo	28
2.1.5.4. Histórico de Aluviões e Cheias na Ilha da Madeira	30
2.2. MEDIDAS DE PREVENÇÃO E MITIGAÇÃO DOS IMPACTOS	32
2.2.1. Proteção Civil.....	32
2.2.2. Mitigação dos Impactos das Cheias	33
2.3. ORDENAMENTO TERRITORIAL.....	34
2.3.1. Conceito e Objetivos	34
2.3.2. Sistema de Gestão e Planeamento do Território Português.....	36
2.3.3. Instrumentos de Gestão Territorial.....	36
METODOLOGIA TEÓRICA	40

3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS	41
3.1.1. Características geomorfológicas e fisiográficas da bacia hidrográfica	41
3.1.1.1. Caracterização geométrica	41
3.1.1.2. Caracterização dos canais de drenagem	45
3.1.1.2.1. Tipologias de escoamento	45
3.1.1.2.2. Classificação por grau de ramificação ou de bifurcação	46
3.1.1.2.3. Tempo de concentração.....	48
3.1.1.2.4. Densidade de drenagem.....	50
3.1.1.2.5. Densidade hídrica.....	51
3.1.1.2.6. Extensão média do escoamento superficial.....	51
3.1.1.2.7. Sinuosidade	52
3.1.1.2.8. Padrão de drenagem	52
3.1.1.3. Caracterização do relevo	56
3.1.1.3.1. Hipsometria	56
3.1.1.3.2. Altitude e altura médias.....	57
3.1.1.3.3. Coeficiente de massividade	58
3.1.1.3.4. Coeficiente orográfico.....	58
3.1.1.3.5. Perfil longitudinal de um curso de água.....	59
3.1.1.3.6. Declives da bacia hidrográfica	59
3.1.2. Características hidrológicas da bacia hidrográfica	61
3.1.2.1. Caracterização das precipitações.....	61
3.1.2.2. Precipitação expectável – distribuição de Gumbel.....	62
3.1.2.3. Caudal de ponta de cheia.....	63
3.1.3. Medidas de mitigação das cheias	66
OBTENÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS	72
4.1. CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS E FISIAGRÁFICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA – OBTENÇÃO DE DADOS.....	73
4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	80
4.2.1. Análise Geométrica	82

4.2.2. Análise da Rede de Drenagem	83
4.2.3. Caudal de Ponta de Cheia.....	83
4.2.4. Capacidade de Escoamento da Foz	86
4.2.5. Bacia de Detenção – Método Holandês	86
4.2.6. Bacia de Detenção – Hidrograma Triangular Simplificado	87
DISCUSSÃO E CONCLUSÃO.....	90
5.1. DISCUSSÃO.....	91
5.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
5.3. TRABALHOS A REALIZAR	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
ANEXOS.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Cheias ocorridas no dia 20 de fevereiro de 2010 no Funchal, Madeira (Fonte: de Oliveira, et al., 2011).....	3
Figura 2 – Metodologia Adotada. (Fonte: Autor, 2022)	6
Figura 3 – Variação percentual da população residente, por município, na RAM, entre 2011 e 2021 (Fonte: DREM, 2021)	9
Figura 4 – Densidade populacional na RAM, por freguesia, em 2021 (Fonte: DREM, 2021) ...	10
Figura 5 – Distribuição da população residente, por grupos etários e por município, na RAM, em 2021 (Fonte: DREM, 2021)	11
Figura 6 – Índices de disparidade do PIB per capita em PPC por NUTS II, em 2018 e 2019 (Fonte: INE, 2020).....	11
Figura 7 – Número de dormidas em alojamentos turísticos coletivos na RAM, por mês, entre 2019 e 2021 (Fonte: DREM, 2022).....	12
Figura 8 – Batimetria das ilhas da Madeira, de Porto Santo e das Desertas (Fonte: Mata, et al., 2013)	13
Figura 9 – Ciclo hidrológico e os processos a ele intrínsecos (Fonte: Lousada & Camacho, 2018)	15
Figura 10 – Processo de formação de precipitação de natureza ciclónica (Fonte: Estúdio Conejo, 2014)	16
Figura 11 – Processo de formação de precipitação de natureza convectiva (Fonte: Estúdio Conejo, 2014)	17
Figura 12 – Processo de formação de precipitação de natureza orográfica (Fonte: Estúdio Conejo, 2014)	18
Figura 13 – Processos de infiltração e de escoamento durante um evento de precipitação contínuo (Fonte: Andrade, 2014)	19
Figura 14 – Camadas do solo (Fonte: Martelli, 2012)	20
Figura 15 – Cheias no rio Itapemirim, Cachoeiro de Itapemirim, Brasil (Fonte: Gonçalves, 2020)	22
Figura 16 – Storm surge ocorrida na sequência do Furacão Ike, Louisiana, EUA (Fonte: National Geographic, 2022).....	23
Figura 17 – Cheias ocorridas após o colapso de duas barragens, Michigan, EUA (Fonte: Rico, 2020)	23
Figura 18 – Cheias rápidas ocorridas em Dallas, EUA (Fonte: Rosenthal, Gahan, & Timsit, 2022)	24
Figura 19 – Torrente de lama provocada por chuvas torrenciais, Quito, Equador (Fonte: SIC Notícias, 2022)	24

Figura 20 – Lahar derivado da erupção do Monte Santa Helena, EUA (Fonte: Cascades Volcano Observatory, s.d.)	25
Figura 21 – Temperaturas máximas e mínimas médias (Fonte: Weather Spark, s.d.)	26
Figura 22 – Temperatura média anual do ar registada na estação Funchal/Observatório, entre os anos de 1976 e 2019 (Fonte: DREM, 2020).....	26
Figura 23 – Dias secos e com chuva registados nas estações meteorológicas da RAM no ano de 2019 (Fonte: DREM, 2020)	27
Figura 24 – Formação de nuvens e de nevoeiro na ilha da Madeira (Fonte: Prada, 2008)	27
Figura 25 – Localização das áreas de vegetação densa da ilha da Madeira (Fonte: Gonçalves, 2020)	28
Figura 26 – Distribuição das ocupações do solo na ilha Madeira (Fonte: Gonçalves, 2020)	29
Figura 27 – Medidas estruturais e não estruturais de mitigação dos efeitos das cheias (Fonte: CPRM, 2004)	33
Figura 28 – Princípios do ordenamento do território, segundo diferentes abordagens (Fonte: adaptado de Papudo, 2007)	35
Figura 29 – Esquematização do sistema de gestão territorial português (Fonte: DGT, s.d.)	38
Figura 30 – Bacia hidrográfica alongada ou longitudinal (Fonte: Lousada & Camacho, 2018). 42	
Figura 31 – Bacia hidrográfica arredondada (Fonte: Lousada & Camacho, 2018).....	42
Figura 32 – Bacia hidrográfica radial ou ramificada (Fonte: Lousada & Camacho, 2018)	43
Figura 33 – Hidrogramas por formato de bacia hidrográfica (Fonte: Gonçalves, 2020)	43
Figura 34 – Curso de água perene (Fonte: Lousada & Camacho, 2018)	45
Figura 35 – Curso de água intermitente (Fonte: Lousada & Camacho, 2018).....	46
Figura 36 – Curso de água efémero (Fonte: Lousada & Camacho, 2018).....	46
Figura 37 – Aplicação do método de Strahler para a obtenção da ordem de um curso de água (Fonte: da Costa & Lança, 2011)	47
Figura 38 – Aplicação do método de Shreve para a obtenção da ordem de um curso de água (Fonte: Rennó & Soares, s.d.)	48
Figura 39 – Padrão de drenagem dendrítica ou dendróide (Fonte: da Costa & Lança, 2011)	53
Figura 40 – Padrão de drenagem em treliça (Fonte: da Costa & Lança, 2011).....	53
Figura 41 – Padrão de drenagem retangular (Fonte: da Costa & Lança, 2011)	54
Figura 42 – Padrão de drenagem paralela (Fonte: da Costa & Lança, 2011).....	54
Figura 43 – Padrão de drenagem radial (Fonte: da Costa & Lança, 2011)	55
Figura 44 – Padrão de drenagem anelar (Fonte: da Costa & Lança, 2011).....	55
Figura 45 – Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira dos Socorridos (Fonte: Marques, 2014)	56
Figura 46 – Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica da Ribeira dos Socorridos e da Ribeira do Vigário (Fonte: Marques, 2014).....	57

Figura 47 – Perfil longitudinal de um rio hipotético (Fonte: Rodrigues, et al., 2011)	59
Figura 48 – Esquemática do Método HTS (Fonte: Gonçalves, 2020)	69
Figura 49 – Flow Direction (Fonte Autor, 2022)	73
Figura 50 – Bacias hidrográficas (Fonte: Autor, 2022).....	74
Figura 51 – Cursos de água (Fonte: Autor, 2022).....	74
Figura 52 – Bacia hidrográfica de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)	75
Figura 53 – Classificação de Shreve da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022).....	76
Figura 54 – Classificação de Strahler da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)	76
Figura 55 – Mapa de declives em percentagem da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)...	77
Figura 56 – Mapa de declives em graus da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)	77
Figura 57 – Curso de água principal da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022).....	78
Figura 58 – Perfil longitudinal do curso de água principal de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)	79
Figura 59 – Curva hipsométrica da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)	79

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Bacias hidrográficas em estudo (Fonte: Autor, 2022).....	5
Tabela 2 – Síntese das principais aluviões na Madeira (Fonte: Gonçalves, 2020)	31
Tabela 3 – Coeficiente de escoamento superficial (Fonte: Gonçalves, 2020).....	64
Tabela 4 – Coeficiente de redução (Fonte: Gonçalves, 2020).....	65
Tabela 5 – Coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler (Fonte: Cirilo, 2001; Gonçalves, 2016)	68
Tabela 6 – Resumo geral (Fonte; Autor, 2022).....	81
Tabela 7 – Análise de áreas (Fonte: Autor, 2022).....	82
Tabela 8 – Análise de geometria (Fonte: Autor, 2022).....	82
Tabela 9 – Análise da rede de drenagem (Fonte: Autor, 2022).....	83
Tabela 10 – Precipitação diária máxima estimada para 100 anos (Fonte: Autor, 2022).....	83
Tabela 11 – Coeficiente de repartição temporal (K) e intensidade de precipitação (Fonte: Autor, 2022)	84
Tabela 12 – Coeficiente (b) e (C) utilizados na fórmula de Forti (Fonte: Autor, 2022)	84
Tabela 13 – Coeficiente de escoamento superficial utilizado (Fonte: Autor, 2022)	84
Tabela 14 – Análise e dimensionamento dos dispositivos de mitigação (Fonte: Autor, 2022) ..	85
Tabela 15 – Fill Rate através do método holandês (Fonte: Autor, 2022).....	86
Tabela 16 – Comprimento da bacia de detenção através do método holandês (Fonte: Autor, 2022)	87
Tabela 17 – Fill Rate através do método HTS (Fonte: Autor, 2022)	87
Tabela 18 – Comprimento da bacia de detenção através do método HTS (Fonte: Autor, 2022) ..	87
Tabela 19 – Fill Rate com a alteração do coeficiente de rugosidade (Fonte: Autor, 2022)	88

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

SÍMBOLO

A	Área da bacia hidrográfica
H_m	Altura média da bacia hidrográfica
Z_m	Altitude média
Z_i	Altitude média entre curvas de nível
A_i	Área entre curvas de nível correspondentes à Z _i
H_i	Área média entre as curvas de nível
Z_{min}	Altitude mínima
Z_{eq}	Altitude equivalente
Z_i	Altitude do trecho “i”
Z_{i+1}	Altitude do trecho subsequente “i+1”
Z85	Altitude do curso de água a 85% do seu comprimento
Z10	Altitude do curso de água a 10% do seu comprimento
H_{bmáx}	Altura máxima da bacia hidrográfica
H_{bmin}	Altura mínima da bacia hidrográfica
P_{máx}	Altura de precipitação para uma duração igual ao tempo de concentração
H	Altura da secção de escoamento da foz
A_m	Área da secção de escoamento da foz
A_s	Área da secção
H_d	Altura da água acima da cota da soleira do descarregador
L_e	Comprimento equivalente
L_B	Comprimento da bacia hidrográfica
L_T	Comprimento total dos cursos de água da bacia hidrográfica
L	Comprimento do curso de água principal
L_D	Comprimento da diretriz
C_{ms}	Coefficiente de massividade
C_o	Coefficiente orográfico
H_{máx}	Cota máxima do curso de água principal
H_{min}	Cota mínima do curso de água principal
X	Comprimento do trecho “i”
X_{i+1}	Comprimento do trecho subsequente “i+1”
k	Coefficiente de repartição temporal
Q_(Forti)	Caudal de ponta de cheia pela equação de Forti
Q_(Pagliaro)	Caudal de ponta de cheia pela equação de Pagliaro
Q_(Racional)	Caudal de ponta de cheia pelo método Racional
C	Coefficiente de escoamento superficial
Q_(Giandotti)	Caudal de ponta de cheia pela equação de Giandotti
λ	Coefficiente de redução de Giandotti
Q_(Mockus)	Caudal de ponta de cheia pela equação de Mockus
Q_p	Caudal de precipitado
Q_m	Capacidade de escoamento da foz
n	Coefficiente de rugosidade
Q	Caudal
Q_s	Caudal de saída de descarregador
D_D	Densidade de drenagem
D_H	Densidade hídrica
D_m	Declive médio do curso de água principal
Deq	Declive equivalente
D₁₀₋₈₅	Declive 10-85
S’	Desvio padrão
L_s	Extensão média do escoamento superficial

Ec	Energia cinética
K_L	Fator de alongamento
K_r	Fator de Forma
K_t	Fator de frequência
Kc	Índice de Gravelius
I_{Relevo}	Índice relevo da bacia
i	Inclinação média do curso de água principal
R_B	Grau de ramificação
S	Grau de sinuosidade
le	Largura equivalente
B	Largura da secção de escoamento da foz
Lsd	Largura da soleira do descarregador
X_m	Média amostral
m	Massa
Pi	Perigosidade
d	Profundidade da inundação
P	Perímetro da bacia hidrográfica
Pest	Precipitação diária máxima anual estimada
b	Parâmetro de Forti
P_{útil}	Precipitação útil
Ni	Quantidade de canais com ordem “i”

SIGLAS

EEA	Agência Europeia do Ambiente
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
CEOT	Carta Europeia do Ordenamento do Território
COSRAM	Carta de Ocupação de Solos da Região Autónoma da Madeira
DGT	Direção Geral do Território
DREM	Direção Regional de Estatísticas da Madeira
DROTA	Direção Regional do Ordenamento do Território e Ambiente
FR	Fill Rate
HTS	Hidrograma Triangular Simplificado
IGT	Instrumentos de Gestão Territorial
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
IGA	Investimentos de Gestão de Água
LREC	Laboratório Regional de Engenharia Civil
LBPOTU	Lei de Bases da Política de Ordenamento do Território e de Urbanismo
MDT	Modelo Digital do Terreno
OT	Ordenamento do Território
PDM	Planos Diretores Municipais
PERRAM	Plano Estratégico de Resíduos da Região Autónoma da Madeira
PGRI-RAM	Plano de Gestão dos Riscos de Inundações da RAM
POT	Plano de Ordenamento Turístico
PEOT	Planos Especiais de Ordenamento do Território
PIMOT	Planos Intermunicipais de Ordenamento de Território
PMOT	Planos Municipais de Ordenamento do Território
POAAP	Planos de Ordenamento de Albufeiras de Águas Públicas
POAP	Planos de Ordenamento de Águas Protegidas
POOC	Planos de Ordenamento da Orla Costeira
POPA	Planos de Ordenamento de Parques Arqueológicos
PP	Planos de Pormenor
PPERAM	Plano de Política Energética da RAM
PRAM	Plano Regional da Água da Madeira
PRPA	Plano Regional de Política do Ambiente
PS	Planos Setoriais
PU	Planos de Urbanização
RAM	Região Autónoma da Madeira
RJIGT	Regime Jurídico dos Instrumentos de Gestão Territorial
RGSPDADAR	Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SRA	Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Hídricos
SRETC	Secretaria Regional da Economia, Turismo e Cultura
VAB	Valor Acrescentado Bruto

CAPÍTULO I
INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

Por “cheia” entende-se “*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, originando a inundação dos terrenos ribeirinhos*” (Ramos, 2013). Este tipo de fenómenos são formados como consequência de eventos naturais extremos que incidem sobre uma determinada bacia hidrográfica – e.g. chuvadas torrenciais, escorregamento de taludes, processo acelerado de degelo (Lousada & Camacho, 2018).

Esta temática assume, atualmente, um elevado grau de relevância, não apenas pelos elevados prejuízos a esta intrínsecos, como também por conta das projeções que têm vindo a ser delineadas. De acordo com Merz, *et al.* (2021), as cheias com impactos mais desastrosos tenderão a possuir um grau de incidência crescente no futuro, sobretudo em determinadas regiões do globo, como nos continentes asiático e africano. Tal deve-se, em parte, a fatores de natureza climática, nomeadamente às alterações que se verificarão no clima, e de natureza socioeconómica (Merz, *et al.*, 2021).

No caso específico da Madeira, a esses fatores acresce o excessivo grau de impermeabilização do solo, derivado de um processo de urbanização que não foi devidamente supervisionado por instrumentos de ordenamento territorial e regulamentação na área da construção adequados (Rodrigues J. R., 2018), o que, aliado ao vasto histórico de fenómenos desta natureza na Madeira (Gonçalves, 2020) – a título de exemplo, as cheias ocorridas em fevereiro de 2010, Figura 1 – faz com que esta temática assumam uma preponderância ainda maior nesta ilha em concreto.



Figura 1 – Cheias ocorridas no dia 20 de fevereiro de 2010 no Funchal, Madeira (Fonte: de Oliveira, *et al.*, 2011)

De facto, segundo Asiedu (2020), uma parcela significativa dos eventos de cheias analisados neste estudo – cerca de 40% – decorreram diretamente de um elevado grau de impermeabilização do solo por conta da urbanização. Logo, é possível associar o crescimento das áreas urbanas, sobretudo aquele que ocorre sem um planeamento adequado, a uma maior incidência deste tipo de fenómenos, não só pela menor capacidade de escoamento (Gonçalves, 2020), como também por um maior volume de prejuízos materiais e humanos, caso as populações, as propriedades, as infraestruturas e as atividades económicas se estabeleçam em áreas inundáveis (Ramos, 2013).

A este facto estão, ainda, associadas as alterações que, muitas vezes, são efetuadas ao leito original dos cursos de água; tal acontece, em parte, devido à concentração de edificações, infraestruturas e de atividades socioeconómicas nas áreas que rodeiam o curso de água (Camacho, 2015). No entanto, é importante ressaltar que a modificação dos cursos de água surge, em muitas ocasiões, como uma tentativa de mitigação dos efeitos das cheias (Gonçalves, 2020). Nesse sentido, Gonçalves (2020) refere que *“a implementação de um leito em betão além de permitir um melhor escoamento devido à redução do atrito com a água, torna-se um mecanismo de proteção ao leito original, evitando a intensificação das consequências destrutivas das cheias”*. No caso específico da Madeira, de acordo com de Oliveira, *et al.* (2011), ao longo das últimas décadas, têm sido levados a cabo múltiplos estudos e intervenções com o intuito de regularizar os leitos das ribeiras e de proteger as áreas circundantes.

Por outro lado, de referir, também, que os efeitos decorrentes das alterações climáticas surtirão consequências mais acentuadas nas áreas urbanas – desde logo, por conta de fenómenos como o da ilha de calor urbano, o que implicará uma mudança dos micro-climas dessas áreas – o que estará ligado a uma maior variabilidade a nível climático e a um nível mais elevado de severidade dos eventos de precipitação (Pour, *et al.*, 2020). À imagem disso, Camacho (2015) reforça que as modificações da precipitação apontam para uma maior frequência e intensidade desta, o que, desde logo, impactará o ciclo urbano da água e deverá ser levado em conta do ponto de vista do planeamento e da gestão de águas urbanas.

Posto isto, é perceptível que esta temática exige um estudo aprofundado e com um grau de fiabilidade elevado. No caso deste estudo em particular, serão analisadas algumas ribeiras localizadas nos concelhos de Câmara de Lobos, Santa Cruz, São Vicente e Porto Moniz, de modo a estudar, de forma mais aprofundada, a necessidade de implementação de medidas de prevenção e que consequências essas mesmas medidas poderiam trazer, do ponto de vista da mitigação dos efeitos das cheias na Madeira, sempre em linha com as diretrizes do planeamento urbano e com as legislações em vigor. Abaixo, apresentam-se os objetivos a serem retratados:

- Caracterizar e desenvolver ferramentas de modelação numérica unidimensional de escoamentos em linhas de águas dos concelhos da RAM (Região Autónoma da Madeira)

indicados anteriormente. Esta modelação possui análises de sensibilidade a diversos parâmetros, - e.g. dimensões das bacias hidrográficas; densidade de drenagem, coeficiente de rugosidade (Manning-Strickler); índice de urbanização; tempo de concentração; análise probabilística de cheias; entre outros;

- Verificação dos parâmetros calculados para garantir a suscetibilidade às cheias das bacias hidrográficas estudadas;
- Dimensionar uma bacia de retenção para os canais que revelem uma insuficiente capacidade de escoamento na foz;
- Análise dos modelos propostos, tendo como base as diretrizes de planeamento urbano vigentes na RAM, atualmente;
- Análise do impacto territorial pelo modelo proposto.

1.2. METODOLOGIA

Primeiramente, executou-se um estudo sobre as bacias hidrográficas em questão através de uma vasta bibliografia disponível, com o propósito de verificar diversos parâmetros que condicionam os canais de águas e, consequentemente, que influenciam o fenómeno das cheias. Este procedimento levou em consideração todas as normas e legislações em vigor na ilha da Madeira, sobretudo, do ponto de vista do planeamento urbano.

Para a caracterização das bacias hidrográficas em estudo, referidas na Tabela 1, recorreu-se aos ficheiros MDT (Modelo Digital do Terreno), obtidos no LREC (Laboratório Regional de Engenharia Civil) e, com o apoio do *software ArcGIS*, foram retirados os valores geomorfológicos. Estes valores foram, posteriormente, aplicados segundo diversas formulações de autores diferentes; este processo teve como principal objetivo o de obter valores médios e, consequentemente, mais fiáveis e precisos.

Concelho	Bacias
Câmara de Lobos	Ribeira dos Socorridos
	Ribeira do Vigário
Santa Cruz	Santa Cruz
	Porto Novo
São Vicente	Ribeira da Vargem
	São Vicente
Porto Moniz	Seixal
	Ribeira da Janela

Tabela 1 – Bacias hidrográficas em estudo (Fonte: Autor, 2022)

De seguida, através de um estudo probabilístico, que incidiu sobre o histórico de precipitações em cada uma das bacias, realizou-se uma análise quantitativa dos caudais em eventos raros com um período de retorno de 100 anos. Visto que algumas bacias hidrográficas analisadas não possuem estação udométrica, foi necessário utilizar valores de estações adjacentes. É de salientar, ainda, que a análise amostral pode ser, eventualmente, afetada, pois muitos dos relatórios de precipitação encontram-se incompletos. Com o auxílio do *software Microsoft Excel* foi aplicada a metodologia da Distribuição Probabilística de Gumbel, utilizando os valores máximos diários em cada ano retirados do website do SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos).

Outra etapa é a verificação de escoamento da foz de algumas ribeiras dos concelhos em estudo através da fórmula de Manning-Strickler, comparando-a com o caudal previsível para um evento de recorrência de 100 anos. Dimensionou-se uma bacia de detenção, considerando um cenário onde o escoamento na foz não é suficiente, em linha com aquelas que são as características do local.

Resumidamente, a metodologia adotada nesta dissertação pode ser sintetizada através da Figura 2 abaixo.

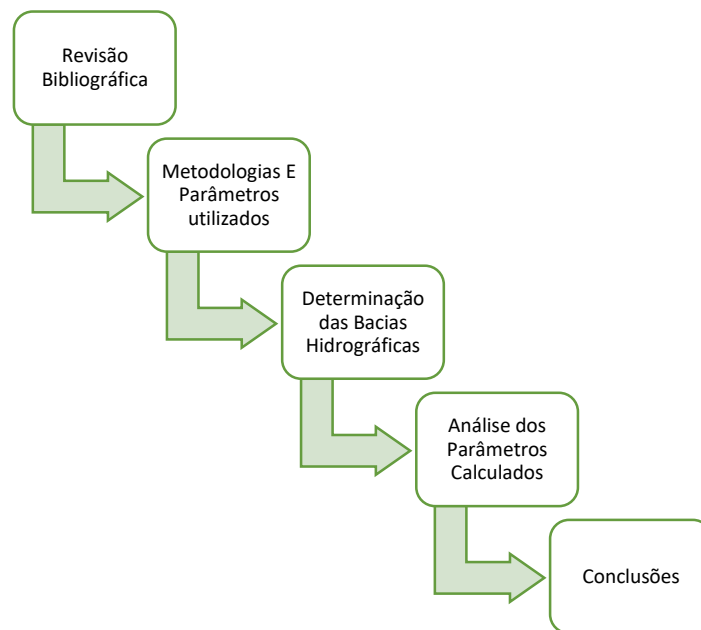


Figura 2 – Metodologia Adotada. (Fonte: Autor, 2022)

1.3. ESTRUTURA

A presente dissertação tem como intuito a conclusão do Mestrado em Engenharia Civil, sendo constituída por 6 capítulos, apresentados na seguinte forma:

- I. No capítulo I apresentam-se as justificações para a elaboração da presente dissertação, os objetivos, a metodologia e a estrutura desta;
- II. No segundo capítulo, é realizado um enquadramento da temática a ser abordada ao longo deste estudo, bem como um enquadramento do local onde este estudo incidirá, mais concretamente, a Madeira;
- III. Por terceiro obteve-se a abordagem teórica para a caracterização das bacias hidrográficas em estudo. Também apresenta a análise para a determinação do caudal de ponta de cheia a ser utilizado para o dimensionamento das bacias de retenção, utilizando o modelo estatístico/probabilístico;
- IV. O quarto capítulo mostra a caracterização das bacias hidrográficas em estudo, obtidas através do *software ArcGIS*, da respetiva análise efetuada através dos valores obtidos e da comparação destes com os parâmetros provenientes das revisões bibliográficas;
- V. No quinto capítulo são realizadas as considerações finais de todo o percurso de trabalho e são descritas algumas possibilidades de desenvolvimento da investigação executada;
- VI. Por último, o sexto capítulo, onde apresentam-se todos os anexos, desenvolvidos ao longo do trabalho e que foram úteis na elaboração da dissertação.

CAPÍTULO II

ENQUADRAMENTO

2.1. ENQUADRAMENTO LOCAL

2.1.1. Localização e População

A ilha da Madeira pertence a um arquipélago que está inserido numa região autónoma de Portugal e localiza-se no Oceano Atlântico, compreendida entre as latitudes de 30° 01' N e 33° 08' N e entre as longitudes 15° 51' W e 17° 30' W do meridiano de Greenwich (Prada, *et al.*, 2005). Esta situa-se a, aproximadamente, 900 km a sudoeste de Portugal Continental; por outro lado, encontra-se a uma distância de cerca de 700 km para oeste da costa de Marrocos (Baioni, 2011). A ilha da Madeira, principal ilha do arquipélago ao qual dá nome, possui cerca de 58 km de comprimento e uma largura máxima a rondar os 23 km (Baioni, 2011); quanto à sua área, esta situa-se nos 737 km², possuindo cerca de 153 km de linha de costa (Prada, *et al.*, 2005). A outra ilha habitada do arquipélago, o Porto Santo, tem 42,17 km² de área, ao passo que as Desertas e as Selvagens, pequenas ilhas não habitadas, situam-se nos 14,23 km² e nos 3,62 km² de área, respetivamente (Gonçalves, 2020).

De acordo com os Resultados Provisórios dos XVI Recenseamento Geral da População e VI Recenseamento Geral da Habitação (Censos 2021), disponibilizados pela Direção Regional de Estatística da Madeira (DREM), a população na Região Autónoma da Madeira (RAM) era, à data, de 250 769 habitantes, sendo que 245 618 desses habitantes residiam na ilha da Madeira. A nível da RAM, estes registos implicam uma queda na ordem dos 6,4%, em termos populacionais, na última década, queda essa que abrangeu todos os municípios da Região. Dentre todos os municípios, destacam-se Machico (-10,2%), São Vicente (-15%) e Santana (-15,1%) como aqueles onde se registaram as variações percentuais mais acentuadas, à semelhança do que mostra a Figura 3.

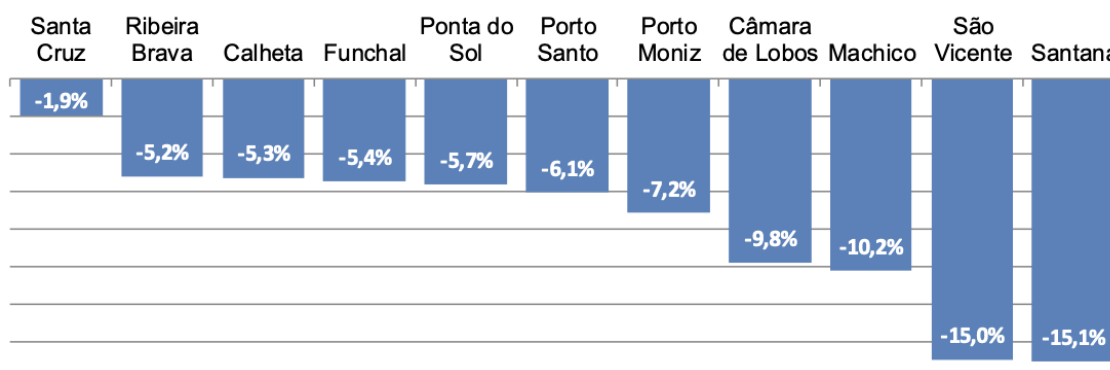


Figura 3 – Variação percentual da população residente, por município, na RAM, entre 2011 e 2021

(Fonte: DREM, 2021)

A ilha da Madeira continua a registar um elevado nível de concentração populacional no município do Funchal – em 2021, cerca de 43,1% dos habitantes da ilha da Madeira residiam no

Funchal. De facto, uma parcela significativa das freguesias com maiores níveis de densidade populacional situa-se no município do Funchal, conforme demonstra a Figura 4 abaixo. Note-se, ainda, que dentre as NUTS II, a Região Autónoma da Madeira (313,6 habitantes por km²) é a segunda região com maior densidade populacional, atrás apenas da Área Metropolitana de Lisboa (953 habitantes por km²), de acordo com as estimativas anuais da população residente para 2021 (PORDATA, 2022).

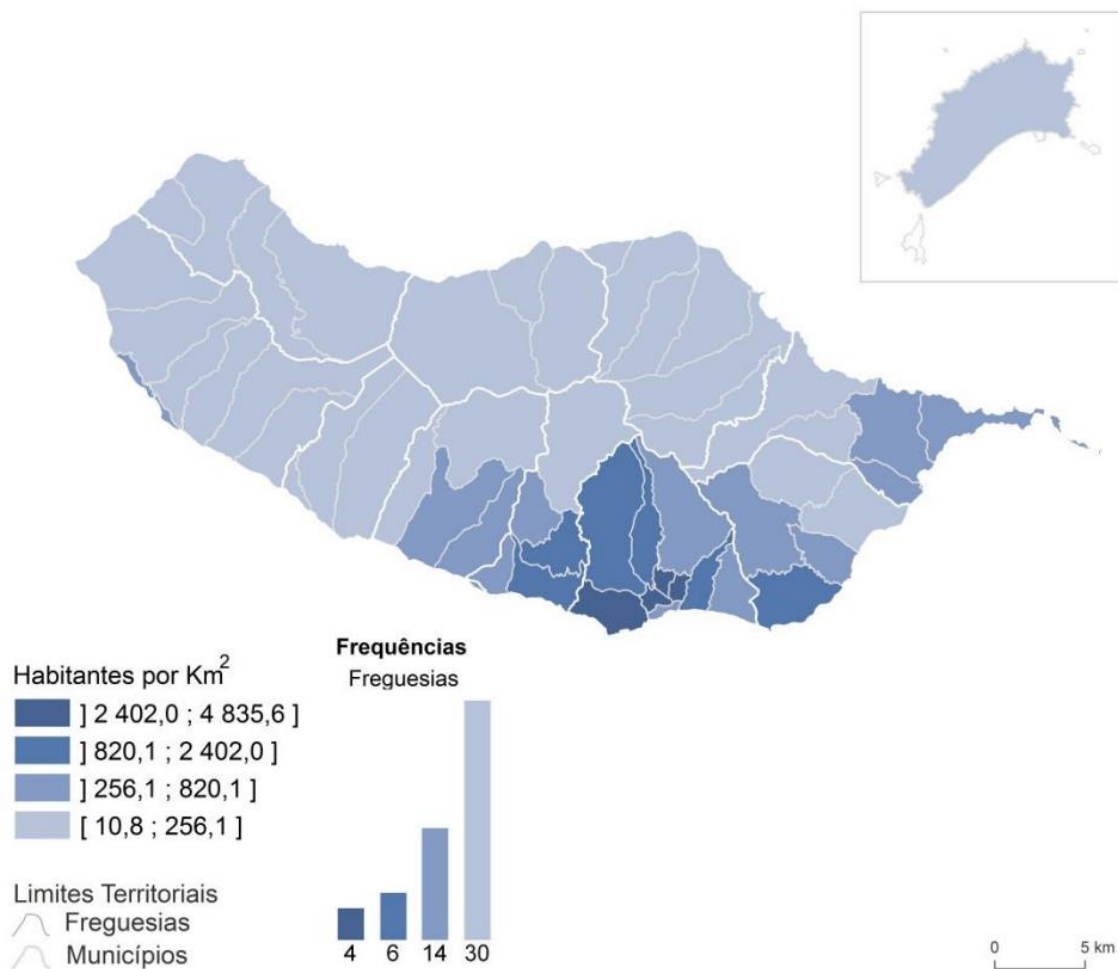


Figura 4 – Densidade populacional na RAM, por freguesia, em 2021 (Fonte: DREM, 2021)

Como mostra a Figura 5, os municípios do norte da ilha (Porto Moniz, São Vicente e Santana) são os que apresentam uma parcela maior de população acima dos 65 anos e surgem como o expoente máximo do fenómeno de envelhecimento que se tem vindo a registar na RAM: entre os anos de 2001 e 2021, a população com 65 ou mais anos passou de uma representatividade de 13,7% para uma de 20% da população residente.

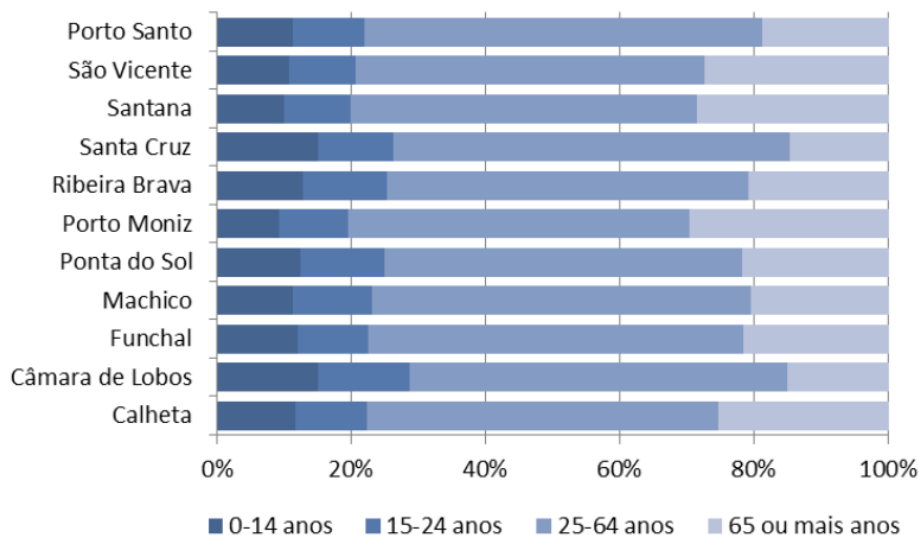


Figura 5 – Distribuição da população residente, por grupos etários e por município, na RAM, em 2021 (Fonte: DREM, 2021)

2.1.2. Economia Local

Em termos de Produto Interno Bruto (PIB), a RAM registava uma tendência de crescimento, entre os anos de 2016 e 2019, sendo que, em 2019, o valor do PIB da Região situava-se nos 5126,4 milhões de euros. No entanto, com o surgimento da pandemia em 2020, o PIB da RAM evoluiu negativamente, registando um valor de 4461,7 milhões de euros (DREM, 2021).

Do ponto de vista do PIB *per capita*, expresso em Paridades de Poder de Compra (PPC), a RAM encontra-se atrás da média nacional e da média da União Europeia, quer em 2018, quer em 2019, conforme a Figura 6 demonstra (INE, 2020).

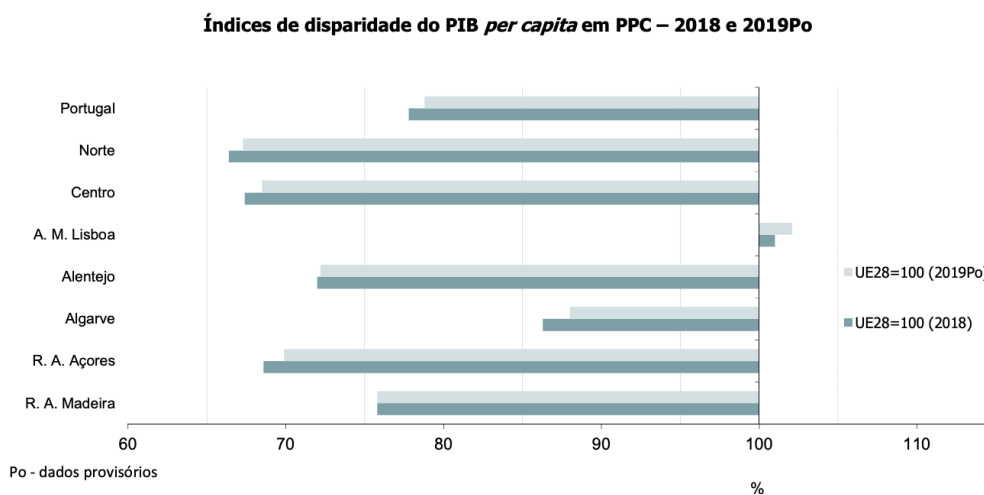


Figura 6 – Índices de disparidade do PIB per capita em PPC por NUTS II, em 2018 e 2019 (Fonte: INE, 2020)

Entre os anos de 2011 e 2020, a concentração da população empregada na RAM no setor terciário aumentou. No primeiro trimestre de 2011, onde já se verificava um considerável nível de terceirização da economia da Região (72,5% da população empregada encontrava-se no setor dos serviços), os setores primário (agricultura, produção animal, caça, floresta e pesca) e secundário (indústria, construção, energia e água) ainda representavam 11,3% e 16,2% da população empregada, respetivamente. Contudo, no último trimestre de 2020, os serviços abrigavam cerca de 77,9% da população empregada na RAM, enquanto que os setores primário (8,5%) e secundário (13,6%) englobavam a restante população empregada na RAM (DREM, 2022).

Dentro do setor terciário, à imagem daquilo que se verifica em Portugal como um todo, a economia da RAM também tem na atividade turística um dos seus principais motores (Turismo de Portugal, 2017) (Teixeira & Ribeiro, 2019). Em particular, a Madeira é considerada como sendo “um dos destinos turísticos mais antigos do mundo” (Almeida, 2016) e destaca-se, sobretudo, pela natureza, pelas paisagens, pela biodiversidade e por ser um destino seguro (Almeida, 2016) (Garcês, Pocinho, & de Jesus, 2020).

Após a queda registada no turismo, a nível global, no ano de 2020, fruto da pandemia do COVID-19 (Farzanegan, Gholipour, Feizi, Nunkoo, & Andargoli, 2020), durante o ano de 2021 foi já possível verificar alguns sinais de retoma neste setor em Portugal. Em 2021, ainda que condicionados pelos efeitos da pandemia, o número de chegadas a Portugal de turistas não residentes ascenderam aos 9,6 milhões, o que representa um aumento de 48,4% face a 2020 (INE, 2021). Do ponto de vista da RAM, o cenário foi, em parte, semelhante ao verificado a nível nacional, na medida em que o ano de 2021 representou um ano de retoma na atividade turística, contudo sem que fossem registados os valores médios obtidos no ano de 2019, o que fica demonstrado pelas médias apresentadas na Figura 7 (DREM, 2022).

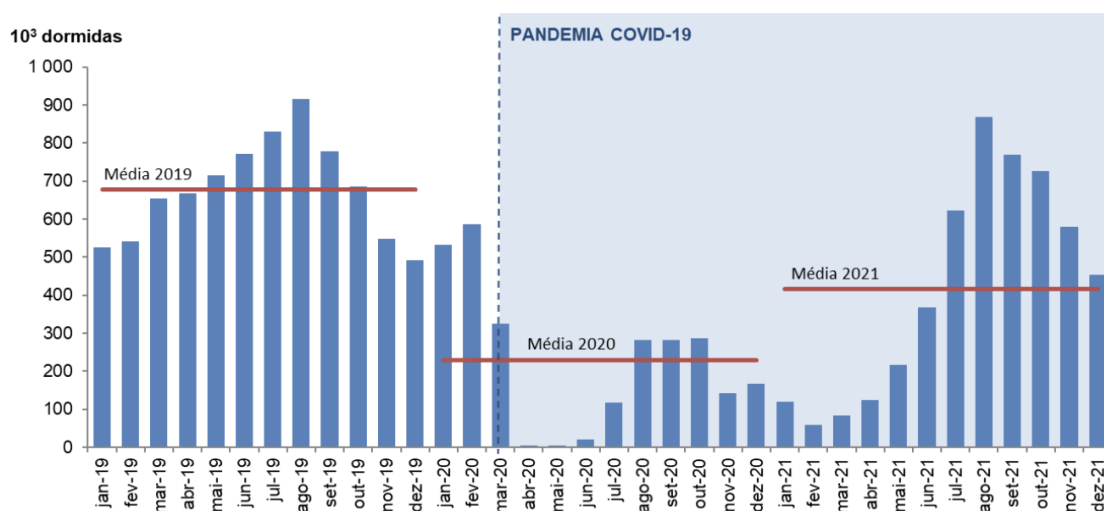


Figura 7 – Número de dormidas em alojamentos turísticos coletivos na RAM, por mês, entre 2019 e 2021 (Fonte: DREM, 2022)

2.1.3. Formação Geomorfológica

A ilha da Madeira provém de origem vulcânica, sendo esta uma das partes culminantes, acima do nível do mar, do relevo vulcânico da região. O seu relevo é predominantemente acentuado, caracterizado por cerca de 25% da sua superfície acima da marca dos 1000 m de altitude e pelos declives elevados, sendo que cerca de 65% da superfície da ilha possui um declive de, pelo menos, 25%. Como tal, as áreas planas são pouco abundantes na ilha da Madeira, sendo que tal pode ser estendido às costas baixas, uma vez que são mais comuns as arribas com centenas de metros de altitude (Prada, 2000).

Dois outros aspetos que merecem destaque, do ponto de vista geomorfológico, são a classificação da Madeira e das Desertas como sendo dois braços de *rift* – braços esses que se interseitam, na região da Ponta de São Lourenço, num ângulo de cerca de 110°, à semelhança do que se encontra ilustrado na Figura 8 – e, por outro lado, a existência de uma linha de cones vulcânicos submersos, localizados na latitude do Funchal – e que, por isso, detém o nome de Crista do Funchal – cujos diâmetros variam entre os 1,5 e os 3 km e com alturas que podem chegar até aos 600m (Mata, *et al.*, 2013) (Klügel & Klein, 2006) (Geldmacher, *et al.*, 2006).

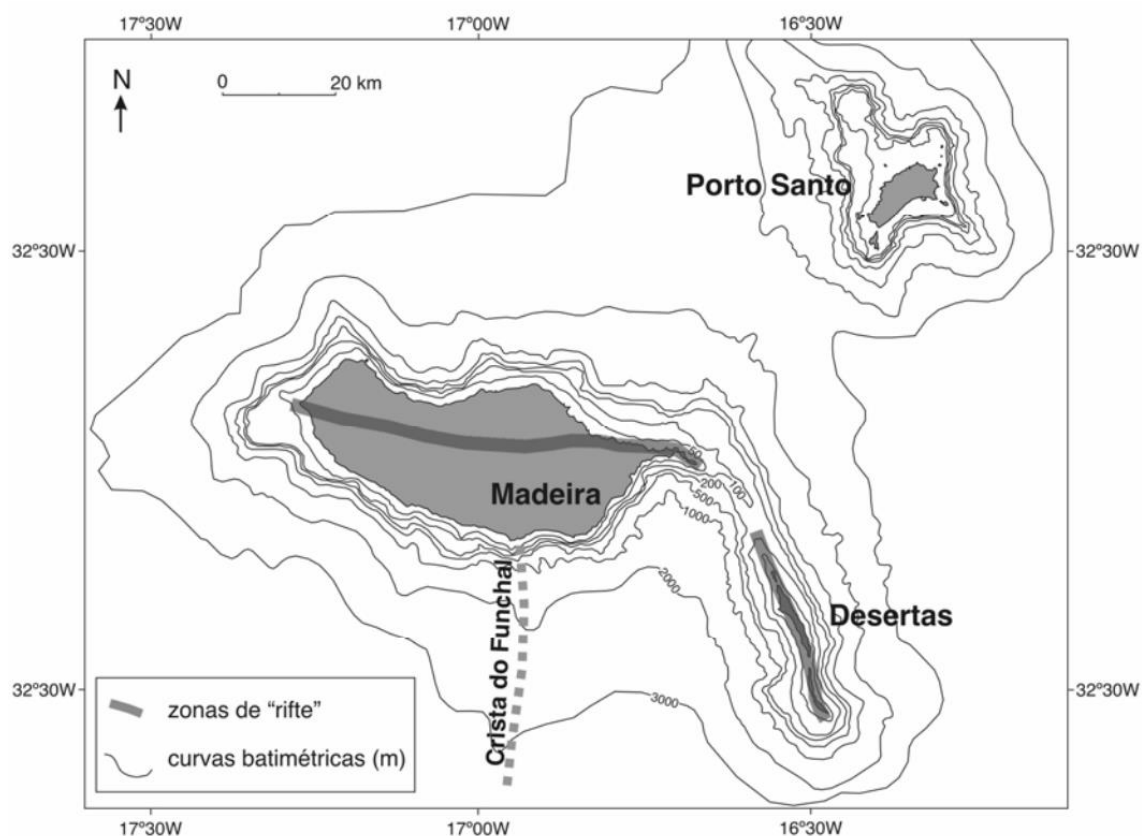


Figura 8 – Batimetria das ilhas da Madeira, de Porto Santo e das Desertas (Fonte: Mata, *et al.*, 2013)

É comum, quer por motivos de proximidade, quer pelas características geológicas, analisar as ilhas Selvagens separadamente das restantes ilhas que compõem o arquipélago – aquilo a que Mata, *et al.* (2013) apelida de grupo Madeira-Desertas-Porto Santo (MDPS). De facto, em termos geológicos, o grupo MDPS está situado no domínio oceânico; por outro lado, as Selvagens num alto batimétrico que se encontra entre os domínios oceânico e continental africano, para além do facto do facto de que as Selvagens podem ser encaradas como um caso individual dentro do arquipélago pelos dados geoquímicos e pelo facto de estas ilhas estarem na província vulcânica de Canárias (Geldmacher, Hoernle, Bogaard, Duggen, & Werner, 2005) (Krstel & Schmincke, 2002).

2.1.4. Climatologia

De modo a abordar e analisar os tópicos que se seguem, é importante explorar o conceito de ciclo hidrológico. O ciclo hidrológico pode ser entendido como a “*sequência fechada dos processos envolvidos no movimento contínuo da água entre a Terra e a atmosfera*” (Lousada & Camacho, 2018), sendo que este movimento é mantido, ininterruptamente, pela ação na energia do sol e pela gravidade (Lousada & Camacho, 2018).

Dentro do ciclo hidrológico, há lugar à ocorrência de múltiplos processos, processos esses que se encontram visíveis na Figura 9; dentre esses processos, destacam-se o de evaporação, o de sublimação e o de transpiração, que contribuem para a transferência de água, proveniente da superfície terrestre, para a atmosfera. Adicionalmente, nota, ainda, para os processos de condensação – que ocorre, de forma parcial, ao vapor de água da atmosfera – de transferência de água da atmosfera para o solo, quer esta se encontre no estado líquido ou sólido, de transporte desse mesmo vapor de água pela atmosfera, de infiltração da água na superfície terrestre – alimentando, dessa forma, os aquíferos – o de retenção da água em lagos, glaciares ou vegetação e o de escoamento da água através da superfície terrestre rumo aos oceanos (Lousada & Camacho, 2018) (IST, 2018).

De um ponto de vista global, o ciclo hidrológico pode ser encarado como um sistema fechado. Tal deve-se a características como as de finitude e de indestrutibilidade que são intrínsecas à água, o que implica que a quantidade de água mobilizada pelo ciclo hidrológica é constante e, em termos anuais, possui um valor aproximado de 624 000 km² (Lousada & Camacho, 2018) (Porto & Filho, 2005).

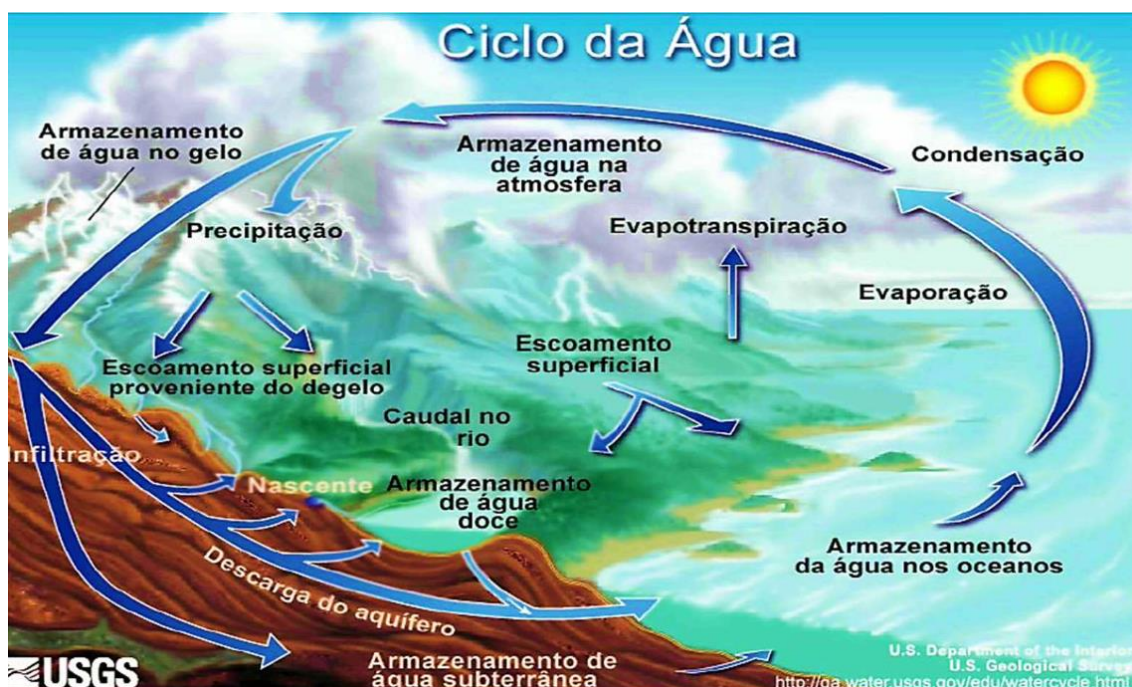


Figura 9 – Ciclo hidrológico e os processos a ele intrínsecos (Fonte: Lousada & Camacho, 2018)

2.1.4.1. Precipitação

De acordo com Rodrigues, *et al.* (2011) e de Carvalho & da Silva (2006), entende-se por precipitação a água meteórica (chuva, chuveiro, aguaceiro, neve e granizo) que cai sobre a superfície terrestre e que tem origem no vapor de água presente na atmosfera. O fenómeno da precipitação, da perspectiva do estudo das cheias, é de extrema relevância, uma vez que, a par de fatores de natureza fisiográfica e climatológica, a distribuição temporal e espacial da precipitação é um dos fatores mais preponderantes para a alteração das condições de cheia (Lousada & Camacho, 2018).

Para que o fenómeno de precipitação ocorra, alguns fatores deverão estar presentes, nomeadamente a humidade atmosférica, a ascensão do ar húmido e a presença de núcleos higroscópios; por outro lado, para que as gotas se formem e cresçam, poderá existir um choque entre as gotas pequenas, de modo a que estas originem uma maior (coalescência), ou então a condensação do vapor de água sobre a superfície de uma gota pequena (de Carvalho & da Silva, 2006). Note-se que, para que ocorra o fenómeno de condensação do vapor de água, é necessário que aconteça uma diminuição da temperatura, fruto da subida do vapor de água na atmosfera, ou então que se verifique um aumento do teor de vapor de água, isto é, um aumento de água no seu estado gasoso. De ressaltar, ainda, que a presença de núcleos de condensação, como poeiras, sal marinho, iões ou fumo, é imprescindível para este processo (Nahettini, 2012) (Lousada & Camacho, 2018).

Segundo Rodrigues, *et al.* (2011), Lousada & Camacho (2018) e de Carvalho & da Silva (2006), as precipitações podem ser classificadas como sendo ciclônicas, convectivas ou orográficas. Primeiramente, no que toca às precipitações de natureza ciclônica, estas “*estão associadas com o movimento de massas de ar de regiões de alta pressão para regiões de baixa pressão. Essas diferenças de pressões são causadas por aquecimento desigual da superfície terrestre (de Carvalho & da Silva, 2006)*”, como mostra a Figura 10.

Este tipo de precipitação, comumente de longa duração, apesar de possuir intensidade média, tem um poder de alcance bastante elevado, sendo, para além disso, por vezes, acompanhado de ventos fortes de circulação ciclônica. Este tipo de precipitação em particular ganha uma particular relevância dentro do tópico das cheias, uma vez que as chuvas de origem ciclônica levam à formação de cheias em grandes bacias (Lousada & Camacho, 2018) (Rodrigues, *et al.*, 2011).

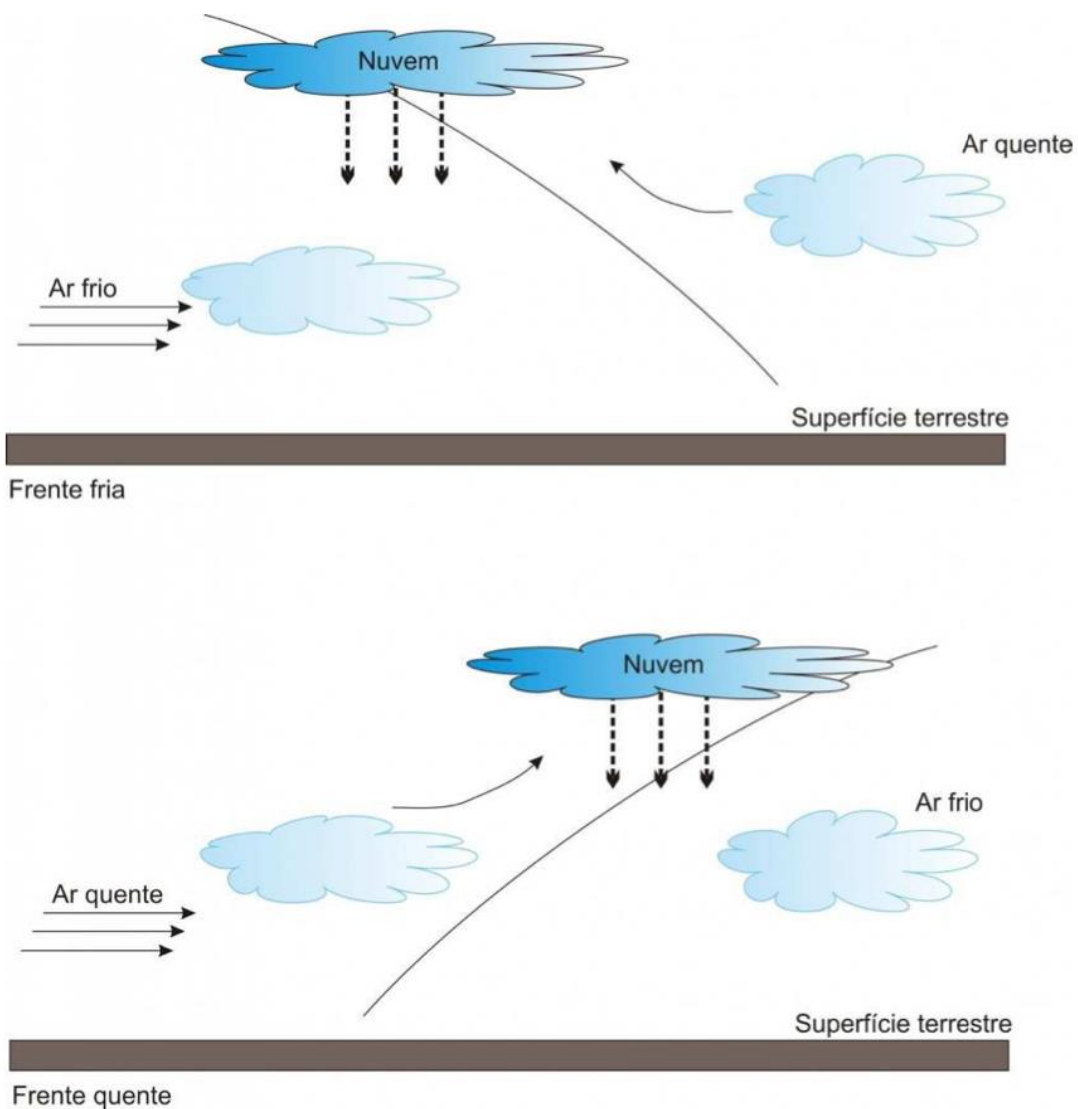


Figura 10 – Processo de formação de precipitação de natureza ciclônica (Fonte: Estúdio Conejo, 2014)

Note-se, ainda, que, dentro da precipitação de origem ciclônica, há lugar à divisão da classificação entre frontal, que resulta da subida da massa de ar quente sobre o ar frio, sendo o tipo mais comum, e não frontal, que tem origem numa baixa barométrica, onde o ar ascende por conta da existência de uma convergência horizontal que ocorre em áreas onde a pressão é baixa (de Carvalho & da Silva, 2006).

Relativamente à precipitação de origem convectiva, estas derivam diretamente do aquecimento de uma massa de ar, aquecimento esse que ocorre sobre a superfície terrestre, o que faz com que haja lugar a uma subida brusca do ar menos denso, que irá atingir uma temperatura que permite o início do processo de condensação, como ilustra a Figura 11. Fruto desse processo de condensação, haverá lugar à formação de nuvens e, conseqüentemente, à ocorrência de precipitação. Esta precipitação costuma ser de grande intensidade e acompanhada, não raras vezes, por trovoada, porém possui, regra geral, uma duração mais reduzida e são mais localizadas, afetando, particularmente, as regiões tropicais. Logo, à partida, apenas as bacias hidrográficas de menores dimensões serão afetadas por cheias aquando da ocorrência de precipitação desta natureza (Lousada & Camacho, 2018) (Rodrigues, *et al.*, 2011).

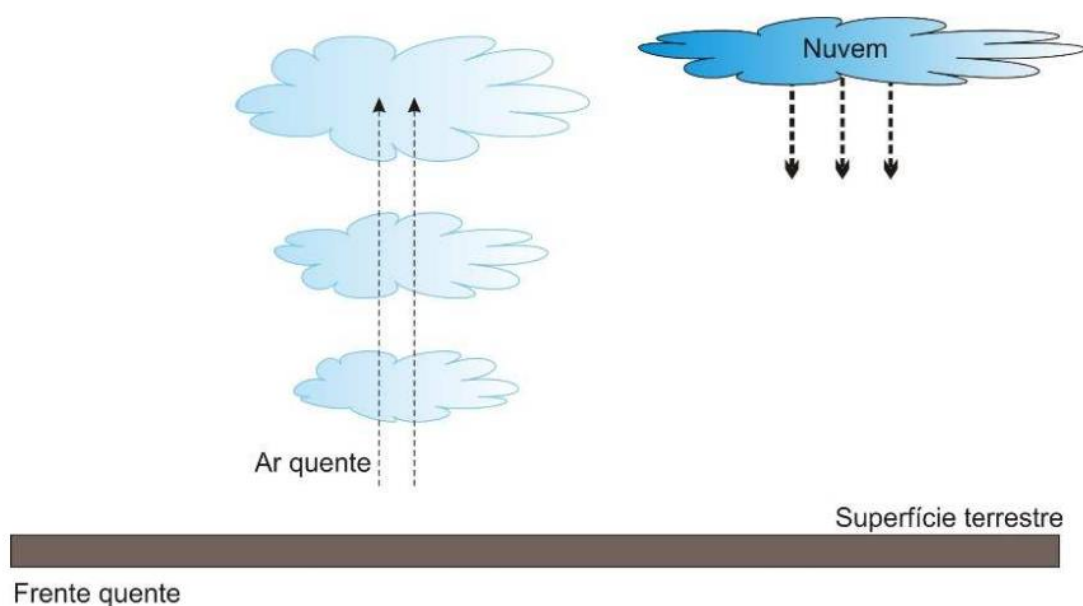


Figura 11 – Processo de formação de precipitação de natureza convectiva (Fonte: Estúdio Conejo, 2014)

Por fim, à semelhança do que mostra a Figura 12, no que à precipitação de origem orográfica diz respeito, esta ocorre quando uma massa de ar é forçada a ascender devido ao seu cruzamento com barreiras naturais, como cadeias montanhosas. Esse facto faz com que o ar arrefeça até uma temperatura inferior à de saturação, dando origem, portanto, a nuvens e a precipitação, precipitação essa que, geralmente, é caracterizada como sendo de reduzida intensidade, mas, por vezes, de longa duração (de Carvalho & da Silva, 2006) (Lousada & Camacho, 2018) (Rodrigues, *et al.*, 2011).

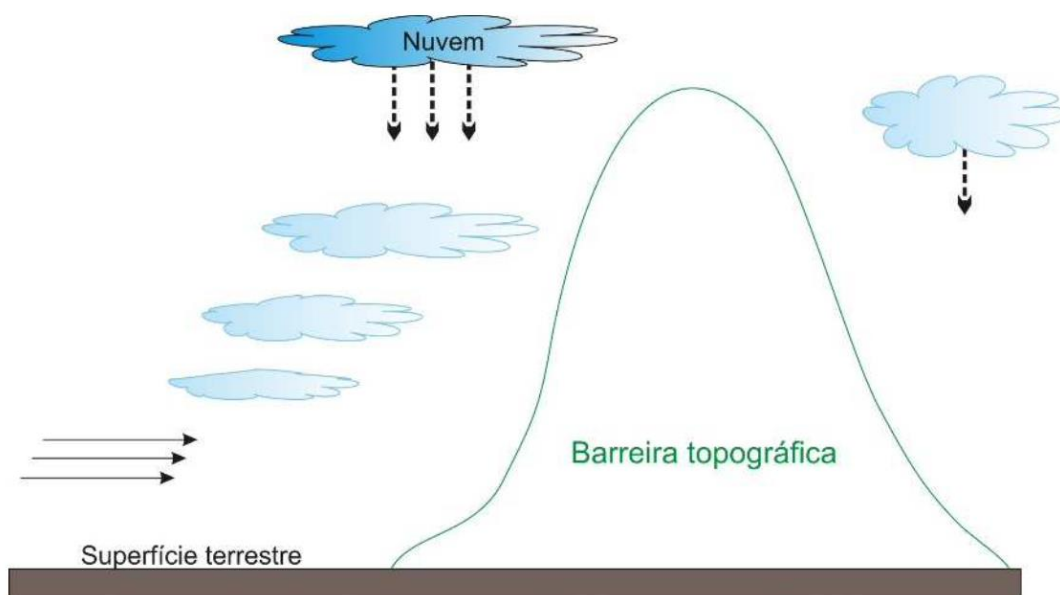


Figura 12 – Processo de formação de precipitação de natureza orográfica (Fonte: Estúdio Conejo, 2014)

2.1.4.2. Pluviometria

De acordo com Lousada & Camacho (2018), o termo “pluviometria” refere-se à quantificação da água precipitada sobre uma determinada superfície, durante um determinado período. Por outro lado, entende-se por módulo pluviométrico “a média aritmética anual dos valores de precipitações mensais” (da Costa & Lança, 2011); note-se que, de acordo com as recomendações da Organização Meteorológica Mundial, os módulos pluviométricos devem ser calculados tendo como base um número de observações de, pelo menos, 30 anos (da Costa & Lança, 2011).

Posto isto, para o efeito de medição de chuva, a quantidade de chuva é medida através da altura da água acumulada e que caiu sobre uma superfície plana e impermeável. Neste exercício de medição, recorre-se a grandezas como a altura pluviométrica, expressa, normalmente, em mm ou em l/m^2 , a duração, que corresponde ao período temporal que separa o início e o término do evento de precipitação, em horas ou minutos, e a intensidade de precipitação, expressa em mm/h ou em mm/minuto e que corresponde à relação entre a altura pluviométrica e o tempo de duração da chuva (da Costa & Lança, 2011).

A medição é, geralmente, feita recorrendo a aparelhos chamados de udómetros/pluviómetros, que registam a quantidade de precipitação, expressa em altura, ocorrida durante um determinado período, e udógrafos/pluviógrafos, que representam, através de um gráfico denominado de udograma, a precipitação caída, permitindo, dessa forma, compreender a intensidade de precipitação durante esse período; estes aparelhos ficam localizados nos chamados postos udométricos (ISEL, 2015) (Lousada & Camacho, 2018). Apesar de tudo, há que ressaltar possíveis incongruências nas medições realizadas por este tipo de aparelhos, quer por conta de

defeitos presentes no próprio aparelho, ou por conta dos efeitos provocados pela evaporação e pelo vento, sendo que este último poderá afetar a trajetória da precipitação e, dessa forma, comprometer a fiabilidade dos resultados obtidos (Lousada & Camacho, 2018).

2.1.4.3. Infiltração

O conceito de infiltração está relacionado com o processo de penetração da água no solo e com o posterior movimento descendente dessa mesma água, em direção ao lençol freático, devido à ação não só da gravidade, como também do potencial capilar (da Costa & Lança, 2011). A capacidade de infiltração é uma característica do solo que está ligada à quantidade máxima de água que esse solo, num determinado período, pode absorver.

No entanto, vale a pena ressaltar que essa capacidade possui a particularidade de ser inconstante, no sentido em que a velocidade de infiltração da água num dado solo, durante um evento de precipitação, por exemplo, não é a mesma ao longo de todo o evento; tal acontece porque, no início, a capacidade de infiltração do solo é consideravelmente superior àquela que se verifica no término da precipitação, a chamada taxa permanente de infiltração (Sales, Ferreira, de Oliveira, & Curi, 1999).

Assim, a diminuição da taxa de infiltração do solo ao longo do evento de precipitação, visível na Figura 13, levará a que a água comece a escoar rumo à rede hidrográfica, dando início ao processo de escoamento superficial (ISEL, 2015).

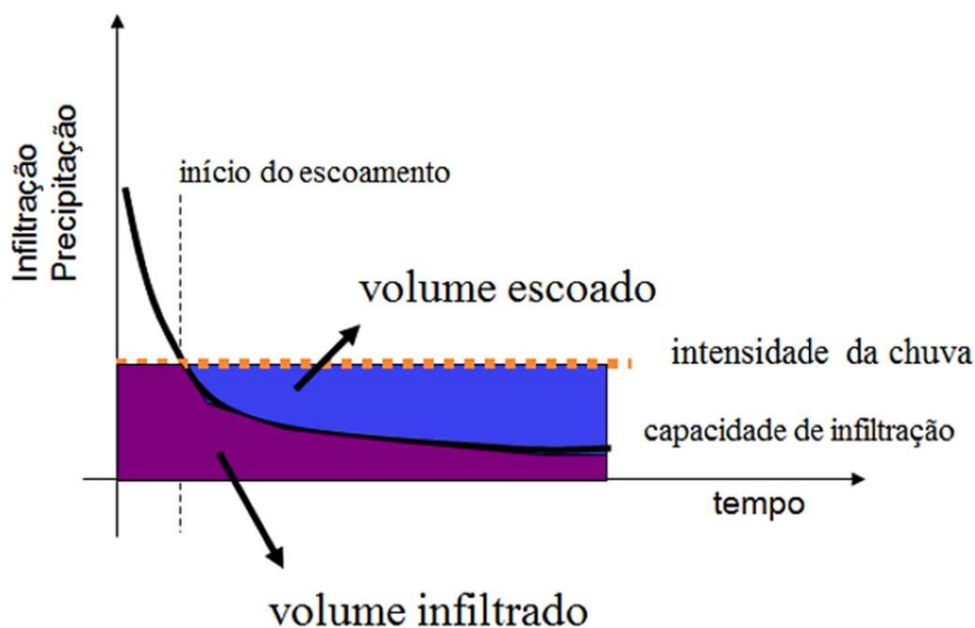


Figura 13 – Processos de infiltração e de escoamento durante um evento de precipitação contínuo

(Fonte: Andrade, 2014)

Associado a este termo estão, ainda, os conceitos de intensidade de infiltração, que corresponde ao caudal de água que penetra o solo, sendo expressa sobre a forma de uma velocidade, juntamente com o de infiltração acumulada, um conceito que está associada ao volume de água que se infiltra no solo durante um determinado espaço de tempo (Lousada & Camacho, 2018) (Hipólito & Vaz, 2011).

Note-se que, de acordo com ISEL (2015) e da Costa & Lança (2011), o processo de infiltração da água na superfície terrestre é afetado por diversos fatores, nomeadamente alguns de ordem natural, como a cobertura vegetal do local, uma vez que esta impede que uma parcela dessa água atinja o solo, num fenómeno denominado de interceção. Relativamente à água que, por outro lado, se infiltra no solo, definem-se quatro zonas, que se encontram delineadas na Figura 14 (ISEL, 2015).

- **Zona de água no solo (ou zona do solo):** zona mais superficial do solo, onde a água que se encontra retida pode ainda regressar à atmosfera, consequência da evaporação ou da transpiração da vegetação da região;
- **Zona intermédia:** está situada logo abaixo da zona de água do solo, sendo que, ao contrário do que ocorre na zona que se encontra acima, a água retida nesta zona já não regressa a atmosfera por meio dos processos acima referidos;
- **Franja capilar:** corresponde a uma pequena camada situada entre as zonas intermédia e de saturação onde a água sobe devido aos efeitos da capilaridade;
- **Zona de saturação (ou zona saturada):** corresponde à camada mais inferior, onde os vazios do terreno estão ocupados com água, água essa que é designada por água do subsolo ou água das reservas subterrâneas.

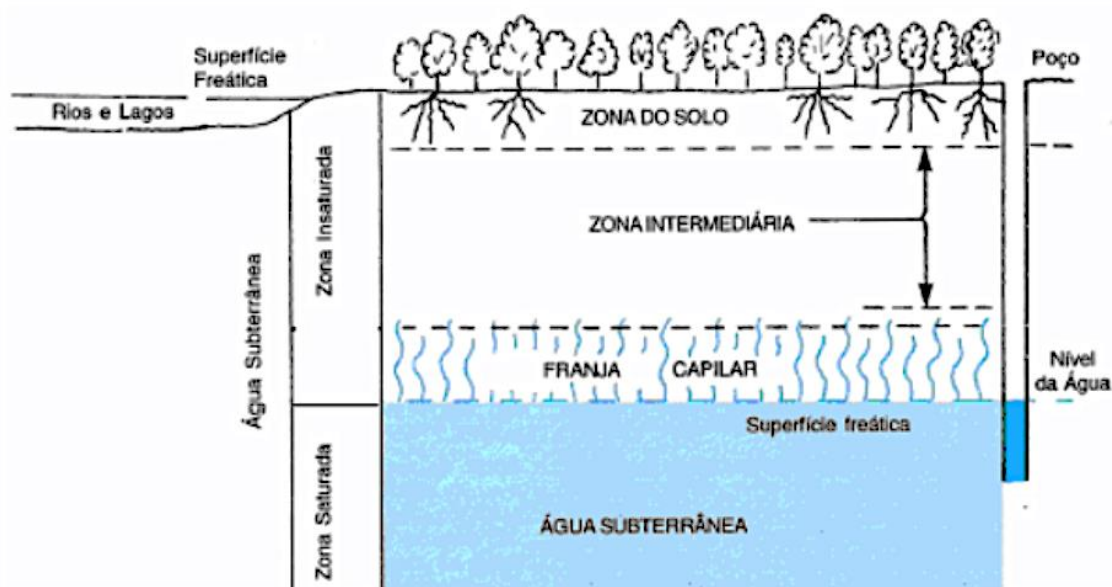


Figura 14 – Camadas do solo (Fonte: Martelli, 2012)

2.1.4.4. Uso e Ocupação do Solo

Conforme referido anteriormente, o processo de infiltração é condicionado, em parte, por fatores como a cobertura vegetal do solo. Logo, é perceptível que o uso e a ocupação do solo são aspetos a ter em conta para uma correta análise do ciclo hidrológico de uma determinada bacia hidrográfica.

Primeiramente, no que diz respeito à ocupação do solo, esta pode ser dividida em três categorias: floresta, cultivo ou urbanização (Rodrigues, *et al.*, 2011). No que toca à primeira delas, a ocupação do solo por floresta, a infiltração da água no solo será mais elevada, não obstante o facto que a floresta, por conta da presença de vegetação de maior porte, oferece barreiras naturais mais significativas para a água proveniente da precipitação, o que torna o processo de interceção mais eficaz. Para além disso, perante uma área florestal onde o solo é profundo, a camada do solo sujeita à evaporação é maior, o que implica que a água que se encontra armazenada nessa zona poderá regressar à atmosfera por ação da evaporação ou da transpiração. Assim, principalmente nas regiões onde a precipitação é abundante e se encontra bem distribuída ao longo do ano, a evapotranspiração total anual é superior nas regiões florestais (Rodrigues, *et al.*, 2011) (Lousada & Camacho, 2018).

Já do ponto de vista dos solos ocupados por áreas de cultivo, a vegetação que ocupa o solo é caracterizada por possuir um menor porte e um período vegetativo mais curto. Tal implica uma diminuição da evapotranspiração e, por outro lado, um aumento do escoamento superficial, efeitos semelhantes àqueles registados em consequência da desflorestação. Adicionalmente, o facto de, durante uma parte do ano, o solo se encontrar desprovido ou pouco coberto de vegetação, levará a um maior nível de irregularidade do caudal dos rios, bem como à ocorrência de cheias com caudais de ponta mais altos (Rodrigues, *et al.*, 2011) (Lousada & Camacho, 2018).

Finalmente, o fenómeno de urbanização traz um elevado grau de impermeabilização do solo, o que implicará um menor nível de infiltração e de retenção superficial. Note-se que, neste cenário, haverá também uma tendência para o aumento das pontas de cheia e para o decréscimo do nível das reservas subterrâneas (Rodrigues, *et al.*, 2011) (Lousada & Camacho, 2018).

2.1.4.5. Aluviões e Cheias

O termo “cheia” é classificado pela *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) como sendo uma condição de inundação, seja ela parcial ou total, de 2 ou mais acres de área habitualmente seca ou então de 2 ou mais propriedades, causada pelo transbordar de águas interiores ou de maré, pela acumulação de água superficial, independentemente da origem desta, ou de lama, ou pelo colapso de terreno costeiro (FEMA, 2020).

Por outro lado, considera-se que aluviões correspondem a um tipo específico de cheias, que possuem a particularidade de contar com acumulações consideráveis de detritos, o que inclui blocos de material sólido de grandes dimensões. Por esse motivo, as aluviões possuem um caráter altamente destrutivo (de Oliveira, *et al.*, 2011).

As cheias são fenômenos que, normalmente, derivam de eventos naturais extremos que acontecem numa determinada bacia hidrográfica. Esses eventos extremos poderão passar por chuvadas de elevado grau de intensidade e de curta duração, pela existência de obstruções, de origem natural ou não, no caminho de cheia, pela rotura de uma barragem, pelo escorregamento de taludes de encostas, pelo escoamento de detritos, pela existência de uma urbanização feita de forma pouco adequada, por um processo acelerado de degelo ou pela ausência de vegetação na bacia hidrográfica (desflorestação). Todos estes fatores contribuem para que o nível de água exceda a capacidade natural das suas linhas, levando a que esta transborde (Lousada & Camacho, 2018).

Assim, é possível classificar como “inundação” a “cobertura temporária por água de uma terra normalmente não coberta por água” (APA, *s.d.*).

Para além disso, Lousada & Camacho (2018) e Miranda & Baptista (2006) enumeram alguns tipos de cheias, nomeadamente:

- **Cheias fluviais progressivas:** têm origem na irregularidade da precipitação, o que leva a que os caudais dos rios variem significativamente ao longo do ano. No momento em que ocorre a cheia, o canal não é capaz de conter tamanha quantidade de água e, por conta disso, esta ultrapassa os limites do canal e transborda para as áreas circundantes. Exemplo disso são as cheias registadas no rio Itapemirim, no Brasil – Figura 15;



Figura 15 – Cheias no rio Itapemirim, Cachoeiro de Itapemirim, Brasil (Fonte: Gonçalves, 2020)

- **Storm surges:** resultam da combinação dos efeitos de uma tempestade meteorológica – na sequência, por exemplo, de um furacão, Figura 16 – e dos da maré. Incidem, sobretudo, sobre regiões costeiras protegidas por diques;



Figura 16 – Storm surge ocorrida na sequência do Furacão Ike, Louisiana, EUA (Fonte: National Geographic, 2022)

- **Colapso de barragens:** fruto de uma rutura numa determinada barragem, há lugar à inundação dos vales a jusante da barragem, Figura 17 (Almeida A. B., 2001);



Figura 17 – Cheias ocorridas após o colapso de duas barragens, Michigan, EUA (Fonte: Rico, 2020)

- **Cheias rápidas:** também chamadas de *flash floods*, este tipo de cheias resulta da ocorrência de precipitação contínua e de extrema intensidade durante várias horas.

Afetam, particularmente, as pequenas bacias de drenagem. A título de exemplo, nota para as *flash floods* que afetaram a cidade de Dallas, nos EUA – Figura 18;



Figura 18 – Cheias rápidas ocorridas em Dallas, EUA (Fonte: Rosenthal, Gahan, & Timsit, 2022)

- **Torrentes de lama:** como consequência de precipitação intensa – como as que ocorreram em Quito, no Equador, Figura 19 – solos que se encontrem pouco consolidados poderão deslizar, originando torrentes de água e lama, que se movem a velocidades elevadas e que possuem um elevado poder de destruição para as áreas circundantes;



Figura 19 – Torrente de lama provocada por chuvas torrenciais, Quito, Equador (Fonte: SIC Notícias, 2022)

- **Lahar:** tem origem no degelo repentino que ocorre no cone de um vulcão aquando da sua entrada em erupção. Tal acontecimento irá criar uma torrente de água, fruto do derretimento do gelo ou neve que cobria o cone do vulcão, misturada com cinza vulcânica e detritos. Um dos exemplos mais célebres deste tipo de cheias está associado à erupção do Monte Santa Helena, nos EUA, cujos efeitos se encontram ilustrados na Figura 20;



Figura 20 – Lahar derivado da erupção do Monte Santa Helena, EUA (Fonte: Cascades Volcano Observatory, s.d.)

2.1.5. Panorama Climatológico da Ilha da Madeira

2.1.5.1. Clima e Precipitação

O clima que a ilha apresenta é de carácter mediterrâneo, com uma temperatura anual a rondar os 20°C e uma taxa de humidade de 70% (Lousada & Camacho, 2018). Esta apresenta duas estações, uma morna, que ocorre de julho a outubro com uma temperatura máxima média diária acima de 25°C e a outra estação fresca, compreendida entre dezembro e abril, com uma temperatura máxima diária em média abaixo dos 20°C, conforme demonstra a Figura 21. Em adição a isso, e de acordo com a série retrospectiva da informação meteorológica (1976-2019), disponibilizada pela DREM, a temperatura média do ar, tendo como base as medições efetuadas na estação meteorológica Funchal/Observatório, tem vindo a evoluir de forma predominantemente positiva, entre os anos de 1976 e 2019. De facto, conforme é possível verificar na Figura 22 abaixo, a partir do ano de 1994, as temperaturas médias anuais do ar registadas por esta estação superaram sempre aquele que havia sido o registo médio entre os anos de 1961 e 1990 (DREM, 2020).

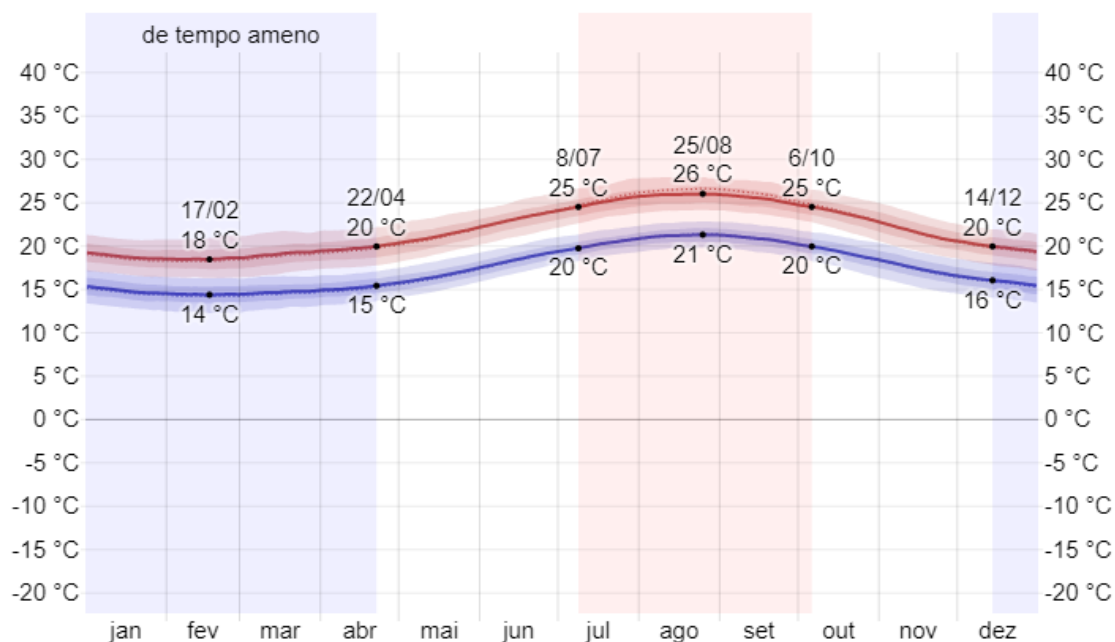


Figura 21 – Temperaturas máximas e mínimas médias (Fonte: Weather Spark, s.d.)

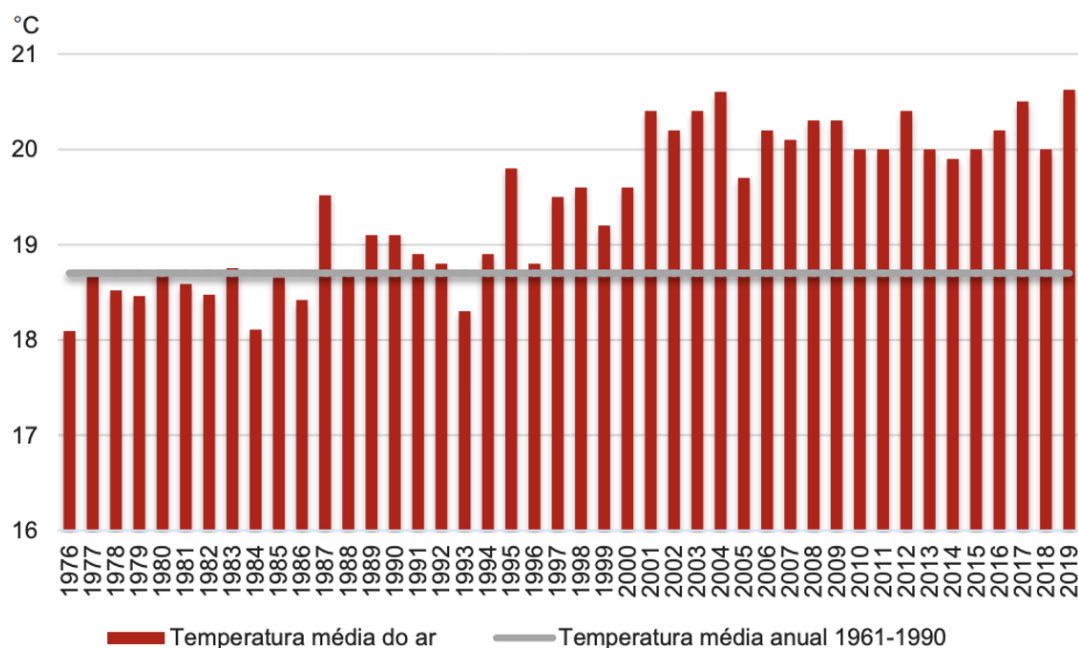


Figura 22 – Temperatura média anual do ar registada na estação Funchal/Observatório, entre os anos de 1976 e 2019 (Fonte: DREM, 2020)

Do ponto de vista da precipitação, a vertente norte da ilha da Madeira possui registos de precipitação superiores à vertente sul (Prada, *et al.*, 2005). Isso é potenciado pelos ventos predominantes virem de nordeste, ventos esses que possuem um elevado grau de humidade, fruto de serem provenientes do Golfo (Mata, *et al.*, 2013). Tal é condizente com os registos de precipitação disponibilizados por DREM (2020), onde é possível verificar, à imagem daquilo que a Figura 23 demonstra, que as estações meteorológicas que registaram um maior número de dias

com chuva estão localizadas no norte da ilha, nomeadamente as estações da Ponta de São Jorge, de Santana ou a das Achadas da Cruz/Lombo da Terça.

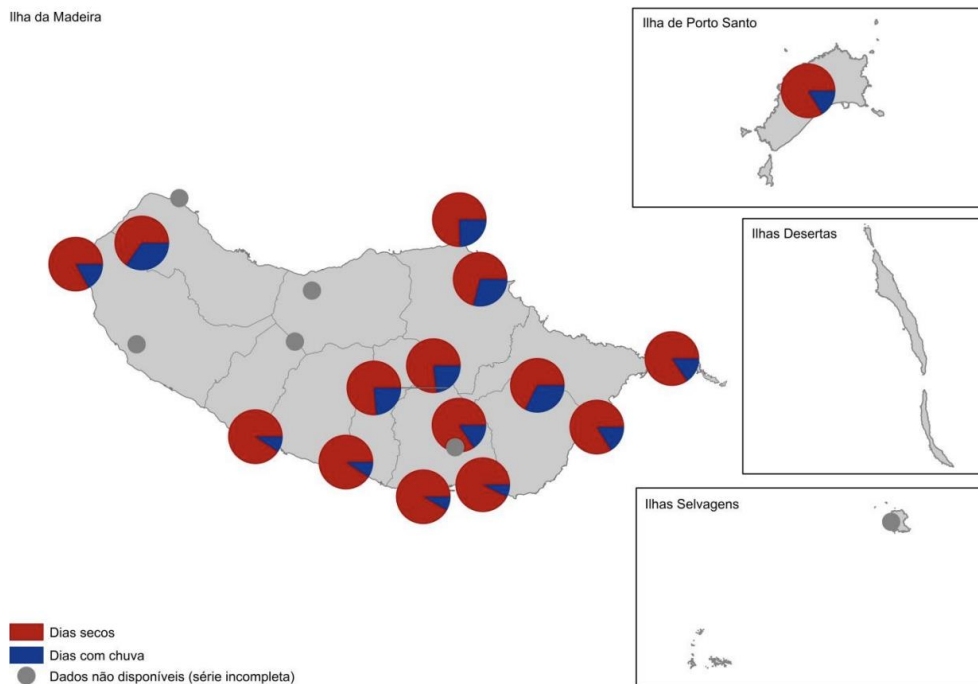


Figura 23 – Dias secos e com chuva registados nas estações meteorológicas da RAM no ano de 2019
(Fonte: DREM, 2020)

No caso específico da ilha da Madeira, há, ainda, que considerar o impacto da precipitação oculta, sobretudo do ponto de vista do nevoeiro. Antes de mais, importa ressaltar que a formação de nuvens e de nevoeiro na ilha é, predominantemente, de origem orográfica, ou seja, tem origem na subida forçada do ar húmido marítimo devido a barreiras naturais, nomeadamente, montanhas, como demonstra a Figura 24. Tal leva a um arrefecimento repentino dessa corrente de ar, dando, portanto, origem ao processo de condensação e, consequentemente, à formação de nuvens e de nevoeiro (Prada, 2008).

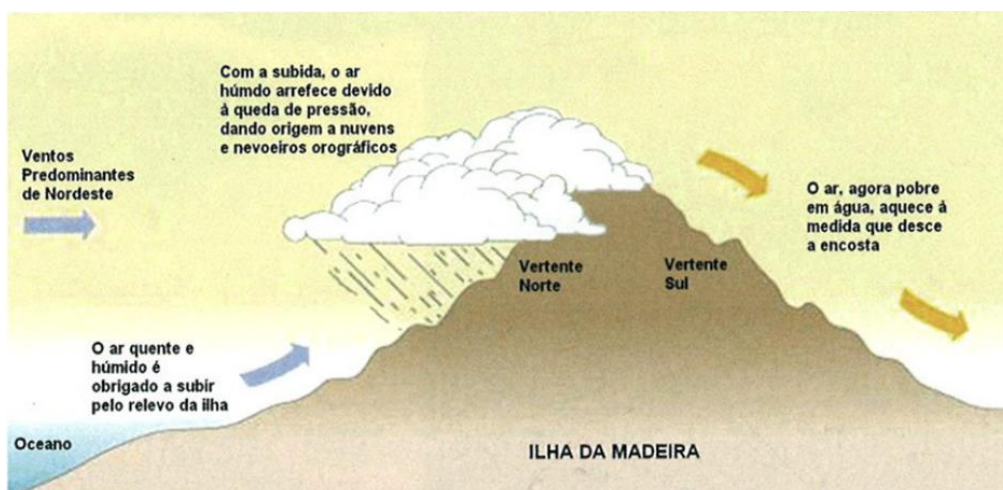


Figura 24 – Formação de nuvens e de nevoeiro na ilha da Madeira (Fonte: Prada, 2008)

2.1.5.2. Pluviometria

Conforme referido por Gonçalves (2020), a ilha da Madeira possuía 51 postos pluviométricos, sendo que uma parte significativa deles – cerca de 54% - operavam há, pelo menos, 20 anos. No entanto, a entidade que estava encarregue da gestão destes mesmos postos – o Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, ou SNIRH – determinou que a maioria deveria cessar as suas atividades em 2014 (Gonçalves, 2020).

Assim, no contexto atual, a Região possui três redes ativas para a monitorização do fenómeno da precipitação, sendo que, cada uma destas, é gerida por entidades diferentes, mais concretamente o IGA (Investimentos e Gestão de Água, S.A.), o IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera) e o LREC (Laboratório Regional de Engenharia Civil) (Gonçalves, 2020).

2.1.5.3. Infiltração e Ocupação do Solo

Conforme referido anteriormente, a ocupação do solo é um fator preponderante na análise de uma bacia hidrográfica, uma vez que este é um fator que influencia diretamente aspetos como a maior ou a menor capacidade de infiltração de um determinado solo.

Logo, é importante obter uma caracterização fiável da ocupação do solo da ilha da Madeira. Em Gonçalves (2020), é possível verificar que as áreas ocupadas por uma vegetação mais densa encontram-se no interior da ilha, nas regiões de maior altitude, o que é perceptível na Figura 25, sendo que essas regiões são as que possuem registos de precipitação mais elevados.

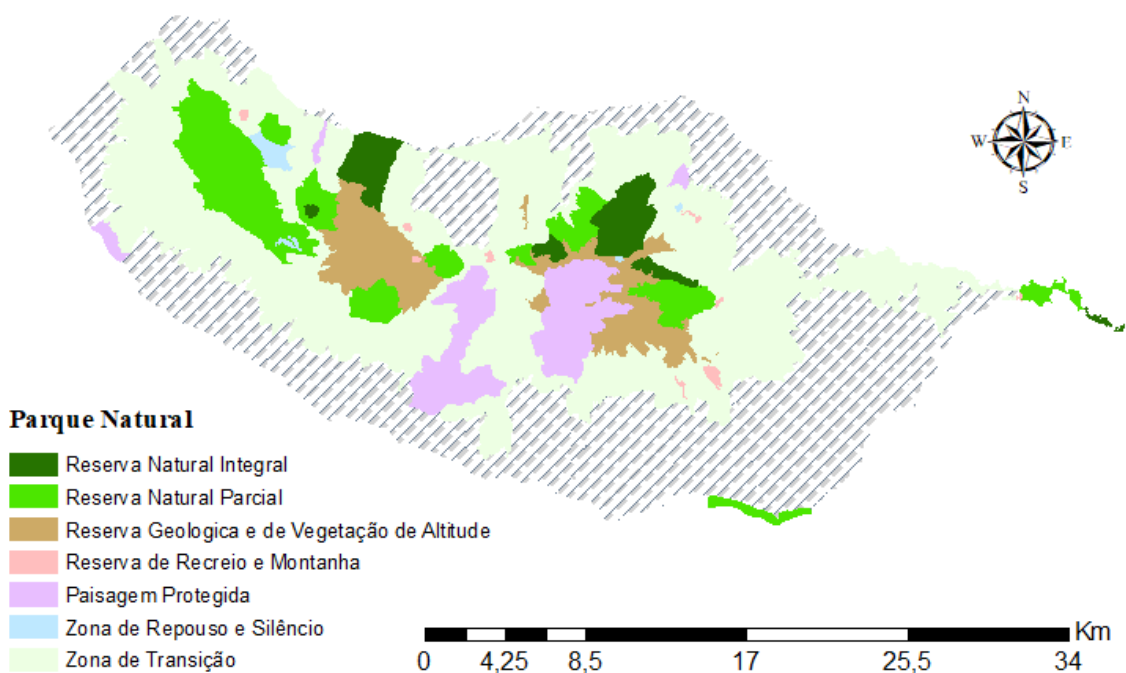


Figura 25 – Localização das áreas de vegetação densa da ilha da Madeira (Fonte: Gonçalves, 2020)

Por outro lado, da perspetiva das áreas de cultivo, os terrenos utilizados predominantemente para fins agrícolas situam-se nas cotas mais baixas, principalmente, na encosta sul da ilha. Este cultivo agrícola é maioritariamente intensivo e feito de forma descontínua (IFCN, 2021).

As principais aglomerações urbanísticas situam-se também nos concelhos do sul da Madeira, mais concretamente nos concelhos do Funchal, de Câmara de Lobos e de Santa Cruz, sendo que estes três concelhos abrigam, de acordo com os resultados provisórios dos CENSOS 2021, 180130 habitantes, ou seja, aproximadamente, 73,3% da população da ilha (DREM, 2021). No entanto, o surgimento tardio de instrumentos de ordenamento de território na Região, aliados a fatores como o crescimento da procura imobiliária e a falta de regulamentação da área da construção, fizeram com que alguns concelhos, nomeadamente Santa Cruz e Câmara de Lobos, tivessem problemas relacionados com a *“impermeabilização excessiva do solo, falta de dimensionamento adequado de infraestruturas, estacionamento e de vias de acesso, descaracterização da paisagem, falta de espaços e de equipamentos de utilização pública”* (Rodrigues J. R., 2018).

Ao encontro daquilo que já foi abordado, Gonçalves (2020) apresenta, por meio da Figura 26, a distribuição da ocupação do solo na ilha da Madeira, sendo esta dividida em três categorias: florestas, meios naturais e seminaturais, territórios artificializados e áreas agrícolas e agroflorestais. É visível que os territórios artificializados, isto é, as zonas da ilha ocupadas por *“tecido urbano; zonas industriais, comerciais ou de transportes; minas, depósitos de resíduos ou zonas de construção; zonas artificializadas não agrícolas com vegetação”* (Gonçalves, 2020), concentram-se, especialmente, no sul da ilha, enquanto que o território ocupado por florestas, meios naturais e semi-naturais é predominante no interior da ilha.

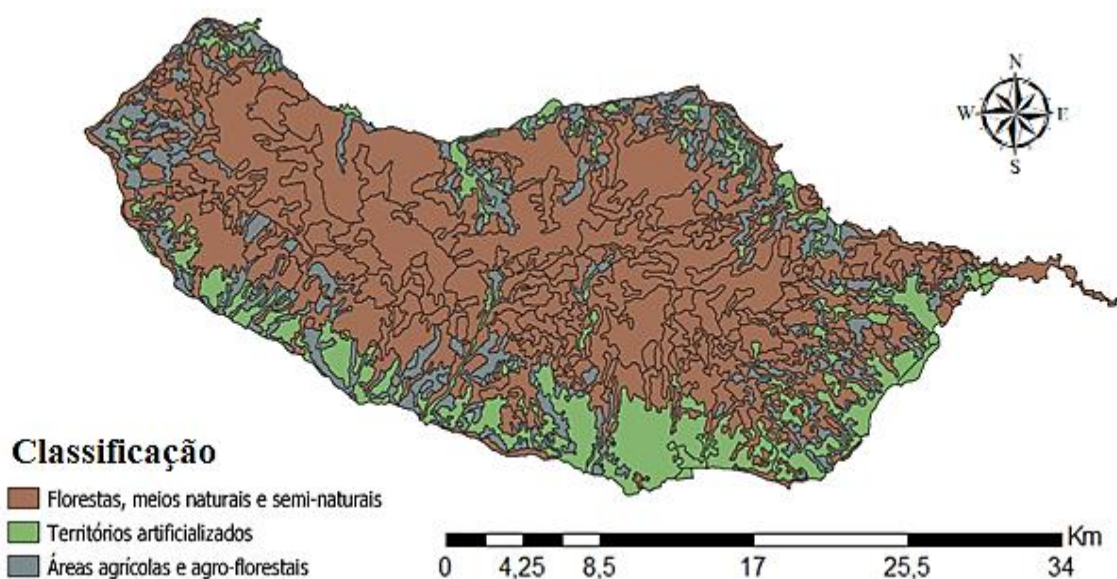


Figura 26 – Distribuição das ocupações do solo na ilha Madeira (Fonte: Gonçalves, 2020)

2.1.5.4. Histórico de Aluviões e Cheias na Ilha da Madeira

O histórico de aluviões e cheias na ilha da Madeira nos últimos séculos é relativamente extenso, assim como o montante de perdas materiais e humanas. Relativamente a este último aspeto, de Oliveira, *et al.* (2011) afirma que um fator preponderante passa pela própria geomorfologia da Madeira, uma vez que esta “força” a população a se instalar em zonas de risco, nomeadamente nos cones de dejeção, situados na parte terminal das ribeiras e, mais recentemente, nas cotas mais altas das vertentes.

Na Tabela 2, é apresentada uma síntese dos principais eventos desta natureza (Gonçalves, 2020), sendo possível perceber uma anormal concentração de aluviões no ano de 2010, situação que poderá estar associada ao facto de, nesse mesmo ano, ter sido registado o maior valor de precipitação anual, entre os anos de 1976 e 2019, na estação meteorológica da Bica da Cana (DREM, 2020).

De referir, adicionalmente, que Quintal (1999) constata uma especial persistência destes fenómenos a partir da década de 1970, o que pode dever-se não só à maior facilidade com que estes eventos eram noticiados e registados, como também a fatores como “*as alterações climáticas, a crescente impermeabilização do solo e subsolo, e a ocupação, estreitamento e modificação do perfil dos leitos das ribeiras ao longo dos seus cursos superior, médio e inferior*” (Sepúlveda, 2011).

Data	Localidade	Danos e Vítimas
09/10/1803	Funchal	800 a 1000 mortes
26/02/1920	Funchal, Ribeira Brava e Camacha	5 mortes
06/03/1929	São Vicente	32 mortes, 11 casas e 100 palheiros destruídos
30/12/1939	Madalena do Mar	4 mortes
11/02/1956	Curral das Freiras	2 mortes
03/11/1956	Machico e Santa Cruz	6 mortes
03/01/1963	Ribeira Brava e Serra de Água	5 mortes
09/01/1970	Ribeira Brava e Serra de Água	4 mortes
21/09/1972	Santo António	2 mortes
20/12/1977	Estreito de Câmara de Lobos	4 mortes e 45 desalojados
23/01/1979	Machico, Porto da Cruz, Camacha, Canhas, Calheta e Fajã do Penedo	14 mortes
29/10/1993	Por toda Ilha da Madeira	4 mortes, 4 desaparecidos, 306 desalojados, 76 habitações afetadas e 27 feridos.
05/03/2001	Curral das Freiras e São Vicente	5 mortos e 120 desalojados
22/12/2009	Madalena do Mar e São Vicente	Destruição das vias de comunicação e habitações
02/02/2010	Faial e Porto da Cruz	Destruição das vias de comunicação
20/02/2010	Ribeira Brava, Câmara de Lobos, Funchal e Santa Cruz	48 mortos, 250 feridos, 600 desalojados, 500 viaturas destruídas, 800 habitações danificadas
21/10/2010	Funchal	5 desalojados e destruição das vias de comunicação
20/12/2010	Funchal e Curral das Freiras	2 feridos, habitações danificadas e destruição de veículos e vias de comunicação
06/11/2012	Porto da Cruz e São Vicente	6 feridos, 71 desalojados, dezenas de viaturas e vias de comunicação destruídas
29/11/2013	Porto da Cruz e Santo António da Serra	5 feridos, 6 desalojados, danos em habitações e destruição de vias de comunicação

Tabela 2 – Síntese das principais aluviões na Madeira (Fonte: Gonçalves, 2020)

2.2. MEDIDAS DE PREVENÇÃO E MITIGAÇÃO DOS IMPACTOS

2.2.1. Proteção Civil

Conforme publicado em Diário da República n.º 126/2006, Série I de 03/07/2006, mais concretamente, nos artigos 1.º e 2.º do Capítulo I da Lei n.º 27/2006, a proteção civil “*é a actividade desenvolvida pelo Estado, Regiões Autónomas e autarquias locais, pelos cidadãos e por todas as entidades públicas e privadas com a finalidade de prevenir riscos colectivos inerentes a situações de acidente grave ou catástrofe, de atenuar os seus efeitos e proteger e socorrer as pessoas e bens em perigo quando aquelas situações ocorram*”, sendo esta uma atividade que abrange todo o território nacional – não obstante o facto de, nas regiões autónomas, as políticas e ações de proteção civil estarem ao encargo dos respetivos governos regionais – e que possui um “*carácter permanente, multidisciplinar e plurissectorial*”.

Os seus objetivos, expressos no artigo 4.º da Lei mencionada acima, passam pela prevenção de riscos coletivos e de acidentes graves ou catástrofes deles resultantes – sendo que, no artigo 3.º, define-se acidente grave como sendo “*um acontecimento inusitado com efeitos relativamente limitados no tempo e no espaço, susceptível de atingir as pessoas e outros seres vivos, os bens ou o ambiente*” e catástrofe como “*acidente grave ou a série de acidentes graves susceptíveis de provocarem elevados prejuízos materiais e, eventualmente, vítimas, afectando intensamente as condições de vida e o tecido sócio-económico em áreas ou na totalidade do território nacional*” – pela atenuação dos efeitos destes eventos, pela prestação de socorro e de assistência e, numa fase posterior, pelo apoio à reposição da normalidade. Para além disso, o artigo 4.º da Lei n.º 27/2006 descreve os domínios de ação da atividade de proteção civil, mais concretamente:

- Levantamento, previsão, avaliação e prevenção dos riscos coletivos;
- Análise permanente das vulnerabilidades perante situações de risco;
- Informação e formação das populações, visando a sua sensibilização em matéria de autoproteção e de colaboração com as autoridades;
- Planeamento de soluções de emergência, visando a busca, o salvamento, a prestação de socorro e de assistência, bem como a evacuação, alojamento e abastecimento das populações;
- Inventariação dos recursos e meios disponíveis e dos mais facilmente mobilizáveis, ao nível local, regional e nacional;
- Estudo e divulgação de formas adequadas de proteção dos edifícios em geral, de monumentos e de outros bens culturais, de infraestruturas, do património arquivístico, de instalações de serviços essenciais, bem como do ambiente e dos recursos naturais;
- Previsão e planeamento de ações atinentes à eventualidade de isolamento de áreas afetadas por riscos.

2.2.2. Mitigação dos Impactos das Cheias

De acordo com Lousada & Camacho (2018), um dos fatores mais preponderantes para a mitigação dos efeitos decorrentes das cheias é o tempo que separa a previsão do evento do evento em si. Logo, uma atempada previsão de um evento desta natureza é de extrema relevância no que a ações de mitigação diz respeito. Por outro lado, um outro aspeto a que a Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC) dá destaque é a monitorização do evento, com o intuito de compreender o nível de gravidade do evento (Lousada & Camacho, 2018). Contudo, note-se que, apesar de, na maioria dos casos, ser possível prever uma cheia, nos casos de inundações provocadas por precipitação intensa e repentina, a previsão do evento torna-se mais difícil, o que impossibilita, por vezes, alertar adequadamente as populações que serão afetadas. Assim, para além das consequências diretas das cheias – perdas humanas, danificação de habitações, danificação e/ou submersão de vias de comunicação e de outras infraestruturas, etc. – estes eventos dão origem a múltiplos efeitos indiretos, como a perda de produção, por conta da afetação das atividades socioeconómicas, e a destruição do meio ambiente (ProCiv, 2016).

Logo, com o intuito de mitigar os efeitos das cheias, diversos autores abordam a implementação de medidas de ordem estrutural e não estrutural. Relativamente às medidas estruturais, estas passam por intervenções de engenharia que têm como objetivo minimizar os riscos associados às enchentes; do ponto de vista das medidas não estruturais, estas incidem, essencialmente, sobre a população, especialmente, na forma como esta lida com este tipo de fenómenos (CPRM, 2004). Exemplos de medidas de natureza estrutural e não estrutural podem ser encontrados na Figura 27.

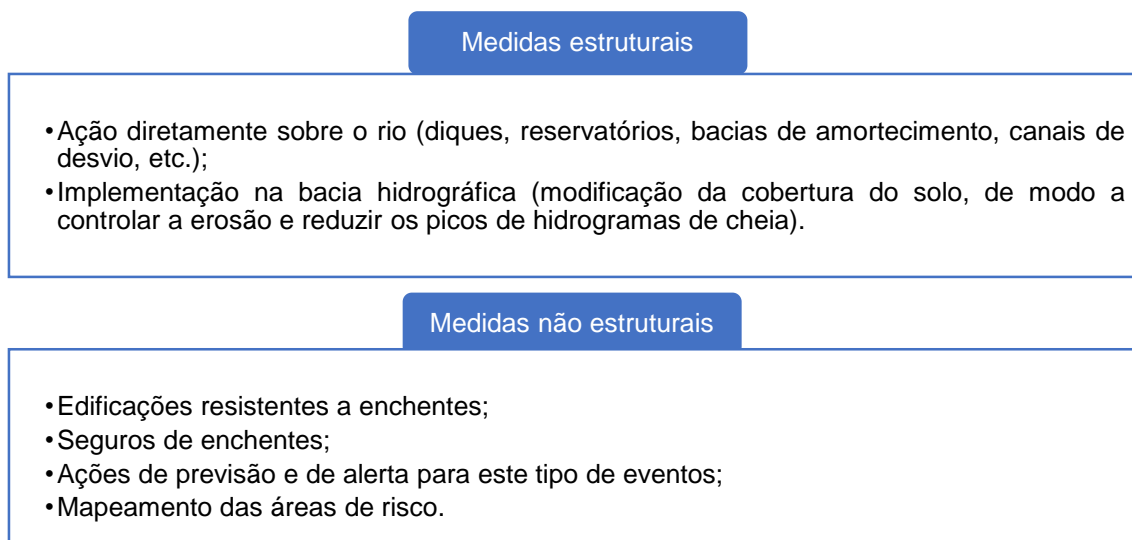


Figura 27 – Medidas estruturais e não estruturais de mitigação dos efeitos das cheias (Fonte: CPRM, 2004)

No caso específico da ilha da Madeira, o Plano Regional da Água da Madeira (PRAM) estabelece objetivos que abrangem as cheias, nomeadamente do ponto de vista da prevenção da ocorrência das mesmas e da minimização dos efeitos destas, da atualização da cartografia relativamente aos riscos associados com a erosão hídrica, do estabelecimento de zonas prioritárias de prevenção de riscos e da prevenção dos deslizamentos de materiais sólidos nas vertentes, materiais esses que podem condicionar o escoamento das ribeiras e os sistemas de adução de água e de tratamento de águas residuais (Sepúlveda, 2011).

2.3. ORDENAMENTO TERRITORIAL

2.3.1. Conceito e Objetivos

Apesar de não ser consensual, o conceito de “ordenamento do território” pode ser entendido como *“a tradução espacial das políticas económica, social, cultural e ecológica da sociedade”* (Papudo, 2007), à imagem da definição presente na Carta Europeia de Ordenamento do Território (CEOT). No âmbito nacional, este termo é descrito pela Lei de Bases do Ambiente, no ano de 1987, como sendo *“um processo integrado da organização do espaço biofísico, tendo como objectivo o uso e a transformação do território, de acordo com as suas capacidades e vocações, e a permanência dos valores de equilíbrio biológico e de estabilidade geológica, numa perspectiva de aumento da sua capacidade de suporte de vida”* (Papudo, 2007).

Já Mafra & da Silva (2004) descreve o ordenamento do território como *“a organização espacial das sociedades humanas e das suas actividades, a todos os níveis ou patamares, é um pressuposto essencial para o desenvolvimento”,* acrescentando, ainda, que *“o objecto e a finalidade do planeamento e gestão do território é o ordenamento territorial, significando esta expressão a análise da distribuição dos locais destinados a habitação e a actividades produtivas e outras num dado espaço, bem como das formas de utilização pelos diversos agentes envolvidos.”*

Por outro lado, no que diz respeito aos objetivos das ações de ordenamento do território, estes passam, sobretudo, pela promoção de um bom desenvolvimento e pela correção dos erros do passado, sem nunca deixar de lado aspetos como a imparcialidade, a justiça, a conservação e a qualidade (Papudo, 2007). Porém, vale realçar que a delimitação de objetivos, em termos espaciais e temporais, é visto como apenas uma fase dentro de um processo integrado e cíclico que é o ordenamento regional e urbano, fase essa que, segundo Mcloughlin (1970), é antecedida por uma etapa de análise das necessidades dos indivíduos e grupos e seguida pela inventariação das estratégias e das linhas de ação necessárias para atingir esses objetivos e pelo confronto dessas com os meios que se encontram à disposição. Como seria expectável, a última fase passa pela ação em si, ou seja, pela *“actuação através dos instrumentos e medidas que, modificando as*

relações do sistema, implicam a reiniciação de novo ciclo de horizonte temporal mais alargado.” (Maфра & da Silva, 2004).

Por fim, à imagem do que acontece com as definições associadas a ordenamento do território, os princípios associados a este termo variam de abordagem para abordagem. Nesse sentido, Papudo (2007) analisou diferentes abordagens a este tópico, agrupando-as na Figura 28 abaixo.

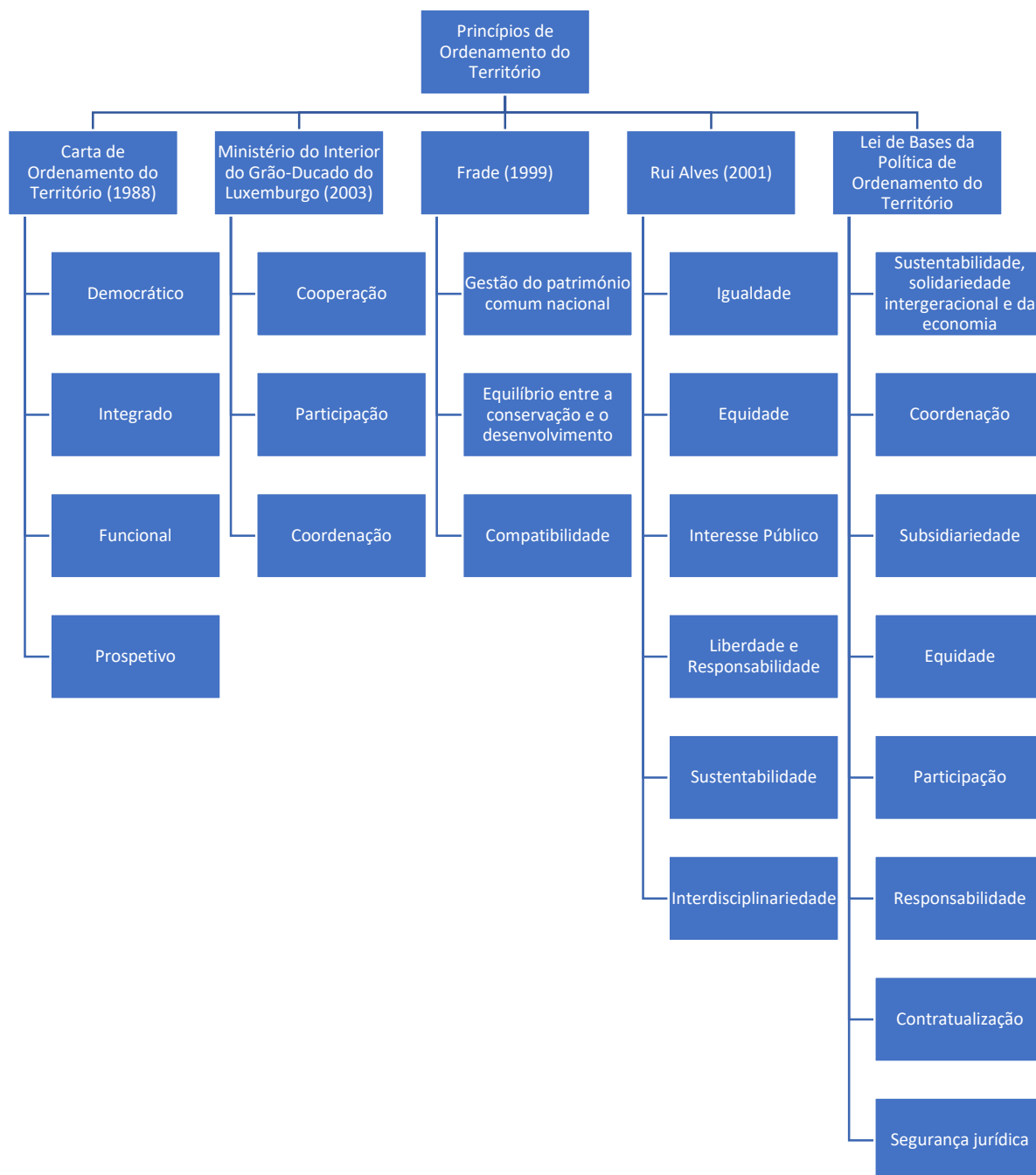


Figura 28 – Princípios do ordenamento do território, segundo diferentes abordagens (Fonte: adaptado de Papudo, 2007)

2.3.2. Sistema de Gestão e Planeamento do Território Português

De acordo com Gonçalves (2020), até vigorar a Lei de Bases da Política de Ordenamento do Território e de Urbanismo, o planeamento do território português encontrava-se sustentado em três pilares: os planos regionais, os especiais e os municipais. Posteriormente, surge a Lei n.º 31/2014, datada de 30 de maio, que revoga a Lei de Bases da Política de Ordenamento do Território e de Urbanismo, mencionada anteriormente.

Tal acontecimento implicou um maior grau de materialização dos instrumentos de gestão territorial em programas, programas esses que se tornam na base da estratégia nacional para o desenvolvimento territorial (Gonçalves, 2020) (Inocêncio, 2015).

2.3.3. Instrumentos de Gestão Territorial

O Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território (PNPOT) constitui o principal instrumento do sistema de gestão territorial nacional e é responsável pela definição de objetivos e de estratégias de desenvolvimento territorial e pelo estabelecimento de um modelo de organização do território português. Note-se que, não obstante as competências existentes por parte das Regiões Autónomas da Madeira e dos Açores, o PNPOT possui uma abrangência total, no que ao território nacional diz respeito (PNPOT, s.d.).

Este programa, criado pela Lei de Bases da Política de Ordenamento do Território e de Urbanismo de 1998, surgiu com o objetivo de *“dotar o país de um instrumento competente para a definição de uma visão prospetiva, completa e integrada da organização e desenvolvimento do território e pela promoção da coordenação e articulação de políticas públicas numa base territorializada.”* (PNPOT, s.d.).

Ainda dentro do âmbito de ação nacional, como, aliás, demonstra a Figura 29, estão ainda definidos os Planos Setoriais (PS) e os Planos Especiais de Ordenamento do Território (PE ou PEOT). No que diz respeito aos primeiros, os Programas Setoriais *“estabelecem, no âmbito nacional e de acordo com as políticas setoriais da União Europeia, a incidência territorial da programação ou concretização de políticas públicas dos diversos setores da administração central do Estado, nomeadamente, nos domínios da defesa, segurança pública, prevenção de riscos, ambiente, recursos hídricos, conservação da natureza e da biodiversidade, transportes, comunicações, energia, cultura, saúde, turismo, agricultura, florestas, comércio ou indústria”* (Navarro, 2017).

De referir, ainda, que, de acordo com Moura (2019), do ponto de vista da RAM, há registo de 5 Planos Setoriais, nomeadamente o Plano Estratégico de Resíduos da Região Autónoma da Madeira (PERRAM), o Plano Regional de Água da Madeira (PRAM), o Plano de Política

Energética da Região Autónoma da Madeira (PPERAM), o Plano Regional de Política do Ambiente (PRPA) e o Plano de Ordenamento Turístico (POT).

No que diz respeito aos PEOT, importa referir que estes são elaborados pela administração central e têm como função estabelecer regimes de proteção e de salvaguarda de recursos e de valores naturais, de modo a que estes se encontrem alinhados com uma utilização sustentável do território (Fundação Francisco Manuel dos Santos, 2014). Existem 5 classificações de PEOT: os Planos de Ordenamento de Áreas Protegidas (POAP), os Planos de Ordenamento de Albufeiras de Águas Públicas (POAAP), os Planos de Ordenamento da Orla Costeira (POOC), os Planos de Ordenamento dos Estuários (POE) e os Planos de Ordenamento do Parque Arqueológico (POPA) (Gonçalves, 2020).

No âmbito regional, destaque para a existência dos Planos Regionais de Ordenamento do Território (PROT), planos esses que se caracterizam por ser instrumentos estratégicos que visam o desenvolvimento territorial de uma perspetiva regional (CCDRC, 2015). A elaboração destes planos recai sobre as Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR), sendo que, a estes organismos, recaem tarefas como, por exemplo, a de *“definir as estratégias regionais de desenvolvimento territorial, integrando as opções estabelecidas a nível nacional e considerando as estratégias municipais de desenvolvimento local, constituindo o quadro de referência para a elaboração dos planos especiais, intermunicipais e municipais de ordenamento.”* (CCDRC, 2015).

Finalmente, relativamente ao desenvolvimento local, há que destacar os planos intermunicipais e municipais. Dentro dos Planos Municipais de Ordenamento Territorial (PMOT), existem outros planos a estes intrínsecos, mais concretamente, os Planos Diretores Municipais (PDM), que traçam a estratégia a seguir para o desenvolvimento territorial do município (C. M. Porto, s.d.), os Planos de Urbanização (PU), que têm como objetivo principal o de promover o desenvolvimento e a concretização do PDM, enquanto que definem a ocupação e o aproveitamento do solo (CCDRC, 2016), e os Planos de Pormenor (PP), cujo foco, de acordo com o n.º 1 do artigo 90.º do RJIGT, está voltado para o desenvolvimento e concretização das propostas de ocupação territorial do município, enquanto que, simultaneamente, estão também encarregues de estabelecer regulamentação relativamente ao estabelecimento de infraestruturas e a aspetos como o desenho dos espaços de utilização coletiva, a paisagem, a localização, entre outros (CCDRC, 2019).

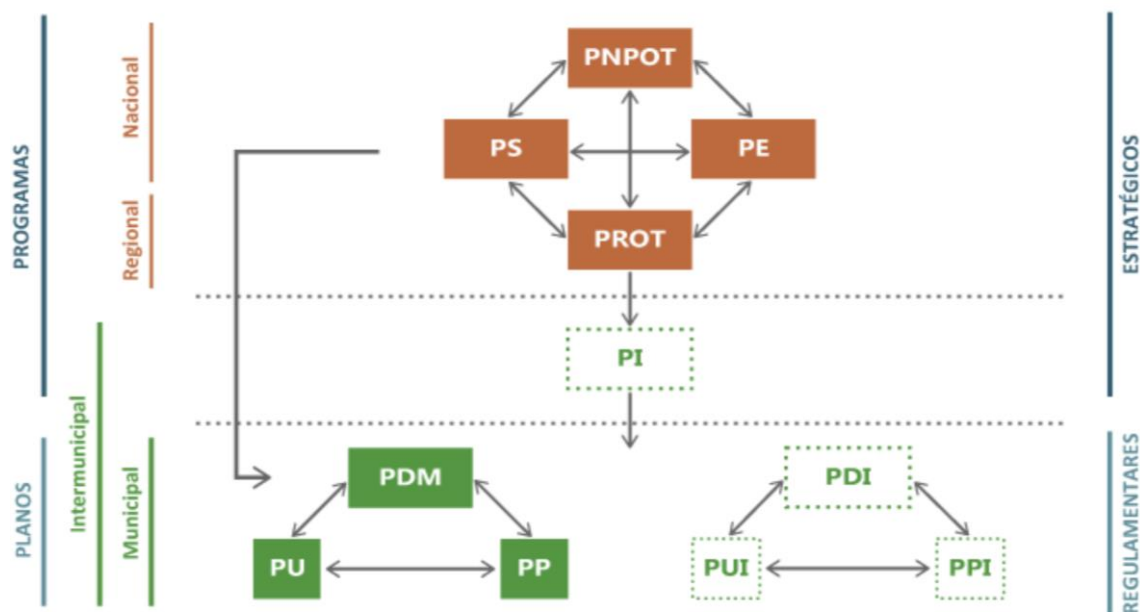


Figura 29 – Esquematização do sistema de gestão territorial português (Fonte: DGT, s.d.)

CAPÍTULO III

METODOLOGIA TEÓRICA

3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

Do ponto de vista conceptual, uma bacia hidrográfica é vista como uma unidade física de reconhecimento, caracterização e avaliação, com o objetivo de proporcionar uma gestão mais fácil dos recursos de natureza hídrica (Cavalcante, Inácio, & Gomes, 2013). Por outro lado, da Costa & Lança (2011) define bacia hidrográfica como “*uma área definida topograficamente, drenada por um curso de água tal que todo o caudal afluente é descarregado através de uma simples saída.*”. À definição apresentada por da Costa & Lança (2011), Lousada & Camacho (2018) e Rodrigues, *et al.* (2011) acrescentam que a bacia hidrográfica possui as delimitações da área de captação natural da água precipitada.

Durante um fenómeno de precipitação, à medida que a taxa de infiltração diminui, ocorrerá o escoamento superficial da água da chuva rumo à rede hidrográfica, de modo que esta seja conduzida até à secção de saída, ou secção de referência (Lousada & Camacho, 2018) (Rodrigues, *et al.*, 2011). Desta forma, é perceptível que, conforme referido por Gonçalves (2020), o maior ou menor nível de propensão para fenómenos de cheias que uma determinada bacia hidrográfica apresenta está diretamente associada às características da mesma, principalmente do ponto de vista da resposta que a bacia hidrográfica dá durante a ocorrência de precipitação, resposta essa que está associada aos processos de escoamento superficial e de escoamento subterrâneo (Lousada & Camacho, 2018).

3.1.1. Características geomorfológicas e fisiográficas da bacia hidrográfica

3.1.1.1. Caracterização geométrica

A caracterização de uma bacia hidrográfica possui diversas vertentes, sendo que uma delas é a vertente geométrica. Do ponto de vista de uma análise geométrica, segundo Lousada & Camacho (2018), o principal fator a ter em conta é a área de drenagem (A), expressa, normalmente, em km^2 ou em hectares, no caso das bacias menores. Desta forma, a área de drenagem resultará “*da projeção horizontal da bacia uma vez definidos os respetivos contornos.*” (Lousada & Camacho, 2018).

Outro fator relevante passa pela caracterização do formato da bacia hidrográfica. Normalmente, as bacias hidrográficas dos rios de maior dimensão possuem um formato de leque ou pêra, enquanto que, por outro lado, as bacias hidrográficas mais pequenas têm a sua forma condicionada pelas características geológicas do terreno onde estão situadas (da Costa & Lança, 2011). Lousada & Camacho (2018) dividem as bacias hidrográficas, quanto às suas formas, em 3 categorias diferentes:

- **Bacia alongada ou longitudinal:** possui apenas uma linha de água principal, que, embora tenha um grande desenvolvimento, não possui uma grande largura; é “alimentada” por outras linhas tributárias de menor relevância, à semelhança do que ilustra a Figura 30;

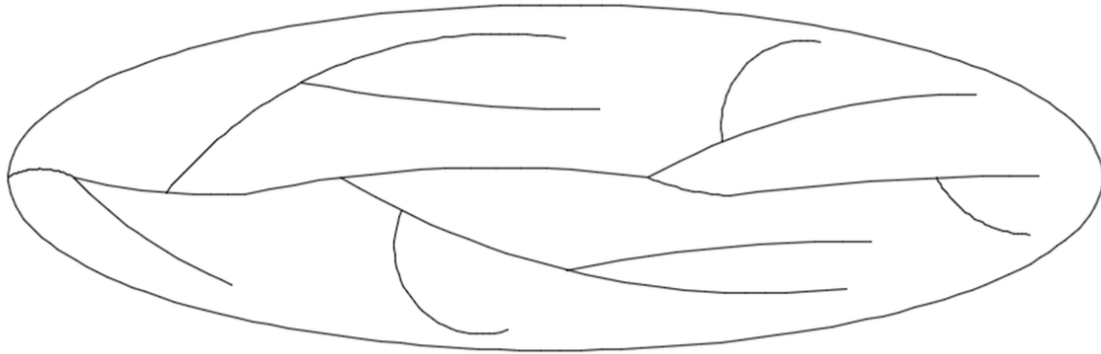


Figura 30 – Bacia hidrográfica alongada ou longitudinal (Fonte: Lousada & Camacho, 2018)

- **Bacia arredondada:** é composta por múltiplas linhas de água, com níveis de importância similares, que se reúnem concentricamente para dar origem a uma curta linha de água final, aspetos perceptíveis na Figura 31 abaixo;

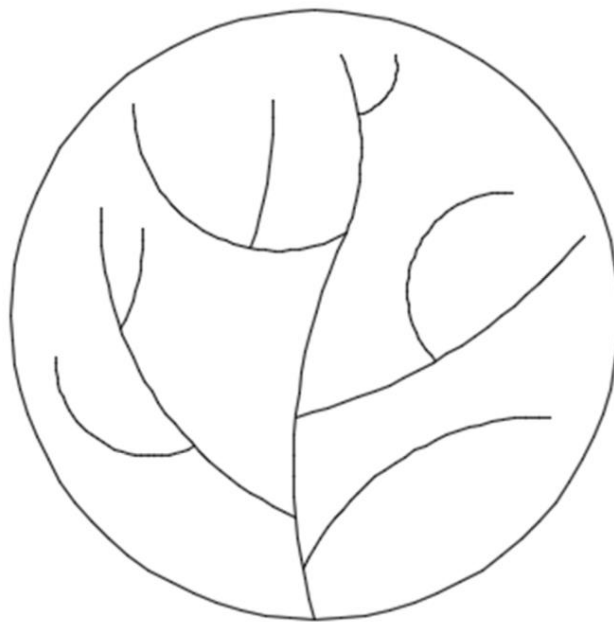


Figura 31 – Bacia hidrográfica arredondada (Fonte: Lousada & Camacho, 2018)

- **Bacia radial ou ramificada:** conjunto de bacias hidrográficas alongadas parciais que dá origem a uma linha de água final, Figura 32.

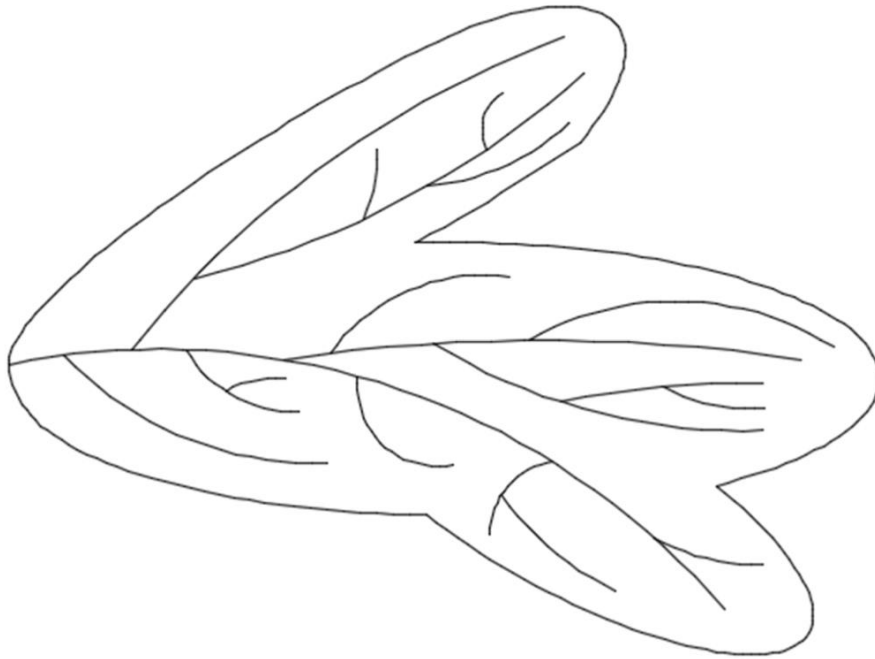


Figura 32 – Bacia hidrográfica radial ou ramificada (Fonte: Lousada & Camacho, 2018)

De ressaltar, ainda, que, em igualdade de condições, o caudal de cheia de uma bacia hidrográfica alongada ou longitudinal será menor que aquele que se verifica nas bacias de formato arredondado, uma vez que, nestas últimas, a concentração de água ocorre de forma mais rápida e há uma maior propensão para que o escoamento se concentre; no entanto, o pico do caudal, numa bacia hidrográfica arredondada, terá uma menor durabilidade (Lousada & Camacho, 2018). Tal vai ao encontro dos hidrogramas que Larara (2020) sugere para cada um dos formatos de bacia hidrográfica, hidrogramas esses que estão representados na Figura 33 abaixo, onde a A corresponde a uma bacia com formato arredondado, B a uma de formato alongado e C a uma de formato radial.

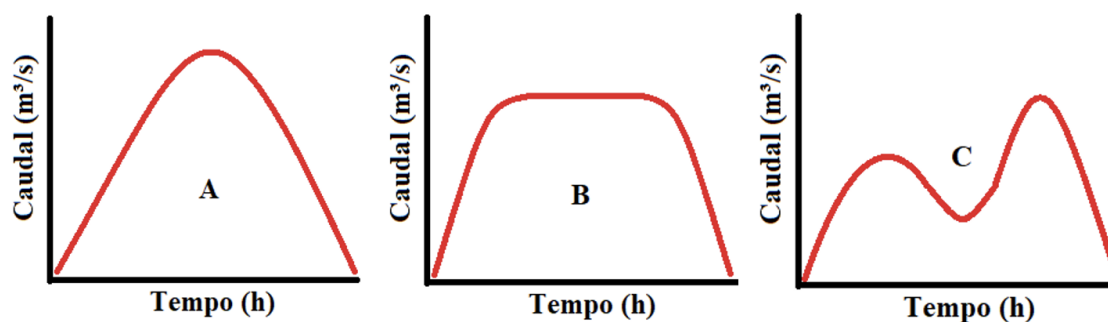


Figura 33 – Hidrogramas por formato de bacia hidrográfica (Fonte: Gonçalves, 2020)

De modo a quantificar a forma das bacias, da Costa & Lança (2011), Rodrigues, *et al.* (2011) e Lousada & Camacho (2018) enumeram alguns índices quantitativos, tais como:

- **Índice de compacidade ou índice de Gravelius, K_C :** estabelece a relação entre o perímetro de uma determinada bacia hidrográfica (P), em km, e a circunferência de um círculo, com raio r , com a mesma área A da bacia, em km². Assim, temos que este parâmetro será dado pela Equação 1:

$$K_C = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Equação 1

Importa ressaltar que o valor de K_C será, no mínimo, igual a 1; nesse caso, a bacia terá o formato perfeitamente circular. Quanto mais afastado da unidade estiver o índice de compacidade de uma bacia hidrográfica, mais distante esta se encontrará do formato arredondado e apresentará, conseqüentemente, uma menor propensão para grandes cheias (Lousada & Camacho, 2018) (Costa & Lança, 2011).

- **Fator de alongamento, K_L :** estabelece uma relação entre o comprimento, L_e , obtido através da Equação 2, e a largura, l_e , do retângulo equivalente a uma determinada bacia hidrográfica, derivada da Equação 3, originando a Equação 4:

$$L_e = \frac{K_C \sqrt{A}}{1,128} \cdot \left| 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_C}\right)^2} \right|$$

Equação 2

$$l_e = \frac{K_C \sqrt{A}}{1,128} \cdot \left| 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_C}\right)^2} \right|$$

Equação 3

$$K_L = \frac{L_e}{l_e}$$

Equação 4

A bacia hidrográfica em análise será classificada como alongada caso o fator de alongamento seja superior a 2.

- **Fator de forma, K_f :** estabelece a relação entre a largura média, l , obtida através da divisão da área, A , pelo comprimento da bacia, L_b , conforme demonstra a Equação 5, e o comprimento da bacia, L_b . Assim, o fator de forma será dado pela Equação 6:

$$l = \frac{A}{L_b}$$

Equação 5

$$K_f = \frac{l}{L_b} \rightarrow K_f = \frac{A}{L_b^2}$$

Equação 6

Este índice é mais um instrumento de análise da maior ou menor propensão de uma bacia hidrográfica para eventos de cheias, na medida em que, quanto menor for K_f , menor será a probabilidade dessa bacia ser atingida por este tipo de eventos, quando comparada com uma bacia com o mesmo tamanho, mas com um fator de forma mais elevado; tal acontece devido ao facto de, quando o fator de forma de uma bacia é baixo, esta possuirá um formato alongado. No caso extremo de K_f ser 1, a bacia terá uma forma perfeitamente quadrada (da Costa & Lança, 2011) (Lousada & Camacho, 2018).

3.1.1.2. Caracterização dos canais de drenagem

3.1.1.2.1. Tipologias de escoamento

Segundo Rodrigues, *et al.* (2011), os cursos de água podem ser classificados, quanto ao seu regime de escoamento, como perenes, intermitentes ou efémeros. Relativamente aos cursos de água efémeros, estes escoam água durante todo o ano. Na eventualidade de, durante a estação seca, não haver precipitação suficiente, o escoamento nestes cursos de água continua, por conta da existência de reservas subterrâneas (Lousada & Camacho, 2018). O lençol subterrâneo é o responsável pela continuidade do caudal, impedindo, assim, que o nível de água desça abaixo do leito, tal como exemplificado pela Figura 34 (da Costa & Lança, 2011).

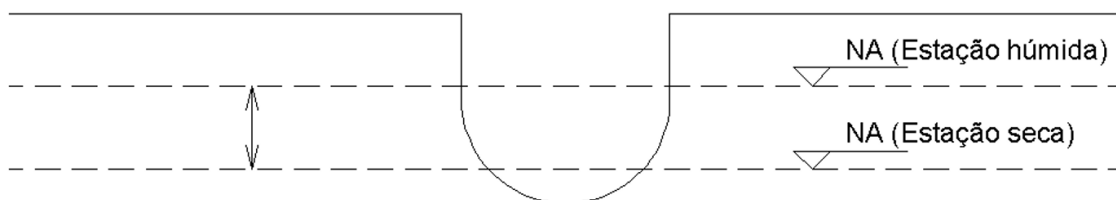


Figura 34 – Curso de água perene (Fonte: Lousada & Camacho, 2018)

Por outro lado, os cursos de água intermitentes, como, aliás, o próprio nome indica, só escoam durante a estação húmida, onde existem maiores níveis de precipitação, enquanto, que durante a estação seca, geralmente, não apresentam caudal. Tal deve-se ao facto de, durante a estação seca, o nível freático ficar abaixo do nível do leito, o que impede a existência do processo de

escoamento, como mostra a Figura 35. Note-se que este cenário pode ser contrariado se existir precipitação durante a estação seca (Lousada & Camacho, 2018) (da Costa & Lança, 2011).

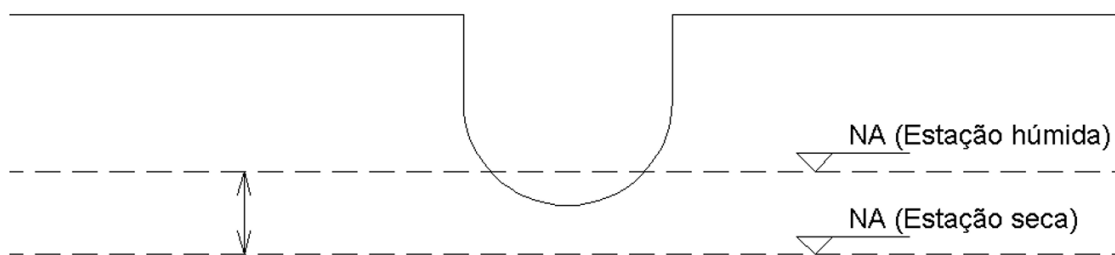


Figura 35 – Curso de água intermitente (Fonte: Lousada & Camacho, 2018)

Por fim, no que toca aos cursos de água classificados como efémeros, não existe contribuição subterrânea para o escoamento, na medida em que o nível freático não é capaz de atingir o leito do curso de água, situação perceptível na Figura 36. Tal faz com que o processo de escoamento ocorre apenas durante eventos de precipitação, tornando-o, dessa feita, num evento de curta duração. Os rios deste tipo são, regra geral, de reduzidas dimensões (Lousada & Camacho, 2018) (da Costa & Lança, 2011).

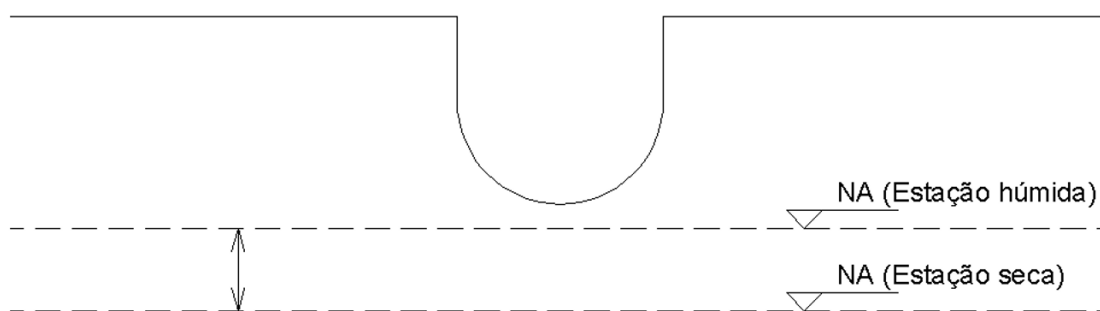


Figura 36 – Curso de água efémero (Fonte: Lousada & Camacho, 2018)

3.1.1.2.2. Classificação por grau de ramificação ou de bifurcação

Posto isto, importa também abordar a classificação dos cursos de água sob o ponto de vista do grau de ramificação ou bifurcação. Rodrigues, *et al.* (2011) e Lousada & Camacho (2018) dão destaque a dois métodos de classificação: o de Strahler e o de Shreve.

Do ponto de vista do sistema de classificação de Strahler, de referir, primeiramente, que as linhas de água que não possuam tributários são classificadas como sendo de 1.^a ordem. Quando se dá a união de duas linhas de 1.^a ordem, diz-se que há lugar ao surgimento de um curso de água de 2.^a ordem. A junção de dois rios de 2.^a ordem dá origem a um de 3.^a ordem, e assim sucessivamente, na medida em que a união de dois cursos de água de ordem n dá origem a um de ordem $n + 1$ (da Costa & Lança, 2011). No caso de dois cursos de água, que não possuem a mesma ordem, se encontrarem, irá prevalecer a maior ordem (Lousada & Camacho, 2018).

Resumidamente, para os cursos de água que numa das extremidades – a nascente – não possuem qualquer ligação com outro curso é atribuído a ordem 1, enquanto que a obtenção dos restantes níveis hierárquicos deriva da união entre dois cursos (Jorge, *et al.*, 2015), sendo que tal pode ser observado através da análise da Figura 37.

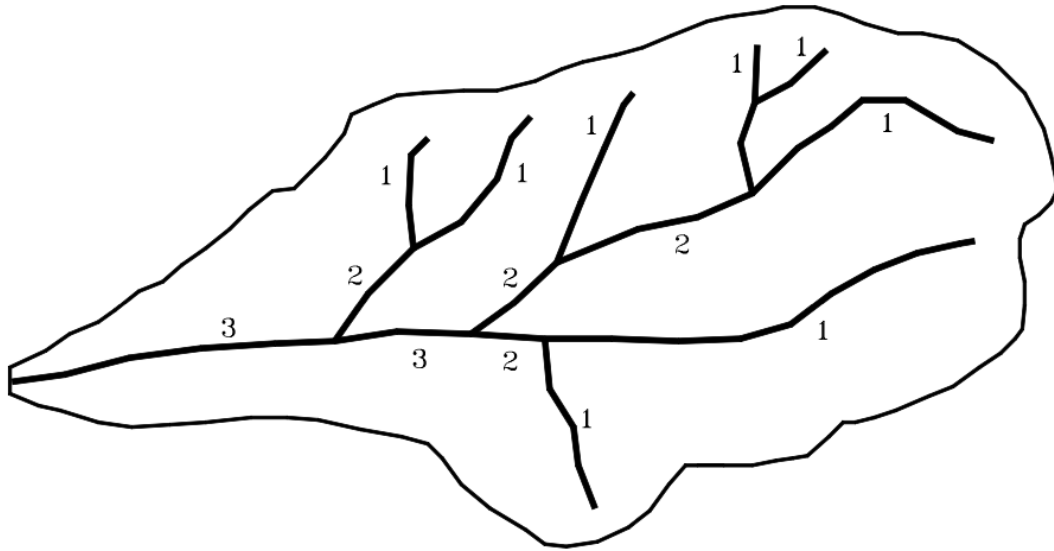


Figura 37 – Aplicação do método de Strahler para a obtenção da ordem de um curso de água (Fonte: da Costa & Lança, 2011)

A razão de bifurcação, R_b , por outro lado, surge com o intuito de delinear uma relação entre o número de canais de uma determinada ordem, N_i , e o número de canais da ordem acima, N_{i+1} ; este parâmetro pode ser determinado através da Equação 7 (Lousada & Camacho, 2018):

$$R_b = \frac{N_i}{N_{i+1}}$$

Equação 7

Com a obtenção de todas as razões de bifurcação de uma bacia hidrográfica é possível obter a razão de bifurcação média da bacia, de acordo com o expresso pela Equação 8 abaixo (Lousada & Camacho, 2018):

$$\overline{R_b} = \sqrt[i-1]{\prod_{i=1}^{i-1} \frac{N_i}{N_{i+1}}} \rightarrow \overline{R_b} = \sqrt[i-1]{N_1}$$

Equação 8

Onde N_1 representa o número de cursos de água de ordem 1.

O método de classificação de Shreve, apesar de possuir algumas semelhanças com o de Strahler, desde logo o facto de os cursos de água sem tributários serem classificados como sendo de 1.^a

ordem, difere deste último no seguinte aspeto: a ordem de um curso de água é determinada pela soma das ordens dos dois trechos que lhe dão origem. Assim, a convergência de dois cursos de 2.^a ordem, por exemplo, dará origem a um curso de 4.^a ordem, sob a perspectiva de Shreve, como demonstra a Figura 38 (Santana, 2018) (Christofoletti, 1980) (Lousada & Camacho, 2018).

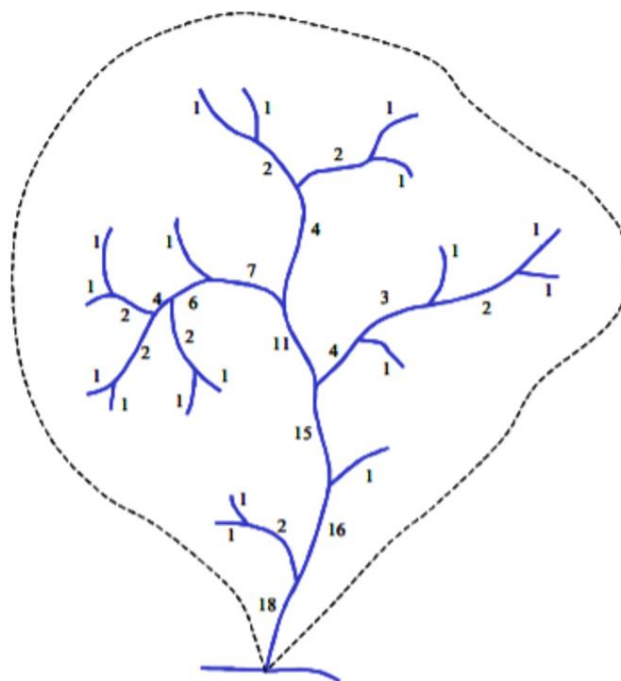


Figura 38 – Aplicação do método de Shreve para a obtenção da ordem de um curso de água (Fonte: Rennó & Soares, s.d.)

3.1.1.2.3. Tempo de concentração

Um outro aspeto importante para o estudo das cheias reside no conceito de tempo de concentração. Assim, entende-se por tempo de concentração de uma bacia hidrográfica, t_c , “o tempo necessário para que toda a sua área contribua para o escoamento superficial na secção de saída” (Lousada & Camacho, 2018). Pode ser, ainda, interpretado como o tempo necessário para que uma gota de água percorra superficialmente toda a bacia hidrográfica, desde o seu ponto mais distante até à sua saída (Murillo-Bermúdez, *et al.*, 2022) (Lousada & Camacho, 2018) (Mata-Lima, 2010).

O tempo de concentração é influenciado diretamente por diversos fatores, dentre eles características da própria bacia, como a forma desta, a declividade e o comprimento, quer do seu curso principal, quer dos seus afluentes, o seu grau de sinuosidade, o tipo de cobertura vegetal da bacia, a distância entre o ponto mais afastado dentro da bacia e a saída da mesma, entre outros (da Costa & Lança, 2011) (de Araújo, *et al.*, 2011).

Sob a perspectiva da análise de cheias, deve-se considerar que a duração da precipitação intensa deve ser, no mínimo, igual ao tempo de concentração – parâmetro designado de duração crítica. Tal surge com o intuito de assegurar que toda a área da bacia que contribui para o processo de escoamento superficial está a ser considerada (Lousada & Camacho, 2018). No entanto, é referido por Lousada & Camacho (2018) que, para evitar sobredimensionamentos, devem ser utilizados tempos de concentração de, no mínimo, 5 minutos, uma vez que este é o intervalo mínimo em que a leitura dos udogramas com duração de 24 horas pode ser efetuada.

São múltiplas as metodologias para determinar o tempo de concentração, destacando-se, dentre essas, as seguintes:

- **Fórmula de Témez:** testada com sucesso em bacias americanas e espanholas e amplamente utilizada em Portugal, esta fórmula obtém o tempo de concentração, t_c , através de dois fatores que incidem sobre o curso de água principal: o seu comprimento, em km, L , e o seu grau de inclinação médio, i . Esta poderá ser obtida através da Equação 9 (Lousada & Camacho, 2018) (da Costa & Lança, 2011).

$$t_c = \left(\frac{L}{i^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Equação 9

De ressaltar que esta fórmula possui algumas limitações a ela associadas, desde logo o facto de ser válida exclusivamente para bacias hidrográficas com uma área inferior a 3000 km² (Lousada & Camacho, 2018).

- **Fórmula de Ven Te Chow:** à semelhança da fórmula de Témez, a de Ven Te Chow também recorre ao grau de inclinação médio do curso principal, i , para determinar o tempo de concentração, só que, desta vez, juntamente com o comprimento da maior linha de água da bacia, em km, L , conforme é expresso pela Equação 10 (Lousada & Camacho, 2018) (da Costa & Lança, 2011).

$$t_c = 0.8773 \times \left(\frac{L}{\sqrt{i}} \right)^{0.64}$$

Equação 10

A limitação associada a esta fórmula passa pelo facto desta ser válida apenas para a determinação do tempo de concentração de bacias que possuam uma área entre 1,1 e 19 km².

- **Fórmula de Giandotti:** é, a par da fórmula de Témez, a mais utilizada em Portugal. Recorre a três fatores – a área da bacia hidrográfica para um determinado ponto, em km²,

A , o comprimento da maior linha de água dessa bacia, em km, L , e a altura média da bacia, medida a partir da cota da secção em estudo, em m, \bar{H} . É determinada a partir da Equação 11 (Lousada & Camacho, 2018) (da Costa & Lança, 2011).

$$t_c = \frac{(4 \times \sqrt{A}) + (1.5 \times L)}{0.8 \times \sqrt{\bar{H}}}$$

Equação 11

Conforme referido por Gonçalves (2020), de modo a obter um resultado com um maior grau de fiabilidade, é prudente recorrer à média aritmética dos valores de tempo de concentração obtidos através das diferentes metodologias. Assim, a média aritmética obtém-se através da divisão do somatório dos tempos de concentração obtidos através das diferentes metodologias, em horas, $t_{c,i}$, pelo número de metodologias utilizado, n , à imagem daquilo que se encontra expresso na Equação 12.

$$\bar{t}_c = \frac{\sum t_{c,i}}{n}$$

Equação 12

3.1.1.2.4. Densidade de drenagem

A densidade de drenagem, D_r , estabelece uma relação entre o comprimento total dos cursos de água, L_t , e a respetiva área de drenagem, A , com o objetivo de caracterizar a rede de drenagem de uma dada bacia hidrográfica sob o ponto de vista da sua extensão (Lousada & Camacho, 2018) (Rodrigues, *et al.*, 2011). Obtém-se através da Equação 13:

$$D_r = \frac{L_t}{A}$$

Equação 13

A densidade de drenagem é expressa em km/km² e tende a variar entre os 0,5 km/km², quando na presença de uma bacia com drenagem pobre, e os 3,5 km/km² (ou valores até superiores), no caso da bacia ser bem drenada. As bacias bem drenadas acabam por ser aquelas que se encontram mais sujeitas a cheias, uma vez que estas não favorecem o processo de infiltração, havendo lugar a um agravamento do escoamento superficial ao longo da bacia (Lousada & Camacho, 2018) (da Costa & Lança, 2011).

3.1.1.2.5. Densidade hídrica

O índice de densidade hídrica, D_h , resulta da divisão do número total de cursos de água de uma determinada bacia hidrográfica, N , pela área, em km^2 , dessa mesma bacia, A , como demonstra a Equação 14 (Lousada & Camacho, 2018).

$$D_h = \frac{N}{A}$$

Equação 14

Christofolletti (1980) refere que as bacias que apresentam valores mais elevados, no que diz respeito à densidade hídrica, são aquelas que possuem uma maior probabilidade de ter uma quantidade significativa de canais do tipo efémero. Para além disso, Gonçalves (2020) faz, ainda, referência à relação existente entre o índice de densidade hídrica e a tendência para a ocorrência de cheias de uma bacia, no sentido que, quanto maior for este índice, maior será a tendência para a ocorrência de cheias, uma vez que estas bacias hidrográficas não irão favorecer o processo de infiltração, o que agrava o escoamento superficial.

3.1.1.2.6. Extensão média do escoamento superficial

Este índice traduz aquele que é o percurso médio de escoamento superficial, \bar{P}_s , ou seja, a distância que a água, proveniente da precipitação, terá de percorrer para alcançar o curso de água mais próximo. É possível determinar este índice através da densidade de drenagem, D_r , uma vez que \bar{P}_s é igual a um quarto do inverso da densidade de drenagem, aproximadamente. Note-se que este índice corresponde, também, a um quarto da divisão entre a área da bacia hidrográfica, em km^2 , A , pelo comprimento total, em km, dos cursos de água que compõem essa bacia, L_t , como é possível verificar através da Equação 15 (Rodrigues, *et al.*, 2011).

$$\bar{P}_s = \frac{A}{4L_t} \approx \frac{1}{4D_r}$$

Equação 15

Ao contrário do que se verifica noutros índices, como é o caso do da densidade hídrica, o índice da extensão média do escoamento superficial de uma bacia possui uma relação inversa com a tendência que esta apresenta para cheias, uma vez que, se neste índice, a bacia hidrográfica apresentar valores elevados, o solo desta será mais permeável, o que facilita o processo de infiltração e diminui o escoamento superficial (Gonçalves, 2020).

3.1.1.2.7. Sinuosidade

A sinuosidade de um dado curso de água está associada ao seu declive e, por consequência disso, à sua velocidade de escoamento (Gonçalves, 2020). O grau de sinuosidade, S , pode ser calculado através da divisão entre o comprimento, em km, do rio principal da bacia em análise, L , e o comprimento, também em km, da diretriz, L_D , conforme demonstra a Equação 16 (Lousada & Camacho, 2018) (da Costa & Lança, 2011).

$$S = \frac{L}{L_D}$$

Equação 16

Note-se que, no mínimo, este índice será igual à unidade, o que implicaria que o curso de água em análise fosse totalmente retilíneo, algo que, naturalmente, é extremamente incomum de ocorrer. Além disso, Gonçalves (2020) faz referência às categorias sugeridas por North Carolina Division of Water Quality (2005) para a diferenciação e classificação dos cursos de água, tendo em conta a sua sinuosidade:

- **Ausente ($S = 1$):** neste cenário, como já foi, aliás, mencionado, o curso de água é totalmente retilíneo, o que implica que este terá uma tendência maior para ter um regime de escoamento do tipo efêmero;
- **Fraca ($1 < S < 1,2$):** no curso de água registam-se poucas curvas ao longo do seu trajeto, o que implica que o seu regime de escoamento será, regra geral, do tipo efêmero ou intermitente;
- **Moderada ($1,2 < S < 1,4$):** mesclam trechos retilíneos com curvas, registrando-se uma tendência maior para que estes cursos de água possuam um regime de escoamento intermitente ou perene;
- **Forte ($S > 1,4$):** estes cursos de água possuem um elevado nível de sinuosidade, o que implica que o regime de escoamento destes terão uma elevada probabilidade de serem do tipo perene.

3.1.1.2.8. Padrão de drenagem

Segundo da Costa & Lança (2011), os padrões de drenagem “*dizem respeito ao arranjo dos cursos de água, o que é influenciado pela natureza e disposição das camadas rochosas, pela geomorfologia da região e pelas diferenças de declive.*”. Dentre estes, autores como Lousada & Camacho (2018) e da Costa & Lança (2011) dão principal destaque aos que se seguem:

- **Drenagem dendrítica ou dendróide:** este padrão de drenagem, que, normalmente, se desenvolve em rochas uniformes, em termos de resistência, possui esta designação pelo

facto de o seu formato ser semelhante ao de árvores – Figura 39 – o que deu origem ao termo “dendrítica” ou “dendróide”, palavras que derivam do termo grego “*dendros*”, que significa “árvore”;

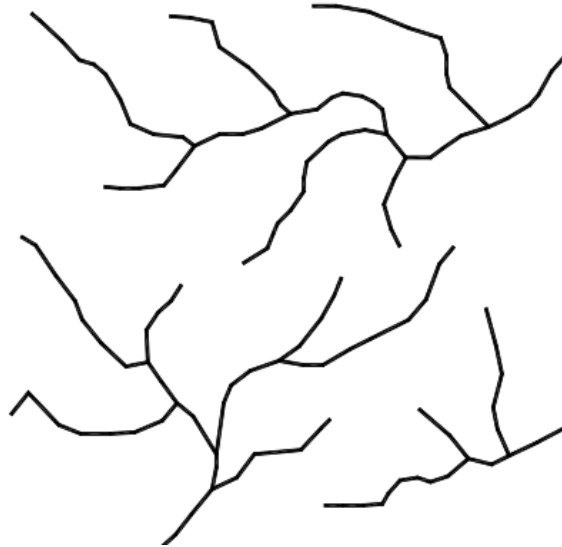


Figura 39 – Padrão de drenagem dendrítica ou dendróide (Fonte: da Costa & Lança, 2011)

- **Drenagem em treliça:** este padrão está associado à existência de vários rios principais e secundários. Dentro dos rios principais, como é visível na Figura 40, nota-se que estes são paralelos uns aos outros, algo que também se verifica em rios secundários; estes últimos têm a particularidade de desaguar nos rios principais de forma perpendicular;



Figura 40 – Padrão de drenagem em treliça (Fonte: da Costa & Lança, 2011)

- **Drenagem retangular:** este padrão é uma derivação do anterior, na medida em que este resulta da modificação do padrão de drenagem em treliça levada a cabo por falhas ou por um sistema de juntas, conforme se encontra demonstrado na Figura 41;

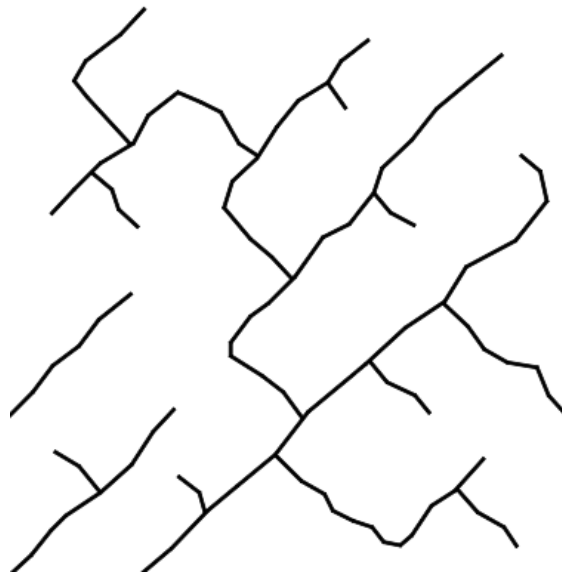


Figura 41 – Padrão de drenagem retangular (Fonte: da Costa & Lança, 2011)

- **Drenagem paralela:** neste caso, como mostra a Figura 42, os cursos de água escoam de forma paralela uns aos outros. Este padrão surge, normalmente, em localizações onde há um elevado nível de declividade ou onde há lugar a formas estruturais que dão origem ao surgimento de espaçamentos irregulares;

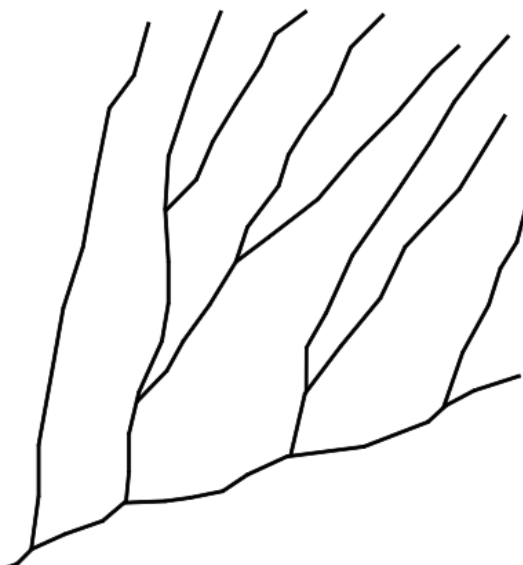


Figura 42 – Padrão de drenagem paralela (Fonte: da Costa & Lança, 2011)

- **Drenagem radial:** neste caso, os cursos de água encontram-se localizados à volta de um ponto central ou ponto culminante, como é possível verificar na Figura 43. Este é um cenário tipicamente verificado em cones de antigos vulcões;

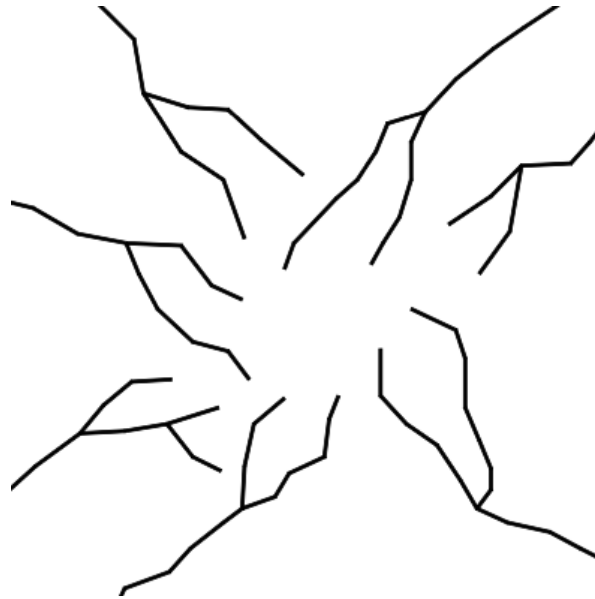


Figura 43 – Padrão de drenagem radial (Fonte: da Costa & Lança, 2011)

- **Drenagem anelar:** possui esta denominação pelo facto de a sua aparência ser semelhante à de anéis de um tronco de árvore, Figura 44.



Figura 44 – Padrão de drenagem anelar (Fonte: da Costa & Lança, 2011)

3.1.1.3. Caracterização do relevo

3.1.1.3.1. Hipsometria

A caracterização de uma determinada bacia de um ponto de vista hipsométrico incide sobre a quantificação e separação das áreas por classes, tendo em conta as suas altitudes, de modo a determinar a distribuição das frequências altimétricas dessa bacia (Rodrigues, *et al.*, 2011). O estudo de natureza hipsométrica das bacias hidrográficas possui um elevado grau de relevância, dado que é através deste que são determinados os chamados “divisores de água”, isto é, os picos das elevações que atuam para separar a drenagem nestas bacias hidrográficas (Marcuzzo, *et al.*, 2011). Assim, a forma mais comumente utilizada para efetuar a caracterização hipsométrica de uma bacia passa pela elaboração da sua curva hipsométrica, onde é expresso, graficamente, a parcela da área da bacia, A , que se encontra acima de uma determinada altitude ou cota, Z (Lousada & Camacho, 2018), como é visível na Figura 45, com o exemplo da bacia da Ribeira dos Socorridos.

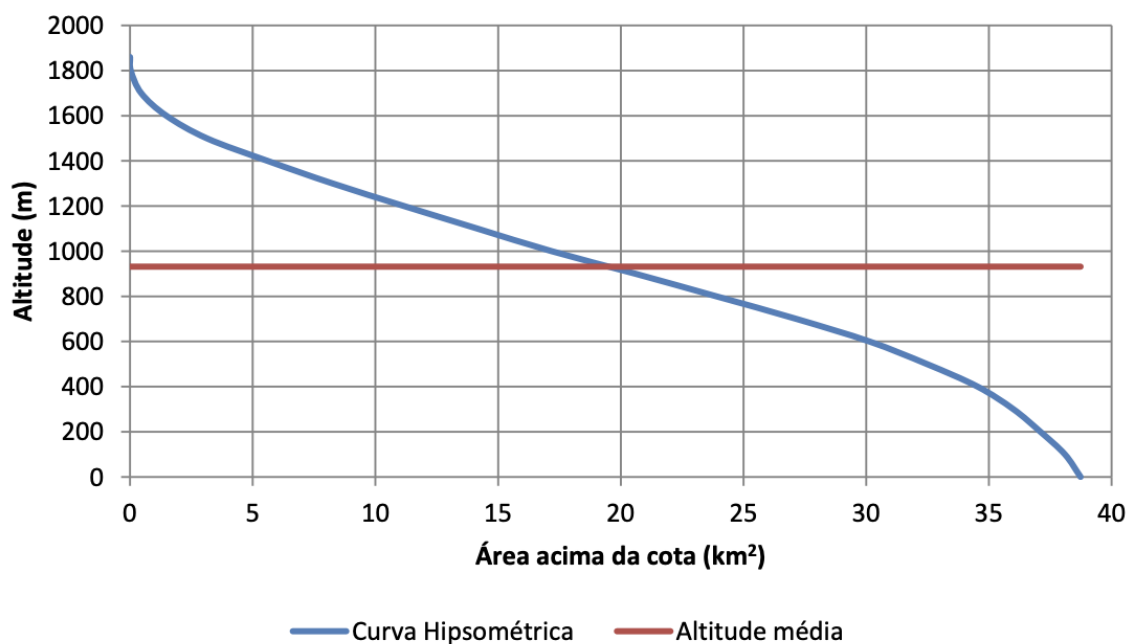


Figura 45 – Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira dos Socorridos (Fonte: Marques, 2014)

A obtenção da curva hipsométrica de uma dada bacia possui um significativo nível de importância, uma vez que esta permite determinar diversas características da bacia em análise, como as suas altitudes máxima, mínima, média e mediana (da Costa & Lança, 2011). De ressaltar que, atualmente, a hipsometria passa muito pela cartografia hipsométrica, por conta do recurso à cartografia digital e às ferramentas associadas aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Desta forma, é possível obter mapas hipsométricos, onde é possível verificar os diferentes níveis

de altitude presentes na bacia em análise, como demonstra a Figura 46, referente à bacia hidrográfica da Ribeira dos Socorridos e da Ribeira do Vigário (Lousada & Camacho, 2018).

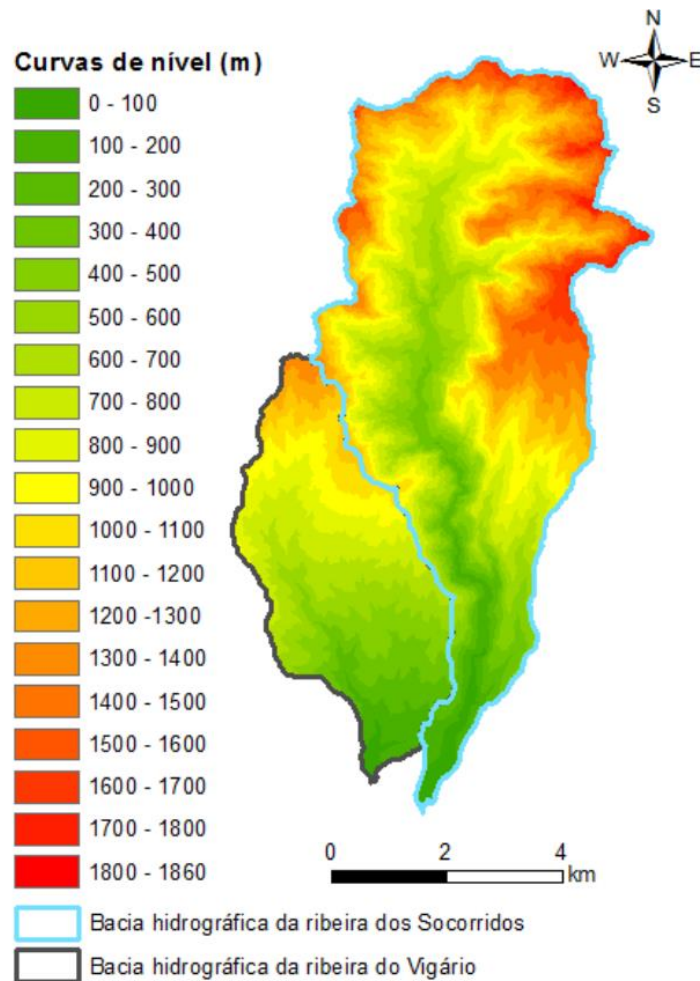


Figura 46 – Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica da Ribeira dos Socorridos e da Ribeira do Vigário
(Fonte: Marques, 2014)

3.1.1.3.2. Altitude e altura médias

Primeiramente, no que diz respeito à altitude média, em metros, \bar{Z} , esta deriva do somatório dos produtos entre a altitude média entre duas curvas de nível consecutivas, \bar{Z}_i , e o valor da área destas, em km^2 , A_i , a dividir pela área total, também em km^2 , da bacia hidrográfica em estudo, A , o que está representado pela Equação 17 (Lousada & Camacho, 2018) (Rodrigues, *et al.*, 2011).

$$\bar{Z} = \frac{\sum \bar{Z}_i \cdot A_i}{A}$$

Equação 17

Quanto à altura média, em metros, \bar{H} , é determinada a partir de uma equação semelhante à da altitude média, havendo apenas lugar à substituição da altitude média entre curvas de nível

consecutivas, \bar{Z}_l , pela altura média entre curvas de nível, \bar{H}_l . De referir que a altura média corresponderá, também, à diferença entre a altitude média, \bar{Z} , e a altitude mínima, Z_{min} , ambas em metros, como é possível verificar a partir da Equação 18 (Lousada & Camacho, 2018) (Rodrigues, *et al.*, 2011).

$$\bar{H} = \frac{\sum \bar{H}_l \cdot A_l}{A} \rightarrow \bar{H} = \bar{Z} - Z_{min}$$

Equação 18

Importa, ainda, ressaltar que o fator que distingue estes dois índices está associado ao facto de a altura média levar em consideração a cota mínima da área em análise, enquanto, que a altitude tem em conta o nível do mar. Logo, estes dois parâmetros coincidirão quando a cota mínima da bacia hidrográfica em estudo for igual ao nível do mar (Gonçalves, 2020).

3.1.1.3.3. Coeficiente de massividade

Este coeficiente estabelece a relação entre a altura média, em metros, \bar{H} , e a área total da bacia hidrográfica, em km², A , conforme a Equação 19 abaixo demonstra (Lousada & Camacho, 2018).

$$C_{mass} = \frac{\bar{H}}{A}$$

Equação 19

O coeficiente de massividade, C_{mass} , surge com o intuito de identificar a distribuição de terras baixas e altas dentro da bacia hidrográfica. Note-se que, para valores inferiores a 0,5, a bacia possuirá uma maior predominância de terras mais baixas. (Gonçalves, 2020).

3.1.1.3.4. Coeficiente orográfico

O coeficiente orográfico, C_o , resulta da divisão da altura média ao quadrado, em metros, \bar{H}^2 , pela área total, em km², da bacia hidrográfica, A , como se verifica na Equação 20 (Lousada & Camacho, 2018). Este coeficiente também poderá ser obtido através da multiplicação da altura média pelo coeficiente de massividade, C_{mass} , à imagem do que a Equação 21 demonstra (Gonçalves, 2020).

$$C_o = \frac{\bar{H}^2}{A}$$

Equação 20

$$C_o = \bar{H} \cdot C_{mass}$$

Equação 21

3.1.1.3.5. Perfil longitudinal de um curso de água

O perfil longitudinal de um determinado curso de água relaciona, em cada ponto, as cotas do seu leito, em metros, e a distância deste à saída da bacia hidrográfica, em km. Quando representado graficamente, é comum que o perfil longitudinal seja acompanhado pela descrição de obras de relevo ao longo deste curso de água, como, aliás, é perceptível na Figura 47, onde é apresentado o perfil longitudinal de um curso de água hipotético (Rodrigues, *et al.*, 2011).

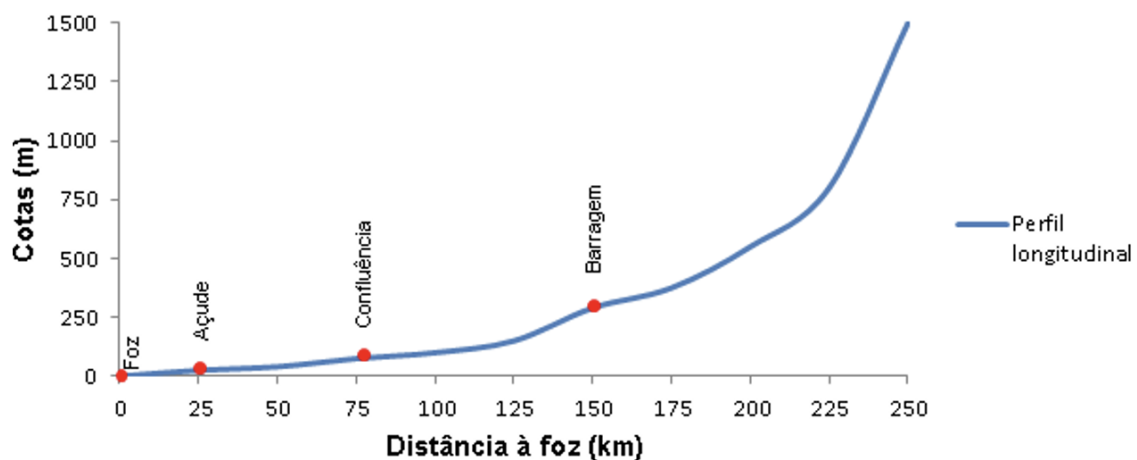


Figura 47 – Perfil longitudinal de um rio hipotético (Fonte: Rodrigues, *et al.*, 2011)

De ressaltar que, um pouco à imagem do que acontece nas caracterizações hipsométricas, o acesso a ferramentas SIG facilita a determinação do perfil longitudinal dos cursos de água (Gonçalves, 2020).

3.1.1.3.6. Declives da bacia hidrográfica

Para uma análise do fenómeno das cheias, importa destacar a importância que fatores como o declive da bacia hidrográfica exercem sob o processo de escoamento superficial e, fruto disso, sob a maior ou menor suscetibilidade dessa mesma bacia hidrográfica à ocorrência de cheias. Deste modo, quanto maior for o declive de uma determinada bacia hidrográfica, maior será a propensão para a ocorrência de escoamento superficial e, conseqüentemente, para a ocorrência de cheias (Gonçalves, 2020).

Portanto, dentro da análise do declive de uma bacia hidrográfica, autores como Lousada & Camacho (2018) e Gonçalves (2020) enumeram alguns índices, dentre os quais:

- **Declive médio do curso de água, D_m :** para este índice, considera-se a diferença de altitude entre os pontos mais elevado e mais baixo, em metros, ΔZ , dividindo-se este valor pelo comprimento total deste curso de água, em km, L , sendo necessário, portanto, recorrer à Equação 22;

$$D_m = \frac{\Delta Z}{1000 \times L}$$

Equação 22

- **Declive equivalente do curso de água, i_q :** neste índice, é considerada uma reta hipotética que intersesta o perfil longitudinal do curso de água e divide-o em duas partes de igual área, cujo declive é obtido a partir da diferença entre a altitude equivalente, Z_{eq} , e a altitude mínima, Z_{min} , ambas em metros, a dividir pelo comprimento total do curso de água em análise, L , como é exposto pela Equação 23;

$$i_q = \frac{Z_{eq} - Z_{min}}{L}$$

Equação 23

Note-se que, para obter o valor da altitude equivalente, Z_{eq} , é necessário recorrer à Equação 24:

$$Z_{eq} = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{n-1} (Z_i + Z_{i+1}) \cdot (X_{i+1} - X_i) - Z_{min}$$

Equação 24

- **Declive 10-85 do curso de água, i_{10-85} :** este parâmetro analisa o declive do trecho mais central do curso de água, uma vez que não considera os 15% finais e os 10% iniciais do curso de água, de modo a deixar de lado as áreas com declives mais acentuados. Obtém-se através da Equação 25, recorrendo a parâmetros como as altitudes que o curso apresenta nos seus 85% e 10%, Z_{85} e Z_{10} , respetivamente, e o comprimento total deste curso, L ;

$$i_{10-85} = \frac{Z_{85} - Z_{10}}{0,75 \times L}$$

Equação 25

- **Índice de relevo da bacia hidrográfica, i_{relevo} :** à semelhança do que se verifica quanto ao declive médio do curso de água, D_m , este parâmetro recorre à diferença de altitudes entre os pontos mais elevado e mais baixo, só que, desta feita, de toda a bacia hidrográfica,

Δz . Este valor é dividido, ainda, pelo comprimento da bacia hidrográfica, em km, L_b , como demonstra a Equação 26.

$$i_{relevo} = \frac{\Delta z}{1000 \times L_b}$$

Equação 26

3.1.2. Características hidrológicas da bacia hidrográfica

3.1.2.1. Caracterização das precipitações

Para o estudo do fenómeno das cheias, a caracterização da precipitação, sobretudo da precipitação intensa, revela-se um fator de extrema relevância. Dito isto, entende-se por precipitações intensas “*as chuvas de grande intensidade, com duração desde dias a poucos minutos (10 a 5 min), cujo cálculo é fundamental ao dimensionamento de obras hidráulicas (sistemas de drenagem, diques de proteção contra cheias, descarregadores de barragem, etc.), na medida em que condicionam diretamente o valor do caudal máximo de uma cheia (caudal de ponta).*” (Lousada & Camacho, 2018).

De acordo com Rodrigues, *et al.* (2011), as chuvas intensas poderão ser caracterizadas a partir de 3 pontos de vista distintos:

- **Duração:** primeiramente, há que ter em conta a duração do fenómeno de precipitação, desde logo para determinar o caudal de cheia. A duração da precipitação refere-se ao período de tempo que separa o início e o final da precipitação (da Costa & Lança, 2011). À semelhança do que é referido por Lousada & Camacho (2018), é de ressaltar que este tipo de fenómeno pode variar consideravelmente do ponto de vista da sua duração, podendo durar alguns minutos ou, por outro lado, dias inteiros;
- **Intensidade:** estabelece a relação entre a altura pluviométrica e a duração do evento de precipitação, sendo, geralmente, expressa em mm/h ou mm/minuto (da Costa & Lança, 2011); a intensidade da precipitação, I , pode, ainda, ser calculada através da Equação 27 (Gonçalves, 2020):

$$I = \frac{P_{est} \cdot k}{t_c}$$

Equação 27

Onde P_{est} representa a precipitação diária máxima anual estimada, em mm, t_c o tempo de concentração, expresso em horas, e k o coeficiente de repartição temporal, sendo obtido a partir da Equação 28 (Gonçalves, 2020):

$$k = 0,181 \cdot \ln(t_c) + 0,4368$$

Equação 28

- **Frequência:** está relacionado com a probabilidade de ocorrência de um fenómeno de precipitação, tendo em conta determinadas características de duração e intensidade. Esta grandeza é, regra geral, expressa em períodos de retorno (Lousada & Camacho, 2018).

Para além disso, Gonçalves (2020) refere que a precipitação pode ser, ainda, analisada através de dois métodos distintos:

- **Método descritivo:** neste tipo de metodologia, os valores máximos, em unidades de tempo múltiplas, e o máximo na unidade de tempo em análise são ajustados de acordo com a Equação 29:

$$h = a \cdot t^n$$

Equação 29

Onde h corresponde à altura pluviométrica, em milímetros, e t ao tempo, sendo a e n duas variáveis constantes que são obtidas através do método dos mínimos quadrados, após efetuada a logaritmação;

- **Método estatístico ou estocástico:** por outro lado, nesta metodologia, os valores máximos verificados nos vários intervalos de tempo são ajustados de acordo com uma lei de densidade de probabilidade, como, por exemplo, a Lei de Gumbel, para que, posteriormente, seja possível efetuar ajustes à curva de possibilidade udométrica.

3.1.2.2. Precipitação expectável – distribuição de Gumbel

A distribuição de Gumbel é a lei estatística mais comumente utilizada em Portugal, no que ao estudo das cheias diz respeito (Lousada & Camacho, 2018). A distribuição de Gumbel “*apresenta dois parâmetros, um de escala e outro de forma, os quais vêm sendo estimados pelo método dos momentos, especificamente, os momentos de 1.ª e 2.ª ordens, que representam, respectivamente, média e variância.*” (de Mello & da Silva, 2005).

Do ponto de vista da hidrologia, recorre-se à distribuição de Gumbel para obter uma estimativa do valor de precipitação expectável, tendo em conta um dado tempo de recorrência. O valor da precipitação diária máxima anual estimada, em mm, P_{est} , pode ser obtido através da Equação 30, ou seja, através da soma entre o nível de precipitação média, em mm, P_m , e o resultado do produto entre o desvio padrão amostral, em mm, S' , e o fator de frequência, K_t (Gonçalves, 2020).

$$P_{est} = P_m + S' \cdot K_t$$

Equação 30

Sendo que S' e K_t são determinados através das Equações 31 e 32 (Gonçalves, 2020):

$$S' = \left(\frac{\sum (X_i - X_m)^2}{n'} \right)^{0,5}$$

Equação 31

$$K_t = -\frac{6^{0,5}}{\pi} \cdot \left\{ 0,577216 + \ln \left(\ln \left(\frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right) \right\}$$

Equação 32

Onde X_i corresponde ao valor amostral, em mm, X_m à média amostral, também expresso em mm, n' à quantidade amostral e T_r ao tempo de recorrência, expresso em anos. Desta forma, é possível elaborar a curva de precipitação expectável, tendo em conta um determinado tempo de recorrência (Gonçalves, 2020).

3.1.2.3. Caudal de ponta de cheia

O caudal de ponta de cheia, ou caudal máximo de um curso de água, é um parâmetro de significativa importância, do ponto de vista do estudo do fenómeno das cheias, uma vez que corresponde ao “valor associado a um risco de ser igualado ou ultrapassado.” (Gonçalves, 2020). Dentre as metodologias empíricas para determinar o caudal de ponta de cheia, Gonçalves (2020) aponta as seguintes como sendo as mais adequadas para este tipo de estudo:

- **Forti:** esta metodologia possui uma limitação quanto à sua aplicabilidade, no sentido em que só pode ser utilizada em bacias hidrográficas cuja área não ultrapassa os 1000 km². Obtém-se a partir da Equação 33 abaixo (Gonçalves, 2020):

$$Q_{[Forti]} = A \cdot \left(b \cdot \frac{500}{125 + A} \right) + c$$

Equação 33

$Q_{[Forti]}$ refere-se ao valor do caudal de ponta de cheia, expresso em m³/s, calculado através do método de Forti, A representa a área da bacia hidrográfica, em km²; b está associado à precipitação máxima diária, podendo este assumir o valor de 2,35, para valores de precipitação máxima diária abaixo dos 200 mm, ou o valor de 3,25, em caso contrário; c , por outro lado, assume o valor de 0,5 se a precipitação máxima diária for inferior a 200 mm e o valor de 1 caso tal não se verifique (Gonçalves, 2020);

- **Pagliario:** à semelhança do que acontece com a metodologia de Forti, a de Pagliario só é capaz de determinar o valor do caudal de ponta de cheia, em m³/s, $Q_{[Pagliario]}$, no caso de a área da bacia hidrográfica não exceder os 1000 km². Obtém-se recorrendo à área da bacia hidrográfica, expressa em km², A , conforme demonstra a Equação 34 abaixo (Gonçalves, 2020);

$$Q_{[Pagliario]} = A \cdot \frac{2900}{90A}$$

Equação 34

- **Racional:** ao contrário das duas metodologias anteriores, classificadas como empíricas, as três metodologias apresentadas a seguir são classificadas como cinemáticas. No que toca à metodologia racional, esta, apesar de não possuir um limite bem definido, no que toca à área das bacias a que pode ser aplicada, tem sido utilizada em Portugal em bacias hidrográficas cujas áreas são inferiores a 25 km². Para o cálculo do caudal de ponta de cheia, expresso em m³/s, $Q_{[Racional]}$, esta metodologia recorre à Equação 35, onde são tidos em conta os seguintes parâmetros: o coeficiente de escoamento superficial, C – que deverá seguir os valores apresentados na Tabela 3 – a intensidade da precipitação, em mm/h, I , e à área da bacia hidrográfica, expressa em km², A (Gonçalves, 2020).

$$Q_{[Racional]} = \frac{C \cdot I \cdot A}{3,6}$$

Equação 35

Zonas Urbanísticas		
	Ocupação do Solo	Coefficiente de Escoamento Superficial
Áreas Verdes	Relvados em solos arenosos	0,05 – 0,20
	Relvados em solos pesados	0,15 – 0,35
	Parques e cemitérios	0,10 – 0,35
	Campos desportivos	0,20 – 0,35
Áreas Comerciais	Centro da cidade	0,70 – 0,95
	Periferia	0,50 – 0,70
Áreas Residenciais	Vivendas no centro da cidade	0,30 – 0,50
	Vivendas na periferia	0,25 – 0,40
	Prédios de apartamentos	0,50 – 0,70
Áreas Industriais	Indústria dispersa	0,50 – 0,80
	Indústria concentrada	0,60 – 0,90
	Vias-Férreas	0,20 – 0,40
Ruas e Estradas	Asfaltadas	0,70 – 0,90
	Em betão	0,80 – 0,95
	Em tijolo	0,70 – 0,85
	Passaios	0,85 – 0,85
	Telhados	0,75 – 0,95
	Baldios	0,10 – 0,30

Tabela 3 – Coeficiente de escoamento superficial (Fonte: Gonçalves, 2020)

- **Giandotti:** este método tem o foco voltado para as bacias com áreas abaixo dos 300 km². O cálculo do caudal de ponta de cheia, $Q_{[Giandotti]}$, é feito recorrendo a parâmetros como o coeficiente de redução, λ – que deverá seguir os valores apresentados na Tabela 4 – a área da bacia, em km², A , a altura de precipitação, tendo em conta um período igual ao tempo de concentração, expressa em mm, $P_{m\acute{a}x}$, e o próprio tempo de concentração, em horas, t_c , através da Equação 36 (Gonçalves, 2020);

$$Q_{[Giandotti]} = \frac{\lambda \cdot A \cdot P_{m\acute{a}x}}{t_c}$$

Equação 36

A (km ²)	λ	“C” equivalente
< 300	0,346	1,25
300 – 500	0,277	1,00
500 – 1000	0,197	0,71
1000 – 8000	0,100	0,36
8000 – 20000	0,076	0,27
20000 – 70000	0,055	0,20

Tabela 4 – Coeficiente de redução (Fonte: Gonçalves, 2020)

- **Mockus:** a principal limitação associada a esta metodologia passa pelo facto da sua aplicabilidade se encontrar reduzida às bacias hidrográficas onde os tempos de concentração se situam abaixo das 4 horas. Para o cálculo do caudal de ponta de cheia, em m³/s, $Q_{[Mockus]}$, esta metodologia recorre à Equação 37, o que implica que serão necessários os valores associados à área da bacia, em km², A , à precipitação útil, em cm, $P_{\acute{u}til}$, e ao tempo de concentração, expresso em horas, t_c (Gonçalves, 2020).

$$Q_{[Mockus]} = \frac{2,08 \cdot A \cdot P_{\acute{u}til}}{\sqrt{t_c} + 0,6 \cdot t_c}$$

Equação 37

Note-se que a precipitação útil, ou seja, o nível de precipitação que escoará superficialmente até à saída da bacia, é calculado através da multiplicação do valor da precipitação diária máxima anual estimada, em mm, P_{est} , pelo coeficiente de escoamento superficial, C , como apresentado na Equação 38 (Gonçalves, 2020).

$$P_{\acute{u}til} = P_{est} \cdot C$$

Equação 38

3.1.3. Medidas de mitigação das cheias

À imagem do que já foi referenciado no presente documento, as cheias são fenómenos aos quais estão associados consequências negativas, do ponto de vista da sociedade, das infraestruturas e do ambiente; logo, as medidas de mitigação dos impactos das cheias assumem uma relevância significativa. Assim, várias metodologias têm vindo a ser consideradas para esse efeito, cabendo, todavia, às bacias de detenção o maior destaque, sobretudo do ponto de vista das áreas urbanas (Campana, Bernardes, & Junior, 2007). Por bacia de detenção entende-se uma estrutura que tem como objetivo armazenar, regularizar e controlar o processo de escoamento superficial que surge como consequência de um fenómeno de precipitação sobre uma determinada bacia hidrográfica (Gonçalves, 2020).

O primeiro aspeto a considerar, do ponto de vista da implementação de uma bacia de detenção, passa por verificar se, efetivamente, o trecho em questão do curso de água necessita de uma estrutura desta natureza. Com esse intuito, Gonçalves (2020) indica que tal pode ser alcançado através da Equação 39 abaixo, que analisa o *Fill Rate*, FR , ou seja, o grau de preenchimento que a foz de um curso de água apresenta após um fenómeno de precipitação, através de dois parâmetros: o caudal precipitado, Q_p , e a capacidade de escoamento da foz, Q_m , sendo que ambos se encontram expressos em m^3/s .

$$FR = \frac{Q_p}{Q_m} \cdot 100$$

Equação 39

Para a obtenção do Q_m , Gonçalves (2020) faz referência à metodologia de Manning-Strickler, mais concretamente à Equação 40 expressa abaixo, onde A refere-se à área do trecho de escoamento da foz do curso de água, em m^2 , R ao raio hidráulico, em m , i ao valor do declive médio do trecho da foz, expresso em m/m , e n ao coeficiente de rugosidade do leito, em $m^{1/3}s^{-1}$ (Gonçalves, 2020).

$$Q_m = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{i}$$

Equação 40

Por sua vez, R advém da Equação 41, no caso de a secção em análise ser retangular (Gonçalves, 2020):

$$R = \frac{B + 2 \times h}{A}$$

Equação 41

Onde B representa a largura da secção de escoamento da foz e h a altura dessa mesma secção, ambas em m.

Note-se que, na eventualidade de o *Fill Rate* ultrapassar os 100%, o caudal desse curso de água irá ser superior à capacidade de escoamento que este apresenta a jusante (Gonçalves, 2020). Note-se que, de modo a estabelecer uma margem de segurança, no dimensionamento de obras hidráulicas, um dos critérios é o de assegurar que o *Fill Rate* não ultrapassa os 85% (Lousada, *et al.*, 2021).

Um outro parâmetro relevante na perspetiva da mitigação dos efeitos das cheias é o do coeficiente de rugosidade. A rugosidade hidráulica pode ser definida como “*uma medida da resistência da superfície ao escoamento da água devido ao atrito ou fricção provocada por ela.*” (Novo, Renó, Barbosa, & Rudorff, 2011). A este coeficiente está relacionado a energia cinética, Ec , medida em joules, na medida em que, “*quanto mais liso for o material que compõe o leito, menor o atrito e menor a perda de energia cinética*” (Gonçalves, 2020). Ec pode, portanto, ser determinado através da Equação 42 abaixo, recorrendo a parâmetros como a massa da água, expressa em kg, m , e a velocidade de escoamento, em m/s, v (Gonçalves, 2020).

$$Ec = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Equação 42

Considerando-se que m é um parâmetro constante, uma diminuição da energia cinética estará, necessariamente, ligado a uma diminuição da velocidade de escoamento; a essa conclusão, para além da Equação 42, é tida em conta, adicionalmente, a Lei da Continuidade, expressa através da Equação 43, onde o caudal, em m³/s, Q , resulta da multiplicação da área da secção, em m², As , pela velocidade de escoamento, em m/s, v (Gonçalves, 2020).

$$Q = As \cdot v$$

Equação 43

Um cenário como este implica que a área da secção de escoamento tenha que ser maior. No entanto, visto que as dimensões do canal são parâmetros constantes, o aumento da área da secção de escoamento estará diretamente associado a um aumento do caudal, o que poderá levar ao transbordo de água (Gonçalves, 2020). Partindo desse pressuposto, determinar, de forma fiável, o coeficiente de rugosidade do canal, tendo em conta o material com que o mesmo é constituído, assume-se como um fator de grande relevância. Assim, Gonçalves (2020) faz referência à Tabela 5, tabela essa que agrupa os coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler, associados a vários materiais, que derivam de experiências laboratoriais.

Coefficientes de Rugosidade de Manning-Strickler				
Natureza do Fundo	Muito Boa	Boa	Regular	Má
Alvenaria de pedra argamassada	0.017	0.020	0.025	0.030
Alvenaria de pedra aparelhada	0.013	0.014	0.015	0.017
Alvenaria de pedra seca	0.025	0.033	0.033	0.035
Alvenaria de tijolos	0.012	0.013	0.015	0.017
Calhas metálicas lisas (semicirculares)	0.011	0.012	0.013	0.016
Canais abertos em rocha (irregular)	0.035	0.040	0.045	-
Canais c/ fundo em terra e talude c/ pedras	0.028	0.030	0.033	0.035
Canais c/ leito pedregoso e talude vegetado	0.025	0.030	0.035	0.040
Canais com revestimento de betão	0.012	0.014	0.016	0.018
Canais de terra (retilíneos e uniformes)	0.017	0.020	0.023	0.025
Canais dragados	0.025	0.028	0.030	0.033
Condutos de barro (drenagem)	0.011	0.012	0.014	0.017
Condutos de barro vitrificado (esgoto)	0.011	0.013	0.015	0.017
Condutos de prancha de madeira aplainada	0.010	0.012	0.013	0.014
Gabião	0.022	0.030	0.035	-
Superfícies de argamassa de cimento	0.011	0.012	0.013	0.015
Superfícies de cimento alisado	0.010	0.011	0.012	0.013
Tubo de ferro fundido revestido c/ alcatrão	0.011	0.012	0.013	-
Tubo de ferro fundido sem revestimento	0.012	0.013	0.014	0.015
Tubos de bronze ou de vidro	0.009	0.010	0.012	0.013
Tubos de betão	0.012	0.013	0.015	0.016
Tubos de ferro galvanizado	0.013	0.014	0.015	0.017
Córregos e rios limpos retilíneos e uniformes	0.025	0.028	0.030	0.033
Córregos e rios limpos retilíneos e uniformes c/ pedras e vegetação	0.030	0.033	0.035	0.040
Córregos e rios limpos retilíneos e uniformes c/ meandros e poços	0.035	0.040	0.045	0.050
Margens espraiadas c/ pouca vegetação	0.050	0.060	0.070	0.080
Margens espraiadas c/ muita vegetação	0.075	0.100	0.125	0.150

Tabela 5 – Coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler (Fonte: Cirilo, 2001; Gonçalves, 2016)

Conforme defendido por Gonçalves (2020) e Lousada, *et al.* (2021), a implementação de um dispositivo descarregador, que assegure a regularização do escoamento, assume-se como um fator de extrema importância. Assim, Lousada, *et al.* (2021) assume que um descarregador do tipo Cipolletti é o mais adequado em cenários como este, dado que este tipo de descarregador é capaz de reduzir a turbulência das regiões que entram em contacto direto com a água e também de facilitar o processo de escoamento.

No que diz respeito às metodologias para o cálculo do volume de armazenamento, do ponto de vista da bacia de detenção, duas recebem maior destaque por parte de Gonçalves (2020) e Lousada, *et al.* (2021):

- **Método Holandês:** nesta metodologia, o volume de armazenamento da bacia, medido em m^3 , Va , é dado pela diferença entre o volume precipitado, Vp , e o volume de saída do descarregador, Vs , sendo ambos os parâmetros expressos em m^3 , como mostra a Equação 44 (Gonçalves, 2020).

$$Va = Vp - Vs$$

Equação 44

No entanto, este método considera erradamente que o processo de armazenamento se inicia imediatamente no começo da precipitação, levando a um sobredimensionamento de estruturas (Lousada, *et al.* 2021);

- **Método do Hidrograma Triangular Simplificado (Método HTS):** por outro lado, esta metodologia assume que o pico do hidrograma corresponde ao caudal de ponta. Para o controlo do caudal precipitado, o descarregador irá regularizar a “*diferença de áreas do hidrograma triangular simplificado e o hidrograma de escoamento do descarregador*” (Gonçalves, 2020), à semelhança do apresentado na Figura 48.

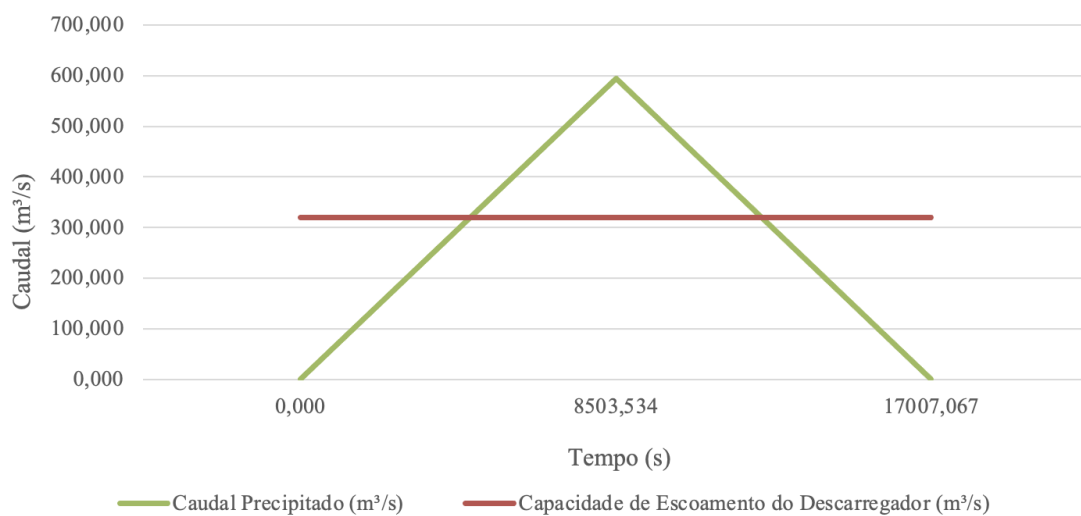


Figura 48 – Esquemática do Método HTS (Fonte: Gonçalves, 2020)

Assim, à semelhança do que é referido por Gonçalves (2020), o volume que o descarregador deverá armazenar, em m^3 , Va , será aquele que se encontra representado acima da interseção entre o caudal precipitado e a capacidade de escoamento do descarregador; assim, é possível proceder ao seu cálculo através da Equação 45:

$$Va = \frac{(Qp - Qs) \cdot \left(2 \cdot t_c - 2 \cdot \frac{Qs}{\frac{Qp}{t_c}} \right)}{2}$$

Equação 45

Sendo que Qp e Qs representam os caudais precipitado e de saída do descarregador, respetivamente, ambos medidos em m^3/s , enquanto que t_c corresponde ao tempo de concentração, expresso em segundos.

CAPÍTULO IV

OBTENÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS E FISIAGRÁFICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA – OBTENÇÃO DE DADOS

Através da obtenção dos parâmetros geomorfológicos das bacias hidrográficas em estudo foi possível utilizar as metodologias de caracterização referidas nos capítulos anteriores. Para tal e com base nos ficheiros MDT fornecidos pelo LREC-RAM, recorreu-se ao *software ArcGIS* para executar o processo referido. De seguida, apresenta-se o procedimento executado.

Para a introdução do ficheiro MDT e para que este fosse retificado de qualquer imperfeição que possa surgir no programa recorreu-se através da janela de ferramentas do *software ArcGIS* e como comando “*ArcToolBox*”, “*Spatial Analyst Tools*”, “*Hidrology*”, “*Fill*”, deu-se início ao processo. De seguida, e através dos mesmos comandos mencionados anteriormente, com exceção do comando “*Fill*”, utilizou-se o “*Flow-Direction*” para que fosse feito o mapeamento do relevo e nos indicasse a direção do escoamento, como demonstra a Figura 49.

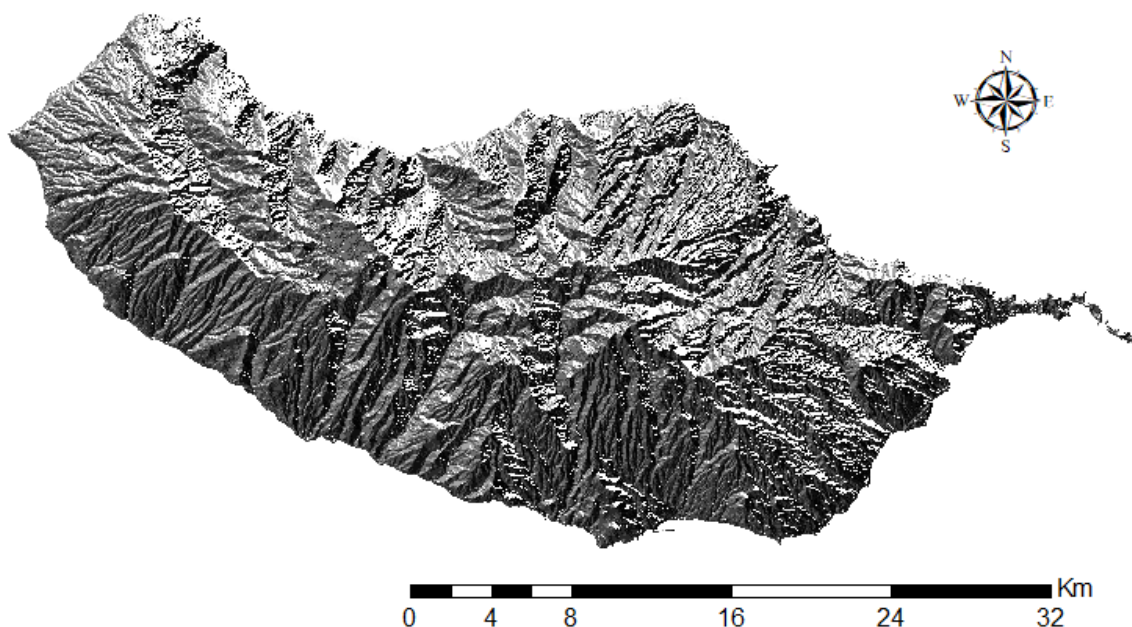


Figura 49 – Flow Direction (Fonte Autor, 2022)

Posteriormente, com o “*ArcToolBox*”, “*Spatial Analyst Tool*”, “*Hidrology*”, “*Flow Accumulation*”, e utilizando o ficheiro realizado na tarefa anterior, será uma mais-valia para a determinação dos cursos e a sua respetiva classificação. De salientar que este ficheiro gerado ainda não é indicador de nenhuma informação sobre as bacias hidrográficas.

Após os passos até aqui mencionados, e pelos comandos, “*ArcToolBox*”, “*Spatial Analyst Tools*”, “*Hidrology*”, “*Basin*” já é possível a visualização das bacias hidrográficas existentes. Figura 50.

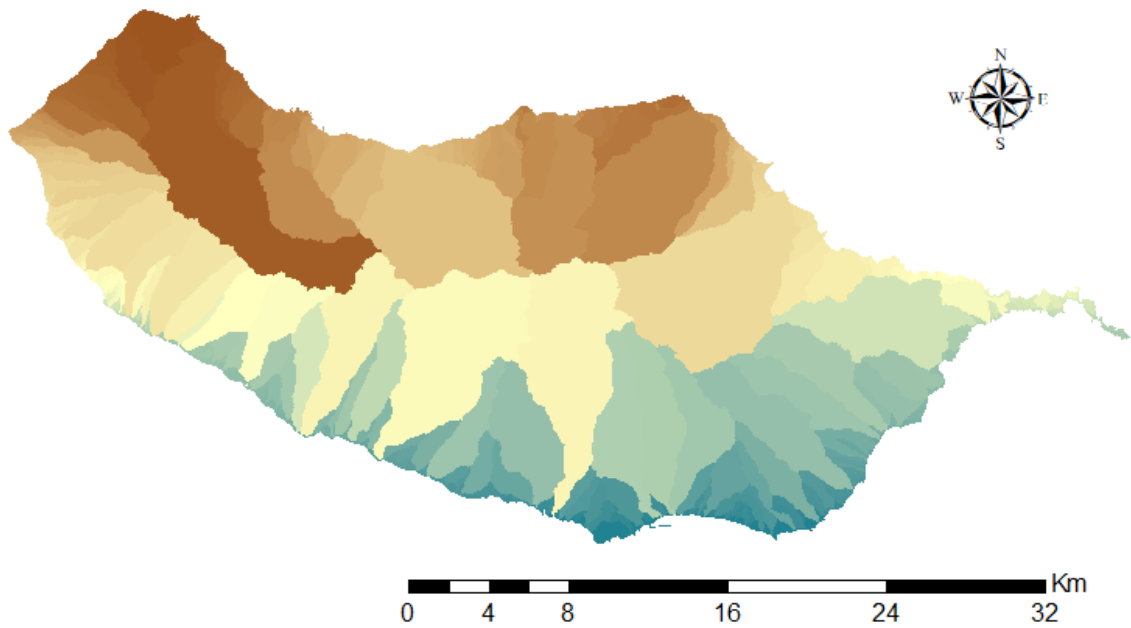


Figura 50 – Bacias hidrográficas (Fonte: Autor, 2022)

Para uma melhor percepção dos resultados a obter, foi necessário a identificação dos cursos de água, através do “ArcToolBox”, “Spatial Analyst Tool”, “Map Algebra”, “Raster Calculator”. Este processo permite o delineamento dos cursos de água, Figura 51, através de uma equação condicional do ficheiro obtido através do “Flow Accumulation”.

$$\text{Con}(\text{"Flow_Acc"} > 500,1)$$

Equação 46

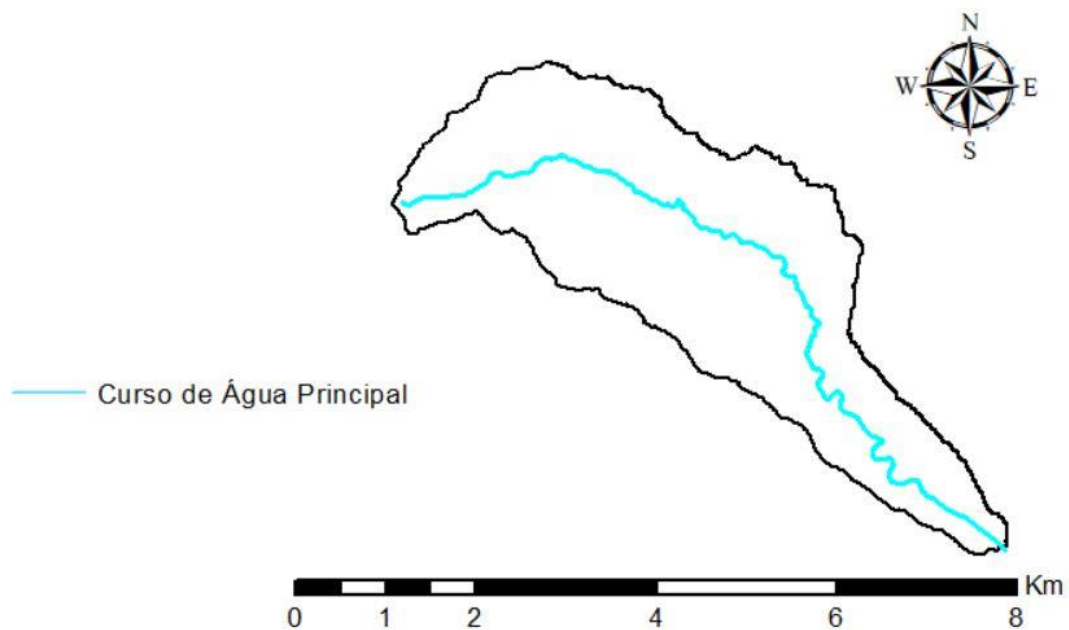


Figura 51 – Cursos de água (Fonte: Autor, 2022)

Findado a delimitação dos cursos de água necessários para o isolamento das bacias hidrográficas em estudo, definiu-se o ponto correspondente da foz, a partir do “*Catalog*”, depois clicando com o botão direito onde estão gradados os ficheiros, “*New*”, “*Shapefile*”, “*Feature File: Point*”, “*Edit*”, “*Projected Coordinate Systems*”, “*UTM*”, “*Oceans*”, “*Madeira 1936 UTM Zone 28N*”. Com este processo realizado, foi criado o ponto de representação das coordenadas da bacia hidrográfica em estudo; para tal, usou-se o comando “*Create Features*”, “*Point*”, e selecionou-se a foz da bacia hidrográfica.

Terminados todos os procedimentos referidos anteriormente, e a partir do “*ArcToolBox*”, “*Spatial Analyst Tools*”, “*Hidrology*”, obteve-se a bacia hidrográfica isolada e assim tornou-se possível a extração dos dados fisiográficos. Figura 52.

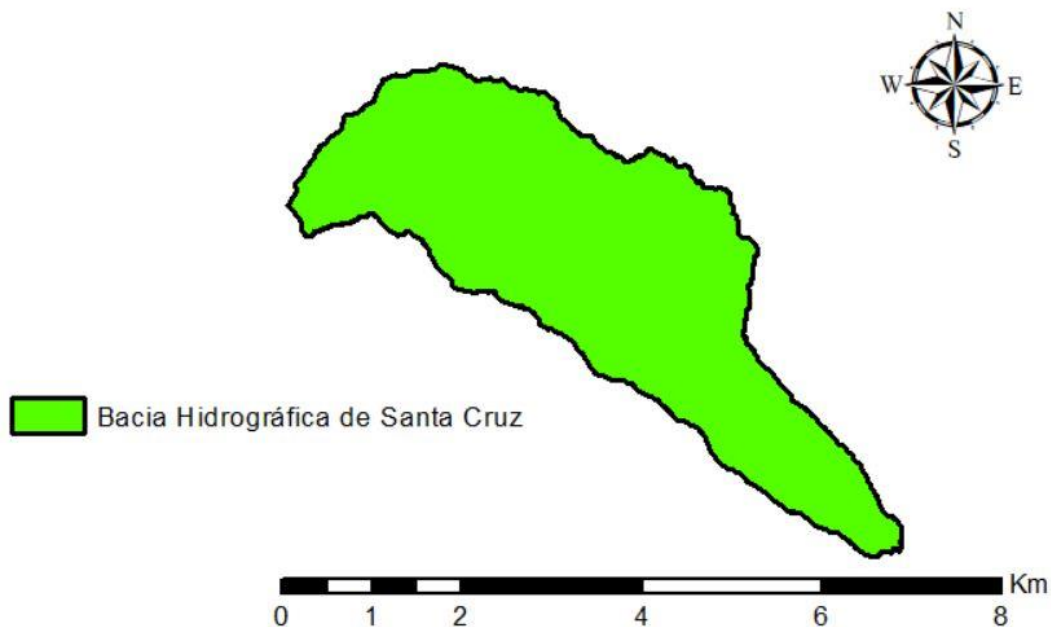


Figura 52 – Bacia hidrográfica de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

Uma vez que todo o processo referido até ao momento encontra-se em formato “*raster*”, ou seja, são apresentadas imagens baseadas em pixéis que perdem nitidez quando ampliadas, teve de ser realizada a conversão destes para um ficheiro vetorial. Para tal utilizou-se o comando “*ArcToolBox*”, “*Conversion Tools*”, “*From Raster*”, “*Raster to Polygon*”. Este processo foi executado em todos os ficheiros obtidos, tornando-os assim admitidos para a extração dos parâmetros de interesse. Terminado o processo anterior utilizou-se o comando “*ArcToolBox*”, “*Spatial Analyst Tools*”, “*Extraction*”, “*Extract by Mask*” para que fosse possível fazer o recorte dos ficheiros “*raster*” com a delimitação da bacia hidrográfica.

Em primeiro lugar, foi retirado os dados para a determinação da área e do perímetro, através do comando “*Open Attribute Table*” do ficheiro “*Watershed Polygon*”, “*Add Field*”, inserir a

denominação “Área” e depois “Float”. Repetiu-se o mesmo processo, mas com a nomeação de “Perímetro”. Após este procedimento foi criada uma tabela com duas colunas os as denominações atribuídas. De seguida em “Calculate Geometry” calculou-se os parâmetros para cada coluna. A partir do ficheiro criado através do comando “Extract by Mask” executado com as delimitações da bacia hidrográfica e as linhas de água delineadas no “Raster Calculator” foi possível obter a classificação dos cursos de águas. Para tal fez-se o seguinte procedimento, “ArcToolBox”, “Spatial Analyst Tools”, “Hidrology”, “Stream Order” e utilizou-se este processo para as diferentes classificações, Shreve e Strahler como consta nas Figuras 53 e 54.

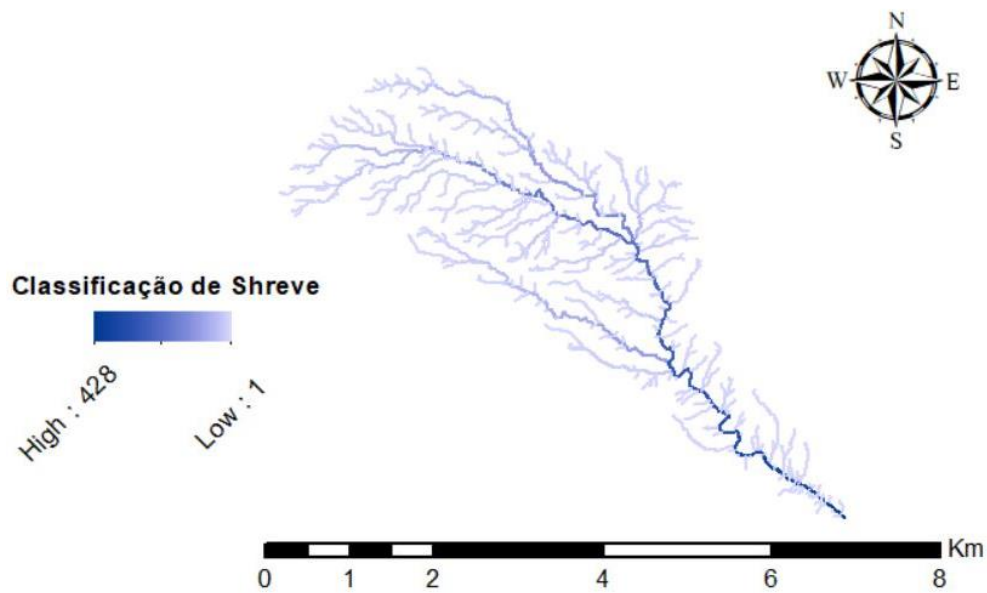


Figura 53 – Classificação de Shreve da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

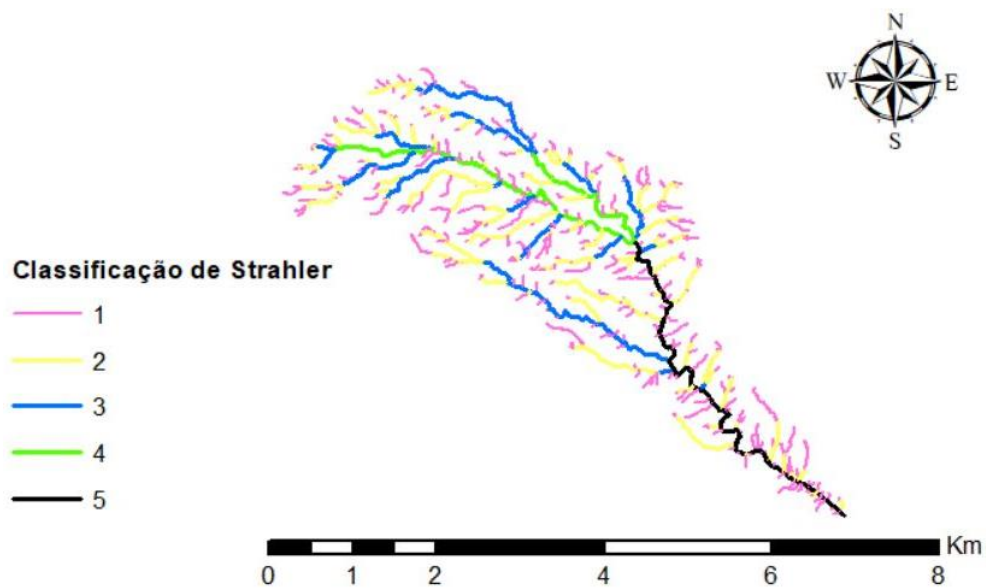


Figura 54 – Classificação de Strahler da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

As Figuras 55 e 56, respetivamente, apresentam os mapas de declive em percentagem e em graus e estes foram conseguidos através da ferramenta “ArcToolBox”, “Spatial Analyst Tools”, “Surface”, “Slope”.

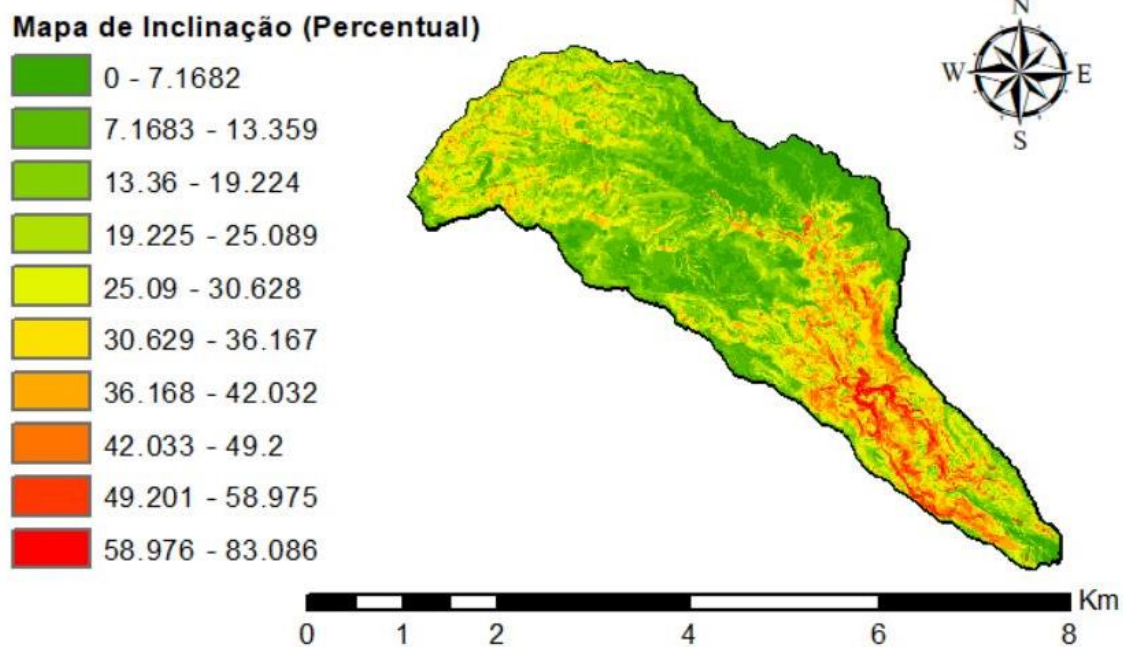


Figura 55 – Mapa de declives em percentagem da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

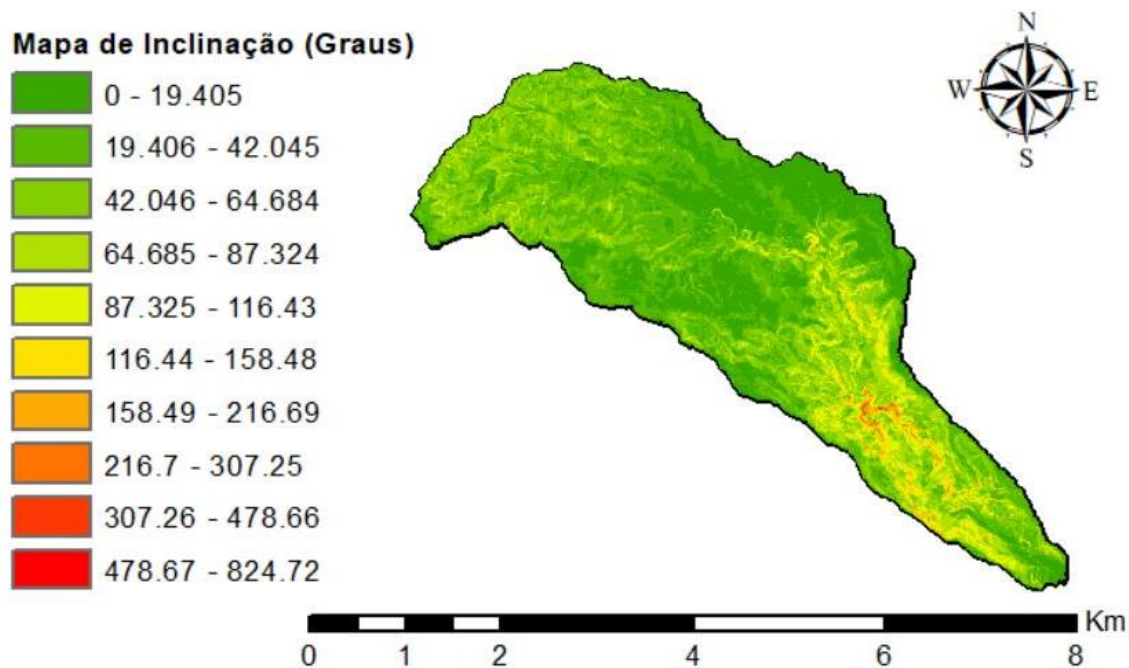


Figura 56 – Mapa de declives em graus da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

A determinação do comprimento total do curso de água foi realizada através da transformação do ficheiro “*Raster*” para o vetorial com o comando, “*Conversion Tools*”, “*From Raster*”, “*Raster to Polyline*”. Numa primeira fase, verificou-se o comprimento do somatório dos cursos de água através do “*Open Attribute Table*” e, de seguida, através das ferramentas de edição, foram extraídos todos os cursos de água afluentes, deixando apenas o curso de água principal. Uma vez terminado o processo anterior, verificou-se novamente o comprimento, mas desta vez apenas do curso de água principal, o que se encontra visível na Figura 57.

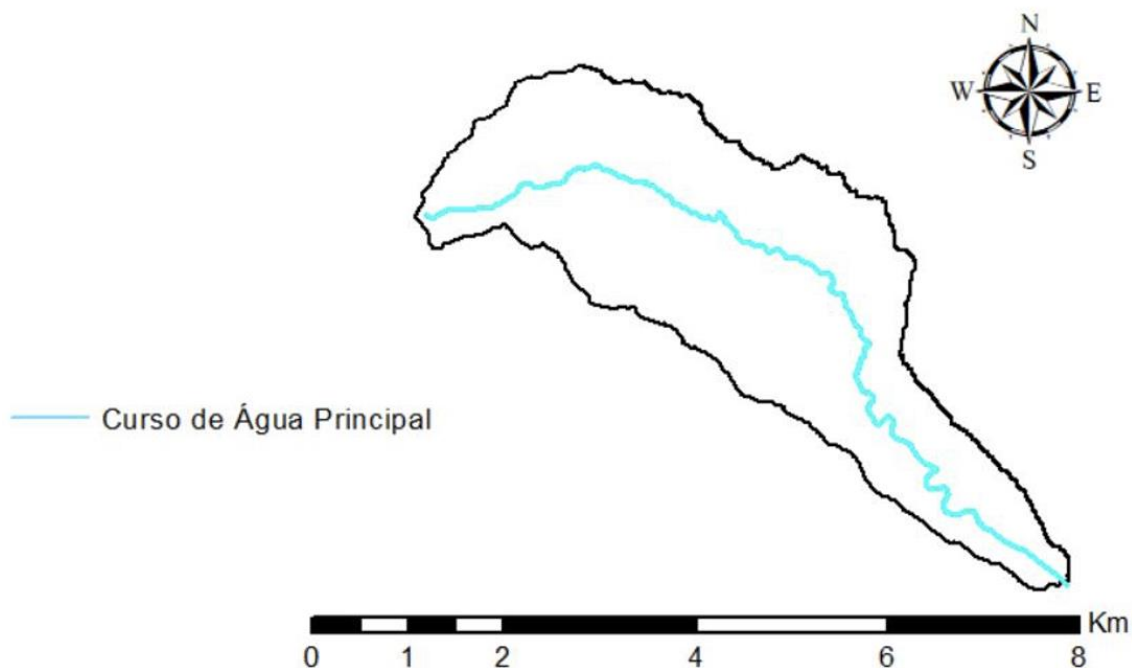


Figura 57 – Curso de água principal da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

Concluído os processos mencionados anteriormente, executou-se a determinação do perfil longitudinal do curso de água principal a partir do comando “*Editor*”, “*Merge*”, unindo assim todas as seções que compõem o curso de água.

Para obtermos os dados graficamente, utilizou-se o comando “*Select Features*”, depois escolheu-se o perfil longitudinal *interpolad*, “*Profile Graph*”, com o botão direito selecionou-se o gráfico elaborado pelo *ArcGIS*, “*Advance Properties*”, “*Data*”. Posteriormente, exportou-se para o *Excel* a relação de comprimento e altitude de modo a representá-la sob a forma de um gráfico, como demonstra a Figura 58.

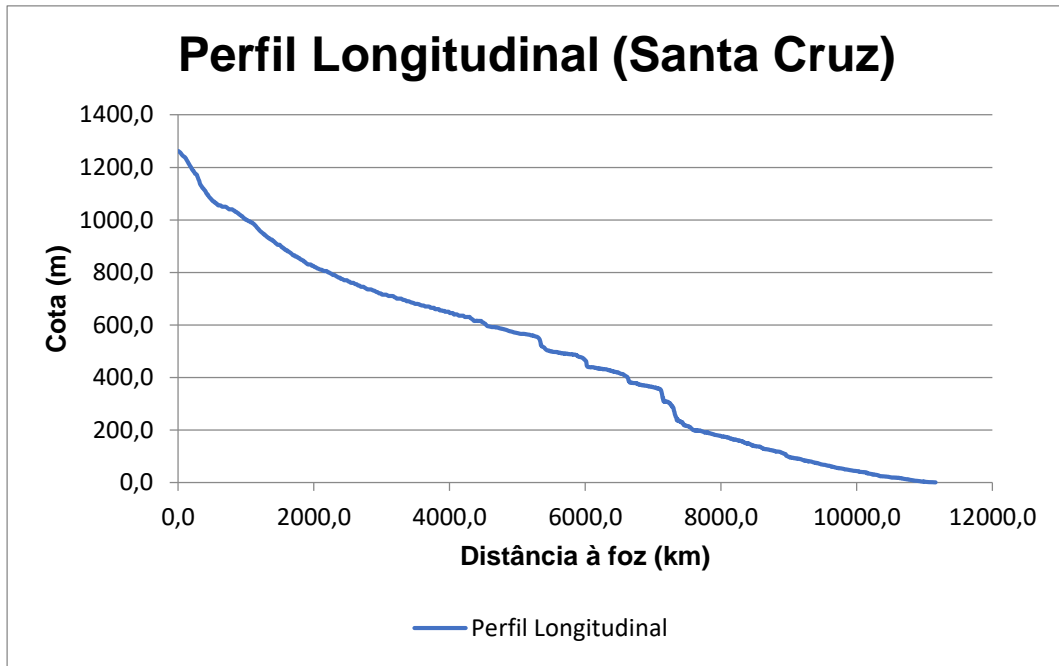


Figura 58 – Perfil longitudinal do curso de água principal de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

Para terminar e obtermos a curva hipsométrica utilizou-se o comando “ArcToolBox”, “Spatial Analyst Tools”, “Reclass”, “Reclassify”, “Classify”, e para tal usou-se 20 classes. Em primeiro, e com o ficheiro anterior elaborou-se uma tabela com os valores de área e curvas de nível transformando esta posteriormente para o Excel através do “Conversion Tools”, “Excel”, “Table to Excel”. Após os dados recolhidos elaborou-se um gráfico onde podemos observar a curva hipsométrica da bacia hidrográfica em estudo. Figura 59.

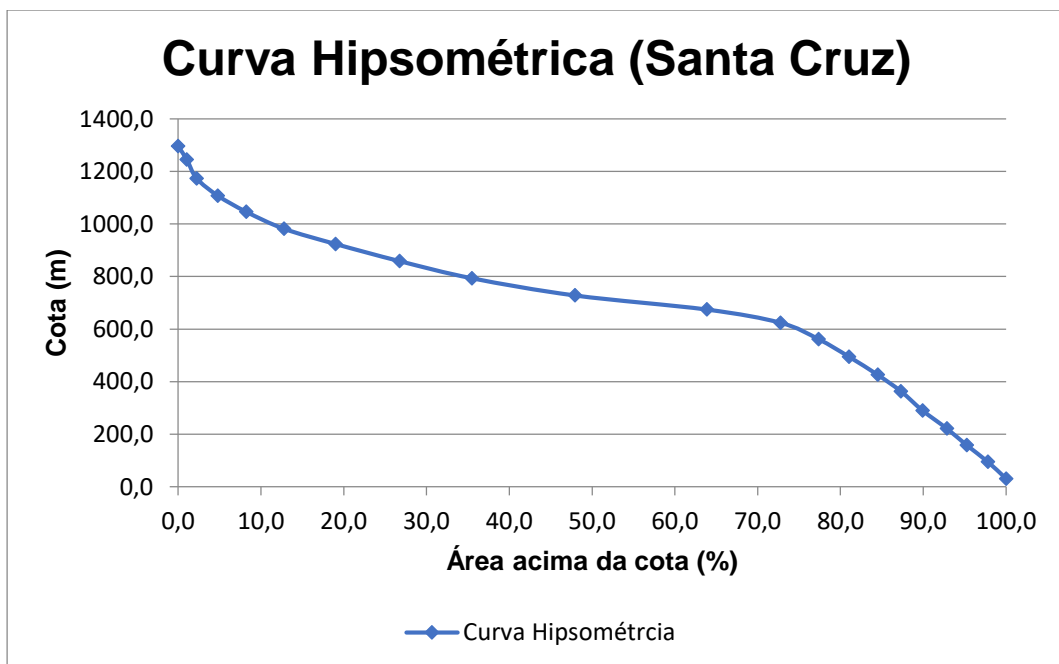


Figura 59 – Curva hipsométrica da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a apresentação dos resultados obtidos, foram consideradas as condições que se encontram abaixo descritas.

1. Para a determinação dos parâmetros hidrológicos e geomorfológicos, utilizou-se um valor médio nas diferentes metodologias ou as metodologias mais utilizadas no global, uma vez que não existe nenhum parâmetro definido;
2. Através da Distribuição de Gumbel, foi possível estimar a precipitação diária máxima anual para cada uma das bacias em estudo, usando o registo udométrico de cada bacia.;
3. Foi utilizado um tempo de retorno de 100 anos, sendo este um valor habitual na implementação de obras hidráulicas;
4. Uma vez que pretendíamos simular o colapso das redes de drenagem existentes, não foram consideradas a capacidade de escoamento destas;
5. Os cursos de água principais das bacias em estudo foram considerados como se possuíssem uma secção constante e retangular, apesar de que estes apresentam em alguns pontos um alargamento;
6. Com a ajuda do *software ArcGIS* mediu-se a largura da secção, para assim efetuar o cálculo da capacidade de escoamento da foz e os resultados obtidos são aproximados de outros casos de estudo da mesma zona. Quanto às alturas estabelecidas, considerou-se a altura do leito do canal até ao nível da estrada;
7. Como mencionado no enquadramento teórico, para as bacias que apresentavam um *Fill Rate* superior a 85% foram tomadas medidas de atenuação de cheias;
8. A implementação do descarregador teve em conta o declive apresentado e a capacidade de escoamento, sendo este colocado próximo da foz, pois é a zona onde existe um maior índice de urbanização;
9. Uma vez que o intuito do presente trabalho era encontrar argumentos hidrológicos e geomorfológicos que esclareçam o porquê das catástrofes ocorridas nas zonas de estudo foi apresentado o estudo como simulação de cheia extrema.

Os parâmetros geomorfológicos obtidos pelo *software ArcGIS* e através das metodologias expostas foram recolhidos e organizados sob o formato de uma tabela resumo – Tabela 6 – que pode ser consultada abaixo.

Resumo Geral	Câmara de Lobos		Santa Cruz	São Vicente	Porto Moniz
Parâmetros utilizados	Socorridos	Vigário	Santa Cruz	São Vicente	Porto Moniz
Área [km ²]	38,741	15,569	12,837	38,252	2,124
Perímetro [km]	47,150	25,290	27,020	37,680	9,640
Índice de compacidade de Gravelius	2,137	1,808	2,127	1,719	1,866
Índice de alongamento	12,274	8,154	12,146	7,199	8,832
Factor de Forma	0,226	0,274	0,209	0,524	0,251
Altitude média [m]	927,205	663,989	670,305	747,056	494,654
Altura média [m]	927,205	663,989	670,305	747,056	494,654
Comprimento do curso de água principal [km]	18,592	9,953	11,159	10,823	3,710
Altitude máxima do curso de água principal [m]	1758,000	1351,540	1262,000	1556,158	727,909
Declive médio do curso de água principal [m/m]	0,095	0,136	0,113	0,144	0,196
Altura equivalente do curso de água principal [m]	1262,000	1065,790	1262,000	830,773	851,696
Declive equivalente [%]	804,766	10,708	11,168	7,686	22,958
Declive 10-85 [m/km]	4,332	129,797	0,109	160,625	0,172
índice de relevo	0,142	0,187	0,166	0,199	273,605
Declive médio da bacia [graus]	40,520	24,673	21,378	34,845	16,466
Declive médio da bacia [%]	100,987	47,796	41,149	79,071	32,140
Hierarquização de Strahler [ordem]	6,000	5,000	5,000	6,000	4,000
Número de cursos de água	3631,000	1098,000	1333,000	2020,000	282,000
Comprimento total dos cursos de água [km]	305,400	112,428	95,936	238,688	23,559
Hierarquização de Shreve [Magnitude]	1471,000	438,000	428,000	708,000	75,000
Relação de bifurcação média	5,062	5,654	5,926	4,492	6,366
Tempo de concentração de Kirpich [h]	1,565	0,841	0,986	0,878	0,342
Tempo de concentração de Témez [h]	4,329	2,514	2,839	2,650	1,107
Tempo de concentração de Giandotti [h]	2,167	1,490	1,500	1,874	0,640
Tempo de concentração de Médio [h]	2,687	1,615	1,775	1,801	0,696
Tempo de resposta da bacia [h]	1,612	0,969	1,065	1,080	0,418
Densidade de drenagem [Dr]	7,883	7,221	7,473	6,240	11,092
Percurso médio sobre o terreno [km]	0,032	0,035	0,033	0,040	0,023
Sinuosidade	1,434	1,330	1,447	1,300	1,346
Densidade hídrica [Dh]	93,725	70,525	103,840	52,808	132,768
Altura máxima da bacia [m]	1860,000	1410,000	1302,000	1715,000	795,810
Comprimento da bacia [m]	13101,641	7543,000	7837,448	8637,100	2908,610
Diretriz [m]	12961,000	7482,000	7712,549	8323,190	2757,013
Caudal a partir da fórmula de Forti [m ³ /s]	297,375	137,924	164,176	419,010	20,694
Caudal a partir da fórmula de Pagliaro [m ³ /s]	872,674	427,683	362,003	864,944	66,862
Caudal a partir da Racional [m ³ /s]	178,082	71,566	172,496	562,028	23,888
Caudal a partir da Giandotti [m ³ /s]	165,103	110,394	242,080	777,576	85,453
Caudal a partir da Mockus [m ³ /s]	176,154	102,765	175,031	570,884	27,051
Caudal a partir da Média [m ³ /s]	337,877	170,067	223,157	638,888	44,790

Tabela 6 – Resumo geral (Fonte; Autor, 2022)

4.2.1. Análise Geométrica

Numa primeira fase para verificar a relevância dos parâmetros na análise final de propensão às cheias, observou-se em cada bacia hidrográfica do estudo os parâmetros necessários.

A área das bacias foi o primeiro parâmetro em análise, pois este tem uma grande importância para a determinação do volume de água escoado para a foz. Estas dividem-se em quatro categorias, Muito Grande >20 km²; Grande >10 km²; Média > 1 km² e Pequena <1 km² (Beck, *et al.*, 2013).

Concelho	Bacia	Área [km]	Dimensão	Propensão
Câmara de Lobos	Ribeira dos Socorridos	28.741	Muito Grande	Muito Alta
	Ribeira do Vigário	15.569	Grande	Alta
Santa Cruz	Santa Cruz	12.837	Grande	Alta
São Vicente	São Vicente	38.252	Muito Grande	Muito Alta
Porto Moniz	Porto Moniz	2.124	Média	Baixa

Tabela 7 – Análise de áreas (Fonte: Autor, 2022)

De salientar que a análise dimensional e de propensão às cheias foi realizada através de uma comparação com todas as bacias em estudo, havendo alguma diferença significativa entre as bacias. As bacias hidrográficas com elevada área de contribuição foram denominadas de “Muito Alta”, apesar de possuírem um índice de urbanização médio, estas apresentam um índice de urbanização grande, mas uma área média. Para finalizar as bacias de baixa propensão ostentam um índice de urbanização muito baixo e uma área reduzida.

Relativamente à forma geométrica, a Tabela 8, apresenta os valores obtidos para a sua classificação, mas esta não depende só dos dados obtidos, como também é classificada quanto ao seu aspeto visual. Como referido na parte teórica, quanto maior o alongamento de uma bacia hidrográfica, menor a propensão às cheias.

Concelho	Bacia	K _c	K _L	K _F	Geometria	Propensão
Câmara de Lobos	Ribeira dos Socorridos	2.136	11.548	0.112	Muito Alongada	Baixa
	Ribeira do Vigário	1.807	7.671	0.157	Pouco Alongada	Alta
Santa Cruz	Santa Cruz	2.127	11.427	0.103	Muito Alongada	Baixa
São Vicente	São Vicente	1.718	6.722	0.327	Pouco Prolongada	Alta
Porto Moniz	Porto Moniz	1.865	8.309	0.154	Pouco Alongada	Alta

Tabela 8 – Análise de geometria (Fonte: Autor, 2022)

4.2.2. Análise da Rede de Drenagem

Como podemos verificar através da Tabela 9, as bacias em estudo apresentam uma elevada densidade de drenagem, o que implica que estas, à partida, terão uma maior tendência para a ocorrência de escoamento superficial e maiores debilidades do ponto de vista do processo de infiltração, fatores que estarão associados a um nível mais elevado de probabilidade de ocorrência de cheias.

Concelho	Bacia	D _D	D _H	Quantificação	Propensão
Câmara de Lobos	Ribeira dos Socorridos	7.883	93.725	Elevada	Alta
	Ribeira do Vigário	7.221	70.525	Elevada	Alta
Santa Cruz	Santa Cruz	7.473	103.840	Elevada	Alta
São Vicente	São Vicente	6.240	52.808	Elevada	Alta
Porto Moniz	Porto Moniz	11.092	132.768	Elevada	Alta

Tabela 9 – Análise da rede de drenagem (Fonte: Autor, 2022)

4.2.3. Caudal de Ponta de Cheia

A partir do tratamento de dados pluviométricos e através da Distribuição de Gumbel, tendo em conta um tempo de retorno de 100 anos, obteve-se a precipitação diária máxima e a respetiva verificação dos caudais de ponta de cheia para cada bacia em estudo.

Concelho	Bacia	Precipitação [mm]	Amostra
Câmara de Lobos	Ribeira dos Socorridos	655.648	20
	Ribeira do Vigário	655.648	20
Santa Cruz	Santa Cruz	314.312	20
São Vicente	São Vicente	347.60	20
Porto Moniz	Porto Moniz	153.364	20

Tabela 10 – Precipitação diária máxima estimada para 100 anos (Fonte: Autor, 2022)

Seguidamente, determinou-se, através da precipitação diária máxima e do tempo de concentração das bacias hidrográficas em observação, a intensidade de precipitação, como demonstra a Tabela 11 abaixo.

Concelho	Bacia	K	Intensidade [mm/h]
Câmara de Lobos	Ribeira dos Socorridos	0.626	33.096
	Ribeira do Vigário	0.528	46.587
Santa Cruz	Santa Cruz	0.546	96.750
São Vicente	São Vicente	0.548	105.788
Porto Moniz	Porto Moniz	0.368	80.975

Tabela 11 – Coeficiente de repartição temporal (K) e intensidade de precipitação (Fonte: Autor, 2022)

Quanto à metodologia de Forti e com base na precipitação diária máxima, atribuiu-se os parâmetros “b” e “c”, sendo estes apresentados na Tabela 12.

Concelho	Bacia	b	C
Câmara de Lobos	Ribeira dos Socorridos	3.250	1.000
	Ribeira do Vigário	3.250	1.000
Santa Cruz	Santa Cruz	3.250	1.000
São Vicente	São Vicente	3.250	1.000
Porto Moniz	Porto Moniz	2.350	0.500

Tabela 12 – Coeficiente (b) e (C) utilizados na fórmula de Forti (Fonte: Autor, 2022)

Na Tabela 13, apresentam-se o coeficiente de escoamento superficial utilizado nas metodologias em causa.

Concelho	Bacia	C	Descrição
Câmara de Lobos	Ribeira dos Socorridos	0,500	Área Residencial – Centro da Cidade
	Ribeira do Vigário	0,750	Área Comercial – Centro da Cidade
Santa Cruz	Santa Cruz	0,750	Área Comercial – Centro da Cidade
São Vicente	São Vicente	0,500	Área Residencial – Centro da Cidade
Porto Moniz	Seixal	0,500	Área Residencial – Centro da Cidade

Tabela 13 – Coeficiente de escoamento superficial utilizado (Fonte: Autor, 2022)

Para terminar, e utilizando o coeficiente de 0,346 retirado da equação de Giandotti, procedeu-se à verificação do *Fill Rate* utilizando a média de todas as metodologias e assim verificar a necessidade de diminuição de cheias. Tabela 14.

Capacidade de Escoamento da Foz					
Largura [m]	12,000	8,000	10,000	40,000	10,000
Altura [m]	4,000	4,000	4,000	3,000	3,000
Coefficiente de Rugosidade das paredes	0,02	0,02	0,02	0,020	0,02
Coefficiente de Rugosidade do leito	0,04	0,04	0,04	0,040	0,04
Coefficiente de Rugosidade médio	0,032	0,030	0,031	0,037	0,033
Inclinação da Foz [m/m]	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
Capacidade da Foz [m³/s]	268,884	169,323	218,946	608,172	140,359
Fill Rate	125,66%	100,44%	101,92%	105%	31,91%
Bacia de Detenção – Método Holandês					
Largura do Descarregador [m]	14,000	8,000	8,000	38,500	-
Altura do Descarregador [m]	4,500	4,000	4,000	3,000	-
Caudal de Saída do Descarregador [m³/s]	248,576	119,040	119,040	372,096	-
Fill Rate Pós-Bacia	92%	70%	54%	61%	-
Volume de Armazenamento [m³]	863835,898	296669,487	665356,654	1729414,612	-
Largura da Bacia de Detenção [m]	12	12	10	40	-
Altura da Bacia de Detenção [m]	4	4	4	3	-
Comprimento da Bacia de Detenção [m]	17996,581	6180,614	16633,916	14411,788	-
% do Comprimento do Canal	97%	62%	149%	133%	-
Bacia de Detenção – Hidrograma Triangular Simplificado					
Largura do Descarregador [m]	14,000	8,000	8,000	38,500	-
Altura do Descarregador [m]	4,500	4,000	4,000	3,000	-
Caudal de Saída do Descarregador [m³/s]	248,576	119,040	119,040	372,096	-
Fill Rate Pós-Bacia	92%	70%	54%	61%	-
Volume de Armazenamento [m³]	228312,1107	89012,8825	310431,3946	722182,2265	-
Largura da Bacia de Detenção [m]	10	12	10	40,000	-
Altura da Bacia de Detenção [m]	3	4	4	3,000	-
Comprimento da Bacia de Detenção [m]	4756,502305	2781,65258	7760,784865	6018,18522	-
% do Comprimento do Canal	26%	28%	70%	56%	-
Alteração do Coeficiente de Rugosidade					
Largura [m]	12,000	8,000	10,000	40,000	-
Altura [m]	4,000	4,000	4,000	3,000	-
Coefficiente de Rugosidade das Paredes	0,012	0,012	0,012	0,012	-
Coefficiente de Rugosidade do Leito	0,03	0,03	0,03	0,03	-
Coefficiente de Rugosidade Médio	0,023	0,021	0,022	0,028	-
Inclinação da Foz	0,01	0,01	0,01	0,01	-
Capacidade da Foz [m³/s]	377,381	241,890	309,620	822,371	-
Fill Rate Pós-Alteração	90%	70%	72%	78%	-

Tabela 14 – Análise e dimensionamento dos dispositivos de mitigação (Fonte: Autor, 2022)

4.2.4. Capacidade de Escoamento da Foz

Com base no *software ArcGIS* mediu-se a secção de escoamento e a inclinação tendo em conta o declive próximo à foz. A determinação da capacidade de escoamento teve como base a equação de Manning-Strickler.

Quanto ao coeficiente de rugosidade, e uma vez que o leito e as paredes dos canais apresentam uma divergência de materiais, usou-se a média ponderada. De forma a garantir uma segurança utilizou-se os seguintes valores de coeficientes de rugosidade:

1. Leito: canais com leito pedregoso e talude vegetado em má condição, onde $n = 0,40$;
2. Paredes: alvenaria de pedra argamassa em boa condição, onde $n = 0,020$.

Uma vez definidos estes parâmetros, determinou-se a capacidade de escoamento da foz para cada bacia hidrográfica, e comparando com o caudal precipitado, conseguimos a informação necessária para a implementação de dispositivos de diminuição de cheias.

4.2.5. Bacia de Detenção – Método Holandês

O dimensionamento da bacia de detenção em estudo, através do método Holandês, foi efetuado somente para as bacias hidrográficas que apresentassem um caudal precipitado superior a 85% da capacidade da foz.

Concelho	Bacia	FR [%] Antes	FR [%] Depois
Câmara de Lobos	Ribeira dos Socorridos	125.66%	97%
	Ribeira do Vigário	100.44%	70%
Santa Cruz	Santa Cruz	101.92%	54%
São Vicente	São Vicente	105%	61%
Porto Moniz	Porto Moniz	31.91%	-

Tabela 15 – Fill Rate através do método holandês (Fonte: Autor, 2022)

Um dos objetivos do presente estudo é causar o menor impacto possível no canal existente e seus arredores, portanto para tal optou-se por manter as dimensões da secção transversal das ribeiras. Logo, o comprimento é a variável dimensional da bacia de detenção para a demonstração dos dados obtidos na Tabela 16.

Concelho	Bacia	Comp. Da Bacia de Detenção [km]	Comp. Do Curso de água [km]
Câmara de Lobos	Ribeira dos Socorridos	17.997	18.592
	Ribeira do Vigário	6.181	9.53
Santa Cruz	Santa Cruz	16.634	11.159
São Vicente	São Vicente	14.412	10.823
Porto Moniz	Porto Moniz	-	3.710

Tabela 16 – Comprimento da bacia de detenção através do método holandês (Fonte: Autor, 2022)

Após a verificação de vários parâmetros teóricos e práticos chegou-se à conclusão de que o método Holandês não é o mais eficiente, uma vez que para a bacia de detenção não seria eficiente pois era necessário um comprimento muito maior ao que o curso de água principal possui. Assim sendo, procedeu-se aos testes de dimensionamento por outro método, HTS.

4.2.6. Bacia de Detenção – Hidrograma Triangular Simplificado

Os valores apresentados na Tabela 17 são iguais para os dois métodos, pois não houve alteração na dimensão dos descarregadores. Por outro lado, o comprimento da bacia de detenção sofreu algumas alterações. Tabela 18.

Concelho	Bacia	FR [%] Antes	FR [%] Depois
Câmara de Lobos	Ribeira dos Socorridos	125.66%	97%
	Ribeira do Vigário	100.44%	70%
Santa Cruz	Santa Cruz	101.92%	54%
São Vicente	São Vicente	105%	61%
Porto Moniz	Porto Moniz	31.91%	-

Tabela 17 – Fill Rate através do método HTS (Fonte: Autor, 2022)

Concelho	Bacia	Comp. Da Bacia de Detenção [km]	Comp. Do Curso de água [km]
Câmara de Lobos	Ribeira dos Socorridos	4.757	18.592
	Ribeira do Vigário	2.782	9.53
Santa Cruz	Santa Cruz	7.761	11.159
São Vicente	São Vicente	6.018	10.823
Porto Moniz	Seixal	-	3.710

Tabela 18 – Comprimento da bacia de detenção através do método HTS (Fonte: Autor, 2022)

Após verificação do método HTS pôde-se constatar que assim como o método Holandês estes apresentam resultados efetivos no controle de caudal. Contudo, os comprimentos para as bacias de detenção são inferiores do que o curso de água principal, fazendo com que este método não seja admissível.

4.2.7. Alteração do Coeficiente de Rugosidade

Uma vez que os métodos anteriormente mencionados não apresentavam a solução pretendida, alterou-se o coeficiente de rugosidade para podermos analisar o escoamento da foz e consequentemente a diminuição de cheias sem a introdução de uma bacia de detenção.

Para tal, utilizou-se os seguintes coeficientes de rugosidade:

1. Paredes: superfícies com argamassa de cimento em boa condição, $n = 0,012$;
2. Leito: canais com leito pedregoso e talude vegetado em boa condição, $n = 0,03$.

As características dos leitos não sofreram muita alteração, apenas seria necessário um controle da vegetação presente para não ser demasiado densa. Quanto às paredes, a manutenção não teria de ser persistente, pois apenas com grandes volumes de águas e de sedimentos de grande porte é que ocorreria desgaste por abrasão. Findada a alteração dos coeficientes, apresentou-se a seguinte Tabela 19.

Concelho	Bacia	FR [%] Antes	FR [%] Depois
Câmara de Lobos	Ribeira dos Socorridos	125.66%	90%
	Ribeira do Vigário	100.44%	70%
Santa Cruz	Santa Cruz	101.92%	72%
São Vicente	São Vicente	105%	78%
Porto Moniz	Porto Moniz	31.91%	-

Tabela 19 – Fill Rate com a alteração do coeficiente de rugosidade (Fonte: Autor, 2022)

Esta medida de alteração de coeficiente de rugosidade apresenta-se como uma medida efetiva para a diminuição dos efeitos das cheias, como demonstra a Tabela 19. De salientar que para um melhor resultado a combinação deste procedimento com o método HTS, seria o mais eficiente diminuindo o comprimento da bacia de detenção através da melhor capacidade de escoamento da foz.

CAPÍTULO V
DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

5.1. DISCUSSÃO

O âmbito do presente trabalho final de conclusão de mestrado de Engenharia Civil, está relacionado com a análise geomorfológica da propensão de cheias em alguns casos em particulares, tendo como referência os conceitos de planeamento urbano e ordenamento territorial.

Uma vez que existe uma vasta bibliografia, pôde-se constatar que as cheias pluviais são um fenómeno que tem tido uma certa intensificação ao longo dos últimos anos, provocando por vezes estragos.

Posteriormente, foram apresentadas medidas estruturais e não estruturais para a diminuição ou prevenção dos impactos gerados por fenómenos naturais, principalmente as cheias, através do conceito de ordenamento territorial e planeamento urbano. O presente estudo sugere que para evitar catástrofes, seja implementado uma bacia de detenção nas ribeiras que apresentam elevado risco de cheias, pois é a medida que exige menos trabalhos oficiais a curto prazo.

Com a ajuda do *software ArcGIS* e os ficheiros MDT fornecidos pelo LREC, foi possível obter os dados referentes às bacias hidrográficas em estudo – i.e. Ribeira dos Socorridos, Ribeira do Vigário, Santa Cruz, Porto Novo, São Vicente, Seixal, Ribeira da Janela. Foi apresentado um sumário dos métodos utilizados e demonstrado através de gráficos e textualmente os resultados obtidos.

Analisando o relatório proposto pela DROTA, pode-se verificar que os dados obtidos estão de acordo com o relatório apresentado por estes.

Quanto às bacias de detenção, a metodologia que melhores resultados apresentou relativamente ao controlo de caudais foi o método Holandês, no entanto não eram aplicáveis de acordo com o princípio de redução de impactos adotados no estudo, pois requer uma alteração na secção transversal do curso de água o que implicaria grandes impactos para as estruturas adjacentes. No entanto, a metodologia HTS é a que mais se adequa a esta situação pois garante na mesma um controlo do caudal, sem necessitar de haver alteração da secção transversal garantir o acordo com o princípio de redução de impactos adotados no estudo.

Para terminar, uma medida recomendada e que apresentou resultados benéficos quando comparado com as metodologias anteriormente mencionadas, foi a de alteração do coeficiente de rugosidade, pois esta requer uma manutenção simples e é de fácil implementação.

5.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez terminado a obtenção de dados é feita a análise dos resultados, foi necessário responder aos objetivos implementados no início do estudo da dissertação, sendo os seguintes:

- Caracterizar e desenvolver ferramentas de modelação numérica unidimensional de escoamentos em linhas de águas, dos concelhos da RAM (Região Autónoma da Madeira) indicados anteriormente. Esta modelação possui análises de sensibilidade a diversos parâmetros, - e.g. dimensões das bacias hidrográficas; densidade de drenagem, coeficiente de rugosidade (Manning-Strickler); índice de urbanização; tempo de concentração; análise probabilística de cheias e entre outros;

Após análise das bacias hidrográficas em estudo, pôde-se constatar que a caracterização destas apresentam resultados de acordo com as bibliografias fiáveis utilizadas, isto é, os parâmetros geomorfológicos e hidrológicos calculados são similares ao de referência. Estes parâmetros foram executados através de dados retirados do *software ArcGIS* e aplicados às diferentes metodologias abordadas, transformando-os em valores apresentados em folhas de cálculo pelo *software Microsoft Excel*.

Para uma melhor análise a longo prazo se não ocorrer medidas de diminuição de cheias, utilizou-se condições desfavoráveis para a determinação da capacidade de escoamento.

- Verificação dos parâmetros calculados para garantir a suscetibilidade às cheias das bacias hidrográficas estudadas;

Com base nos relatórios de risco elaborados pela DROTA, e analisando os parâmetros de suscetibilidade às cheias verificou-se que estes apresentam dados coerentes. As bacias que possuem valores de *Fill Rate* superiores ao limite recomendado, nestas obriga a necessidade de ser executado um dimensionamento da bacia hidrográfica e do descarregador para obtermos controle do caudal a jusante destas.

Por outro lado, as que o *Fill Rate* é inferior ao limite recomendado, estas garantem uma suscetibilidade às cheias, logo não há necessidade de adotar medidas de diminuição de cheias até à presente data. No futuro, dependendo do desenvolvimento urbano, será necessário efetuar outro estudo.

- Dimensionar uma bacia de detenção para os canais que revelem uma insuficiente capacidade de escoamento na foz;

Para o dimensionamento de uma bacia de detenção utilizamos duas metodologias: o método Holandês e o método HTS. Estes foram executados com base no caudal precipitado e o caudal de saída do descarregador, utilizando como variável o tempo.

O método Holandês, apresenta como vantagem a facilidade de aplicação, pois são utilizados três parâmetros: o caudal precipitado, caudal de saída do descarregador e tempo de concentração da

bacia hidrográfica. O que torna este método não aplicável para os casos práticos em estudo é o sobredimensionamento.

O método HTS é mais complexo que o método Holandês pois não apresenta grandes problemas caso seja estabelecido um tempo de base do hidrograma como duas vezes o valor do tempo de concentração. Este pode-se considerar como aplicável.

- Análise dos modelos propostos, tendo como base as diretrizes de planeamento urbano vigentes na RAM, atualmente;

A RAM apresenta medidas para a artificialização dos cursos de água presentes dentro do perímetro urbano, de maneira a conter os caudais extremos, ou seja, as bacias de retenção estão enquadradas como medidas de planeamento urbano. Para facilitar o planeamento urbano, a implementação de uma bacia de retenção facilitaria, sendo necessário a construção de um descarregador e a alteração de parte do curso de água até que este atinja o comprimento dimensionado.

- Análise do impacto territorial pelo modelo proposto.

Através da verificação dos modelos propostos e a não alteração das dimensões da secção transversal do curso de água, foi executada a análise do impacto territorial. Caso não se satisfaça, é necessário o alargamento desta secção de escoamento, o que levaria a modificação das estruturas urbanas adjacentes.

5.3. TRABALHOS A REALIZAR

Uma vez que não é realista considerar a possibilidade de investigar de forma mais aprofundada e contínua todos os tópicos abordados ao longo do presente estudo, é necessário ressaltar a necessidade do surgimento de novos estudos neste âmbito, mais concretamente estudos cujo foco esteja voltado para:

1. Análise mais aprofundada do processo de infiltração, tendo em vista, sobretudo, os solos que constituem o curso de água principal da bacia hidrográfica;
2. Investigação do estado de conservação das paredes dos canais artificiais;
3. Avaliação dos recursos e do tempo necessários para a realização de eventuais obras de manutenção das paredes desses mesmos canais artificiais e para a implementação de medidas de mitigação dos impactos das cheias;

4. Avaliação e aperfeiçoamento do sistema hidráulico urbano, principalmente do ponto de vista da sua capacidade de escoamento – de modo a contornar uma eventual necessidade por uma bacia de retenção de grandes dimensões;
5. Estudo dos impactos do desenvolvimento urbano num eventual aumento do caudal em alguns dos concelhos estudados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- INE. (s.d.). Obtido de Weather Spark: <https://pt.weatherspark.com/y/150434/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Madeira-Portugal-durante-o-ano>
- (2021). Obtido de INE: https://www.ine.pt/scripts/db_censos_2021.html
- Almeida, A. (2016). Modelling tourism demand in Madeira since 1946: and historical overview based on a time series approach. *Journal of Spatial and Organizational Dynamics*, 4, 145-156.
- Almeida, A. B. (2001). *Curso sobre Operação e Segurança de Barragens. Capítulo 7. Emergências e Gestão do Risco*. Lisboa.
- Andrade, F. (2014). *Hidrologia. Geração de escoamento e análise de hidrograma*. Curitiba: UTFPR.
- APA. (s.d.). *Inundações*. Obtido de Agência Portuguesa do Ambiente (APA): <https://apambiente.pt/prevencao-e-gestao-de-riscos/inundacoes>
- Asiedu, J. B. (2020). REVIEWING THE ARGUMENT ON FLOODS IN URBAN AREAS: A LOOK AT THE CAUSES. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, 15(1), 24-41.
- Baioni, D. (2011). Human activity and damaging landslides and floods on Madeira Island. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3035-3046.
- Beck, H. E., Bruijnzeel, L., van Dijk, A., McVicar, T., Scatena, F., & Schellekens, J. (2013). The impact of forest regeneration on streamflow in 12 mesoscale humid tropical catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 2613-2635.
- C. M. Porto. (s.d.). *O que é o PDM?* Obtido de Câmara Municipal do Porto: <https://www.cm-porto.pt/pdm/o-que-e-o-pdm#:~:text=O%20Plano%20Diretor%20Municipal%20%2D%20PDM,elabora%C3%A7%C3%A3o%20dos%20demais%20planos%20municipais>.
- Camacho, R. F. (2015). *Caracterização, simulação (à escala) e modelação do escoamento em canais artificiais: aplicação a caso de estudo*. Dissertação submetida para o grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade da Madeira. Funchal: Universidade da Madeira.
- Campana, N. A., Bernardes, R. S., & Junior, J. A. (2007). Controle qualitativo e quantitativo do escoamento pluvial urbano com bacias de retenção. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 2(3), 98-111.

- de Oliveira, R. P., Almeida, A. P., Pereira, M. J., Portela, M. M., Coutinho, M. A., Ferreira, R. M., & Lopes, S. (2011). Avaliação do risco de aluviões na Ilha da Madeira. *10º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (10º SILUSBA)*. Porto das Galinhas.
- DGT. (s.d.). *Atividades >> Ordenamento do Território >> Sistema de Gestão Territorial*. Obtido de DGT: <https://www.dgterritorio.gov.pt/ordenamento/sgt?language=en>
- DREM. (2020). *Série retrospectiva da informação meteorológica (1976-2019)*. DREM.
- DREM. (2021). *Madeira em Números 2020 - Uma visão abrangente da realidade da Região Autónoma da Madeira durante o ano de 2020*. Funchal: DREM.
- DREM. (2021). *Resultados Provisórios dos CENSOS 2021*. DREM.
- DREM. (2022). *Análise dos principais resultados definitivos - Ano de 2021*. DREM.
- DREM. (11 de maio de 2022). *Mercado de Trabalho » Inquérito ao emprego » Séries longas*. Obtido de DREM: <https://estatistica.madeira.gov.pt/download-now/social/merctrab-pt/merctrab-ie-pt/merctrab-ie-serie-pt/merctrab-ie-series-longas.html>
- EPAL. (s.d.). *Ciclos da Água*. Obtido de EPAL: <https://www.epal.pt/EPAL/menu/epal/comunica%C3%A7%C3%A3o-ambiental/ciclo-da-%C3%A1gua>
- Estúdio Conejo. (2014). *Geografia*. Zênite.
- Farzanegan, M. R., Gholipour, H. F., Feizi, M., Nunkoo, R., & Andargoli, A. E. (2020). International Tourism and Outbreak of Coronavirus (COVID-19): A Cross-Country Analysis. *Journal of Travel Research*, 60(3), 687-692.
- FEMA. (7 de julho de 2020). *Flood*. Obtido de FEMA: <https://www.fema.gov/glossary/flood#:~:text=A%20general%20and%20temporary%20condition,inland%20or%20tidal%20waters%3B%20or>
- Fundação Francisco Manuel dos Santos. (01 de abril de 2014). *O que são os planos especiais de ordenamento do território, e qual a sua abrangência?* Obtido de Fundação Francisco Manuel dos Santos: <https://www.direitosedeveres.pt/q/o-cidadao-o-estado-e-as-instituicoes-internacionais/urbanismo-e-edificacoes/o-que-sao-os-planos-especiais-de-ordenamento-do-territorio-e-qual-a-sua-abrangencia#:~:text=Os%20planos%20especiais%20de%20ordenamento%20do%20ter>

- Garcês, S., Pocinho, M., & de Jesus, S. N. (2020). The Best Tourism Island Destination in the World and Meaningful Experiences: A Systematic Literature Review. *Revista Portuguesa de Estudos Regionais*, 23-34.
- Geldmacher, J., Hoernle, K., Bogaard, P. v., Duggen, S., & Werner, R. (2005). New 40Ar / 39Ar age and geochemical data from seamounts in the Canary and Madeira volcanic provinces: Support for the mantle plume hypothesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 237, 85-101.
- Geldmacher, J., Hoernle, K., Klügel, A., van den Bogaard, P., & Duggen, S. (2006). A geochemical transect across a heterogeneous mantle upwelling: Implications for the evolution of the Madeira hotspot in space and time. *Lithos*, 90(1), 131-144.
- Gonçalves, L. B. (junho de 2020). *Análise Teórico-prática do Risco de Cheias no Arquipélago da Madeira - O caso de estudo dos concelhos do Funchal, Machico, Ribeira Brava e São Vicente*. Dissertação submetida para o grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade da Madeira. Funchal: Universidade da Madeira.
- Hipólito, J., & Vaz, Á. (2011). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. Lisboa: IST.
- IFCN. (14 de julho de 2021). *Séries de Vegetação*. Obtido de Instituto das Florestas e Conservação da Natureza IP-RAM: <https://ifcn.madeira.gov.pt/biodiversidade/fauna-e-flora/flora/serie-de-vegetacao.html#:~:text=A%20vegeta%C3%A7%C3%A3o%20na%20Madeira%20enquadra,vegeta%C3%A7%C3%A3o%20associada%20%C3%A0%20presen%C3%A7a%20humana>.
- INE. (2020). *Contas Regionais - Base 2016: 2018 e 2019 Provisório*. INE.
- INE. (2021). *ESTATÍSTICAS DO TURISMO 2021: RECUPERAÇÃO DA ATIVIDADE TURÍSTICA, MAS AINDA ABAIXO DOS NÍVEIS DE 2019*. INE.
- Inocêncio, V. A. (2015). *O Ordenamento do Território e o Sistema de Ordenamento no Território Português: Do Planeamento dos Recursos Hídricos ao Ordenamento e Gestão dos Recursos Aquícolas em Águas Interiores*. Dissertação de Mestrado em Direito, Especialidade em Ciências Jurídico-Forenses, apresentada à Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra. Coimbra: Universidade de Coimbra.
- ISEL. (2015). *Hidrologia*. Lisboa: ISEL.

- Jorge, A., da Silva, A., Anaya, L., do Nascimento, J., & Santos, L. (2015). Free computational approach for Strahler's classification in Brazilian hydrographies related to natural disasters. *Modelling in Science Education and Learning*, 8, 23-34.
- Klügel, A., & Klein, F. (2006). Complex magma storage and ascent at embryonic submarine volcanoes from the Madeira Archipelago. *Geology*, 34(5), 337-340.
- Krastel, S., & Schmincke, H.-U. (2002). Crustal structure of northern Gran Canaria, Canary Islands, deduced from active seismic tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115, 153-177.
- Larara, D. (2020). *Bacias Hidrográficas, Padrões de Drenagem e Delimitação de Bacias*. Obtido de <https://slideplayer.com.br/slide/293923/>
- Lousada, S., & Camacho, R. (2018). *Hidrologia, Recursos Hídricos e Ambiente: aulas teóricas* (Vol. I). (U. d. Madeira, Ed.)
- Lousada, S., Cabezas, J., Castanho, R. A., & Gómez, J. M. (2021). Hydraulic Planning in Insular Urban Territories: The Case of Madeira Island—Ribeira Brava. *Water*, 14(1).
- Mafra, F., & da Silva, J. A. (2004). *Planeamento e gestão do território*. Porto: SPI - Sociedade Portuguesa de Inovação.
- Marcuzzo, F. F., Romero, V., Cardoso, M. R., & Filho, R. d. (2011). Hipsometria da sub-bacia 17 na região hidrográfica do rio Amazonas. *XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2011*. Cuiabá - MT: SBEA.
- Marques, J. M. (2014). *Caracterização hidráulica, hidrológica e do transporte sólido das principais linhas de água (ribeiras) do concelho de Câmara de Lobos - ilha da Madeira*. Lisboa: ISEL - Área Departamental de Engenharia Civil.
- Martelli, G. V. (2012). *Monitoramento da flutuação dos níveis de água em aquíferos freáticos para avaliação do potencial de recarga em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani em Cacequi - RS*. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Santa Maria - RS: Universidade Federal de Santa Maria.
- Mata, J., Fonseca, P. E., Prada, S., Rodrigues, D., Martins, S., Ramalho, R., . . . Matias, M. J. (2013). O arquipélago da Madeira. Em R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha, & J. C. Kullberg (Edits.), *Geologia de Portugal Volume II - Geologia Meso-cenozóica de Portugal* (Escolar Editora ed., Vol. II, pp. 691-746).

- Mata-Lima, H. (2010). *Apontamentos de Hidráulica*. Funchal: UMa.
- Mcloughlin, J. B. (1970). *Urban and Regional Planning. A systems approach*. Londres: Farber Editions.
- Merz, B., Blöschl, G., Vorogushyn, S., Dottori, F., Aerts, J. C., Bates, P., . . . Macdonald, E. (2021). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 592-609.
- Miranda, J. M., & Baptista, M. A. (2006). *Riscos Naturais*. Lisboa: Instituto Dom Luiz.
- Moura, A. (2019). *Canais Artificiais e a sua Influência em Processos de Planeamento Urbano e Ordenamento Territorial*. Dissertação submetida para o grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade da Madeira. Funchal: Universidade da Madeira.
- Murillo-Bermúdez, L. F., Martim, A. L., de Abreu, A. E., Fais, L. M., & Filho, J. G. (2022). Estimation of the time of concentration from morphometric and hydrological monitoring parameters in São Paulo state watersheds. *Ciência e Natura*, 44.
- Nahettini, M. (2012). *Introdução à Hidrologia Aplicada*. Belo Horizonte: UFMG.
- National Geographic. (20 de maio de 2022). *Storm Surge*. Obtido de National Geographic: <https://education.nationalgeographic.org/resource/storm-surge>
- Navarro. (2017). Ordenamento do Território e Urbanismo - Teórica 2 2017/2018.
- North Carolina Division of Water Quality. (2005). *Identification Methods for the Origins of Intermittent and Perennial streams*. Raleigh, NC: North Carolina Department of Environment and Natural Resources, Division of Water Quality.
- Novo, E. M., Renó, V. F., Barbosa, C. C., & Rudorff, C. d. (2011). Integração de informações de multi-sensores para estimar alterações da rugosidade hidráulica da várzea do Baixo Amazonas em função da remoção da floresta inundável. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*. Curitiba, PR, Brasil: INPE.
- Papudo, R. M. (2007). *Indicadores de ordenamento do território : uma proposta metodológica*. Tese de mestrado em Geografia apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, 2008. Lisboa: Universidade de Lisboa.
- PNPOT. (s.d.). O PNPOT. Obtido de PNPOT | Território Portugal: <https://pnpot.dgterritorio.gov.pt/pnpot>

- PORDATA. (20 de junho de 2022). *Densidade populacional*. Obtido de PORDATA: <https://www.pordata.pt/Municipios/Densidade+populacional-452>
- Pour, S. H., Wahab, A. K., Shahid, S., Asaduzzaman, M., & Dewan, A. (2020). Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges. *Sustainable Cities and Society*, 62.
- Prada, S. (2000). *Geologia e Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira*. Funchal.
- Prada, S. (2008). O Potencial Hídrico do Nevoeiro na ilha da Madeira. Em A. R. Lorenzo, *Concepção e acompanhamento de estações de recolha de água: captura de água atmosférica* (pp. 231-241). Santa Cruz de Tenerife: Fundación Global Nature.
- Prada, S., Gaspar, A., de Sequeira, M. M., Nunes, A., Figueira, C., & Cruz, J. V. (2005). Disponibilidades Hídricas da Ilha da Madeira. Em I. T. Canarias (Ed.), *AQUAMAC - Técnicas e métodos para a gestão sustentável da água na Macaronésia* (pp. 261-294). Instituto Tecnológico de Canarias, Cabildo de Lanzarote, Consejo Insular de Aguas de Lanzarote.
- ProCiv. (15 de junho de 2016). *Cheias*. Obtido de ProCiv: <http://www.proxiv.pt/pt-pt/RISCOSPREV/RISCOSNAT/CHEIAS/Paginas/default.aspx>
- Quintal, R. (16 de setembro de 1999). Aluviões da Madeira. Séculos XIX e XX. *Territorium*, pp. 31-48.
- Ramos, C. (2013). Perigos naturais devidos a causas meteorológicas: o caso das cheias e inundações. *e-LP Engineering and Technology Journal*, 4, 11-16.
- Rennó, C., & Soares, J. (s.d.). Conceitos básicos de modelagem hidrológica.
- Rico, C. (21 de maio de 2020). *Colapso de duas barragens provoca cheias históricas nos EUA. Milhares de pessoas retiradas*. Obtido de TSF: <https://www.tsf.pt/mundo/colapso-de-duas-barragens-provoca-cheias-historicas-nos-eua-milhares-de-pessoas-retiradas-12221199.html>
- Rodrigues, C., Moreira, M., & Guimarães, R. (2011). *Apontamentos para as aulas de hidrologia*. Évora: Universidade de Évora.

- Rodrigues, J. R. (2018). *Ordenamento territorial e urbano da ilha da Madeira: relevância do Funchal neste processo*. Lisboa: Centro de Estudos de Arquitectura, Cidade e Território da Universidade Autónoma de Lisboa.
- Rosenthal, Z., Gahan, M. B., & Timsit, A. (22 de agosto de 2022). *At least one dead after Dallas area hit by 1-in-1,000-year flood*. Obtido de The Washington Post: <https://www.washingtonpost.com/nation/2022/08/22/dallas-texas-flash-floods/>
- Sales, L., Ferreira, M., de Oliveira, M., & Curi, N. (1999). *Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo*. Lavras: UFLA.
- Santana, L. R. (2018). *Contribuição à classificação de pequenas bacias hidrográficas em função da área de drenagem*. Belém: UFPA.
- Sepúlveda, S. M. (2011). *Avaliação da Precipitação Extrema na Ilha da Madeira*. Lisboa: Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- SIC Notícias. (2 de fevereiro de 2022). *Sobe para 24 número de mortos em inundações no Equador*. Obtido de SIC Notícias: <https://sicnoticias.pt/mundo/2022-02-02-sobe-para-24-numero-de-mortos-em-inundacoes-no-equador>
- Teixeira, D., & Ribeiro, J. C. (2019). Residents' perceptions of the tourism impacts on a mature destination: the case of Madeira Island. *Journal of Hospitality and Tourism Management*, 149-167.
- Turismo de Portugal. (2017). *Estratégia Turismo 2027*.

Referências Bibliográficas

ANEXOS

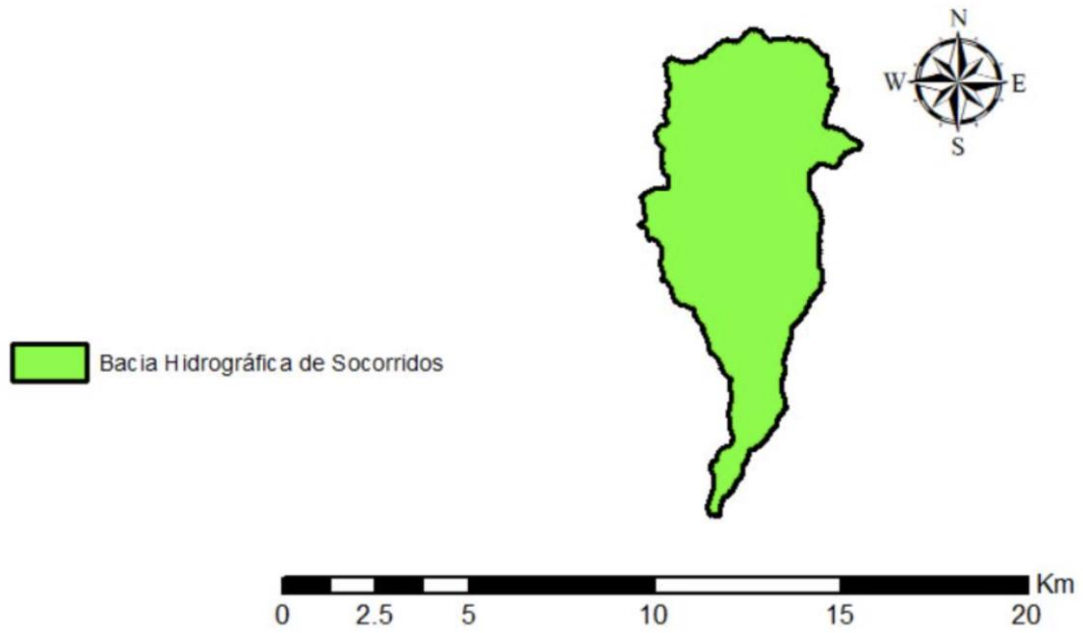


Figura – A 1 – Bacia hidrográfica da Ribeira dos Socorridos (Fonte: Autor, 2022)

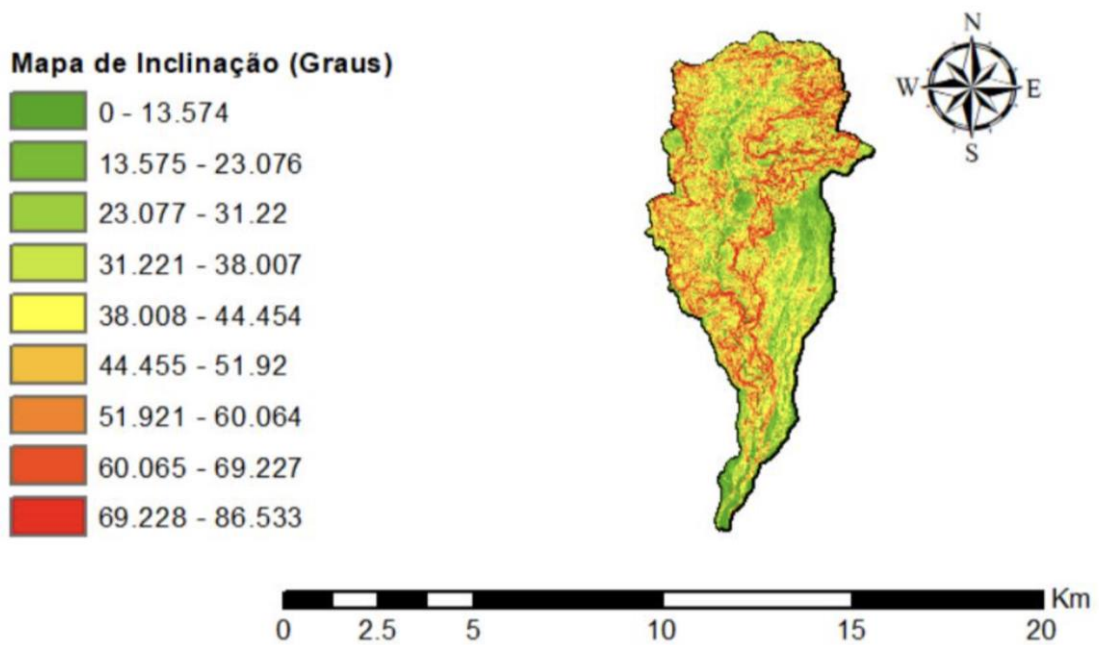


Figura – A 2 – Mapa de inclinação, em graus, da bacia da Ribeira dos Socorridos (Fonte: Autor, 2022)

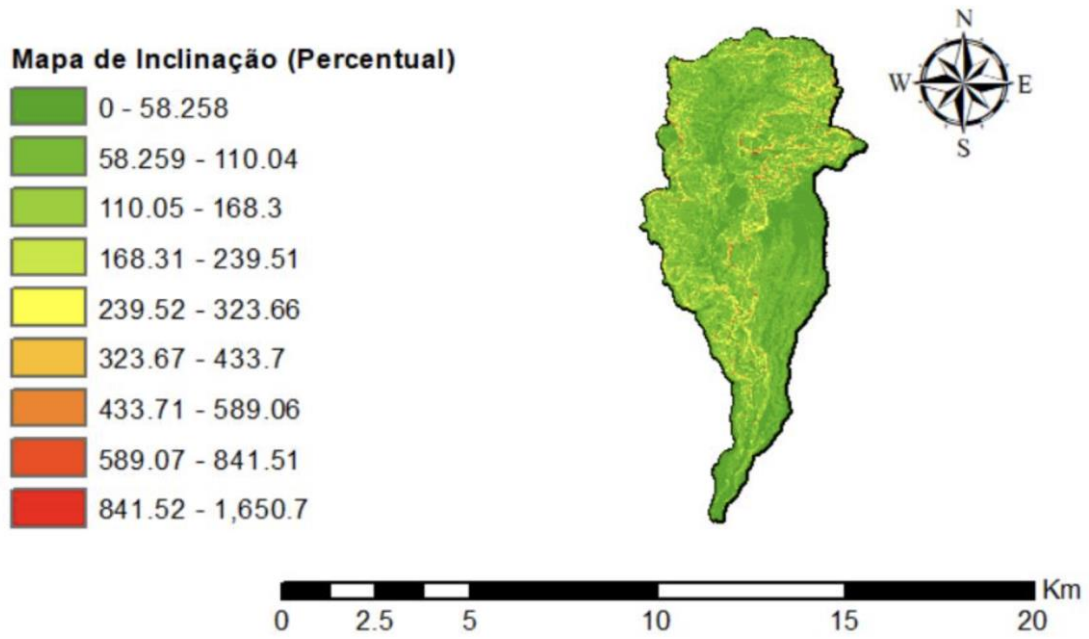


Figura – A 3 – Mapa de inclinação percentual da bacia da Ribeira dos Socorridos (Fonte: Autor, 2022)

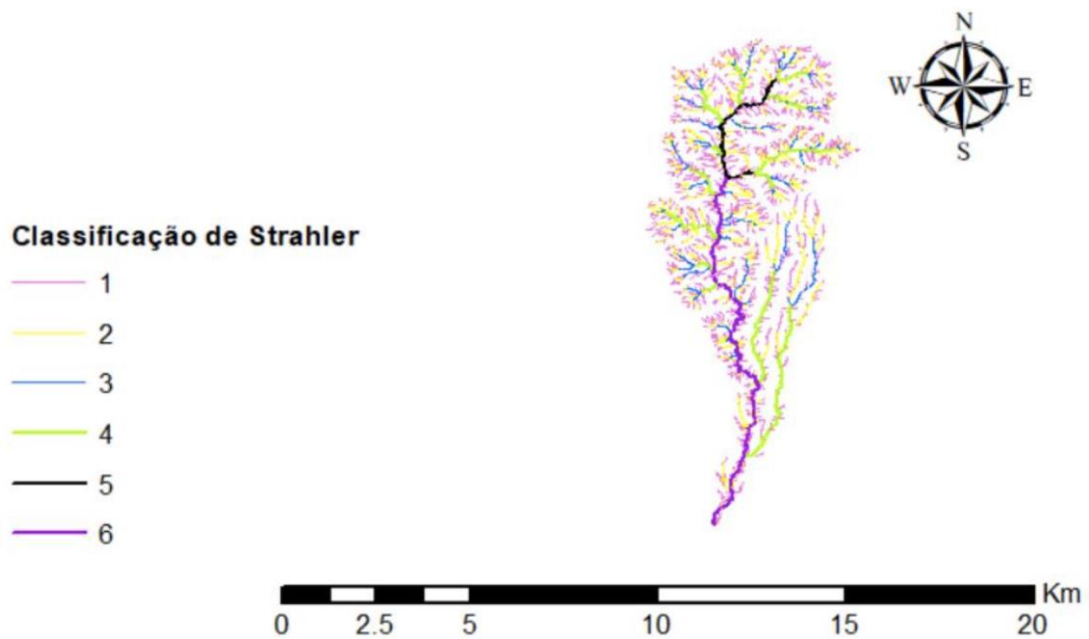


Figura – A 4 – Classificação de Strahler da bacia da Ribeira dos Socorridos (Fonte: Autor, 2022)

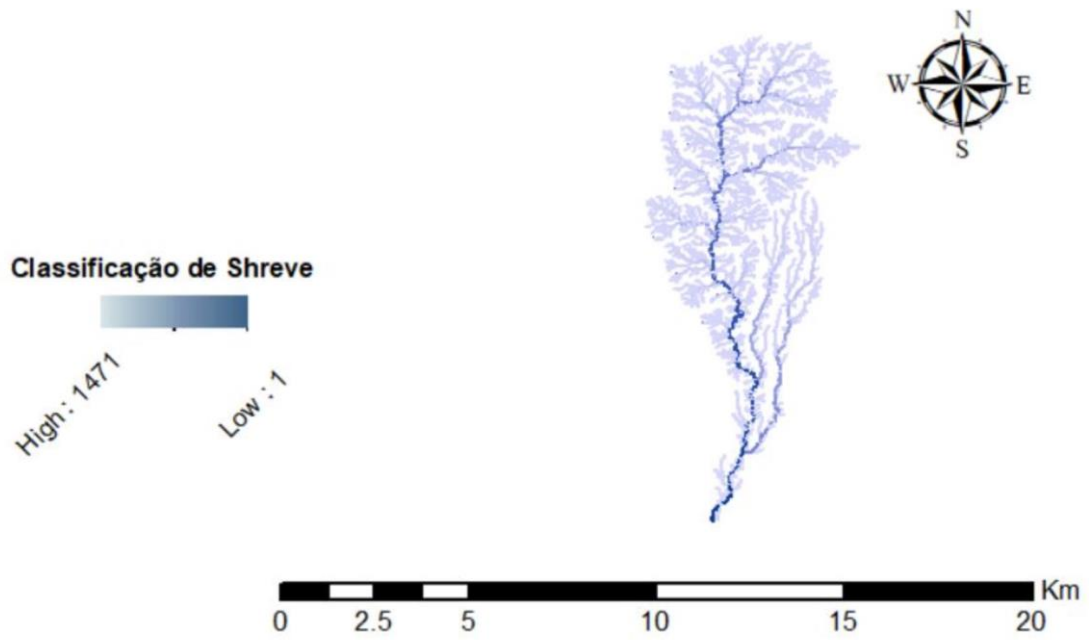


Figura – A 5 – Classificação de Shreve da bacia da Ribeira dos Socorridos (Fonte: Autor, 2022)

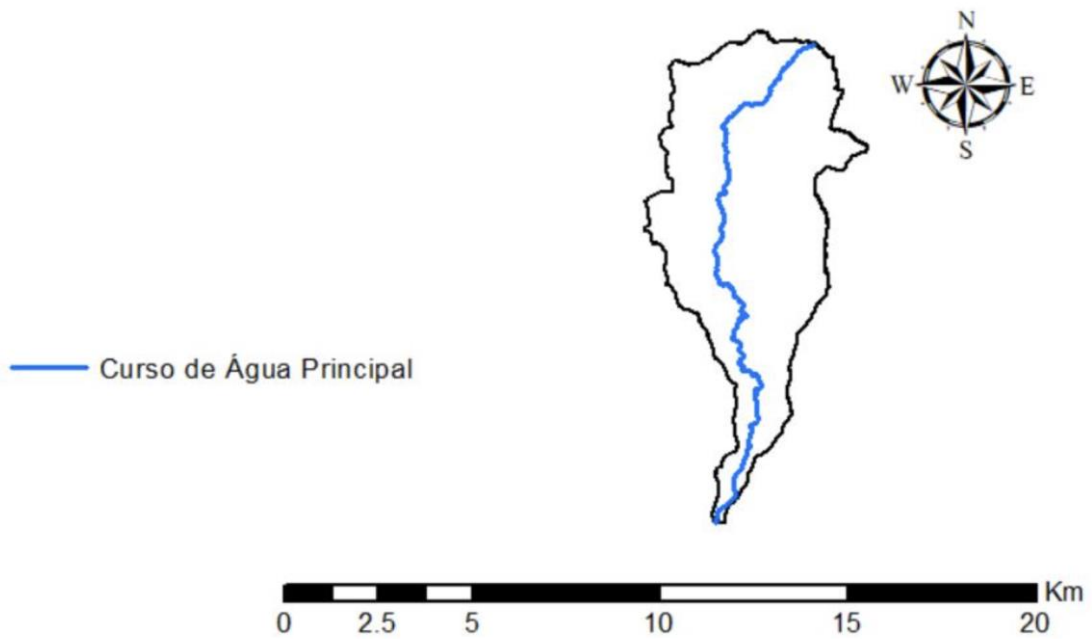


Figura – A 6 – Curso de água principal da bacia da Ribeira dos Socorridos (Fonte: Autor, 2022)

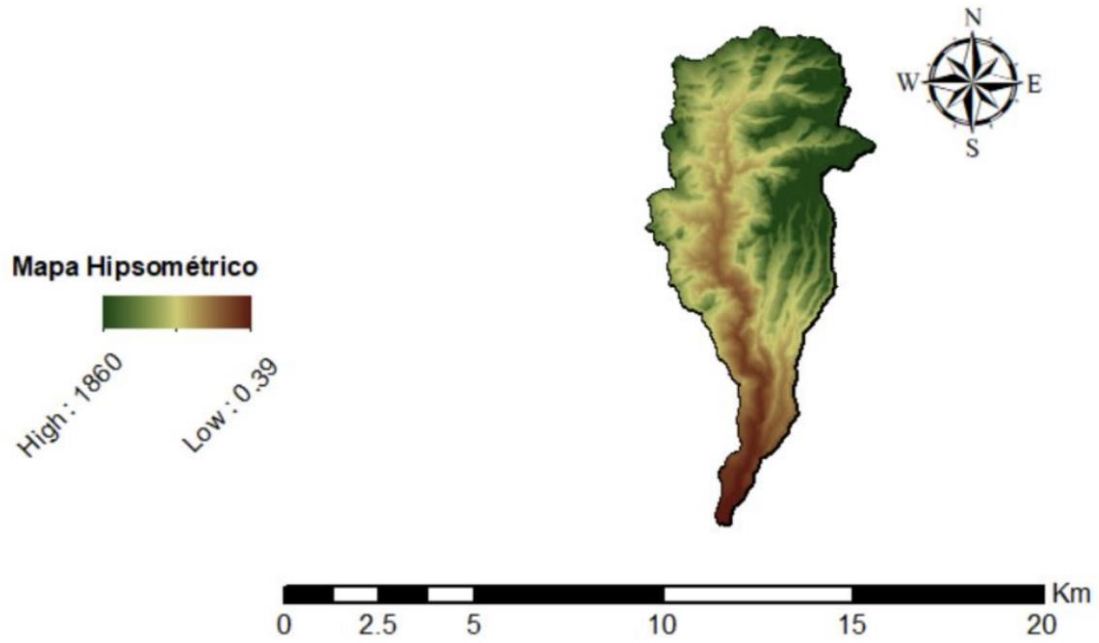


Figura – A 7 – Mapa hipsométrico da bacia da Ribeira dos Socorridos (Fonte: Autor, 2022)

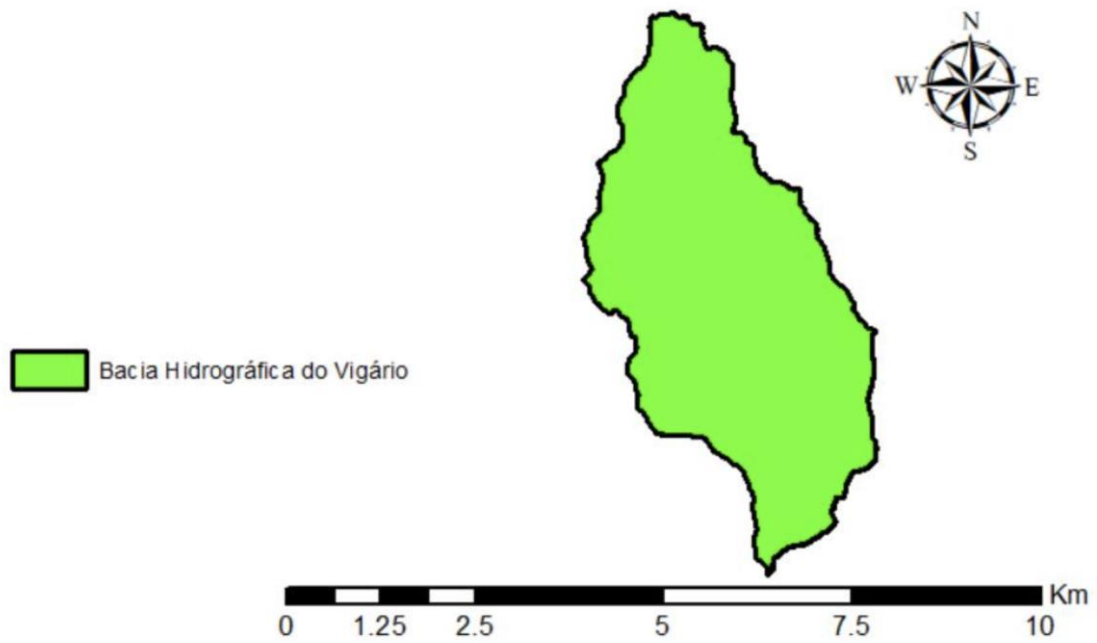


Figura – A 8 – Bacia hidrográfica da Ribeira do Vigário (Fonte: Autor, 2022)

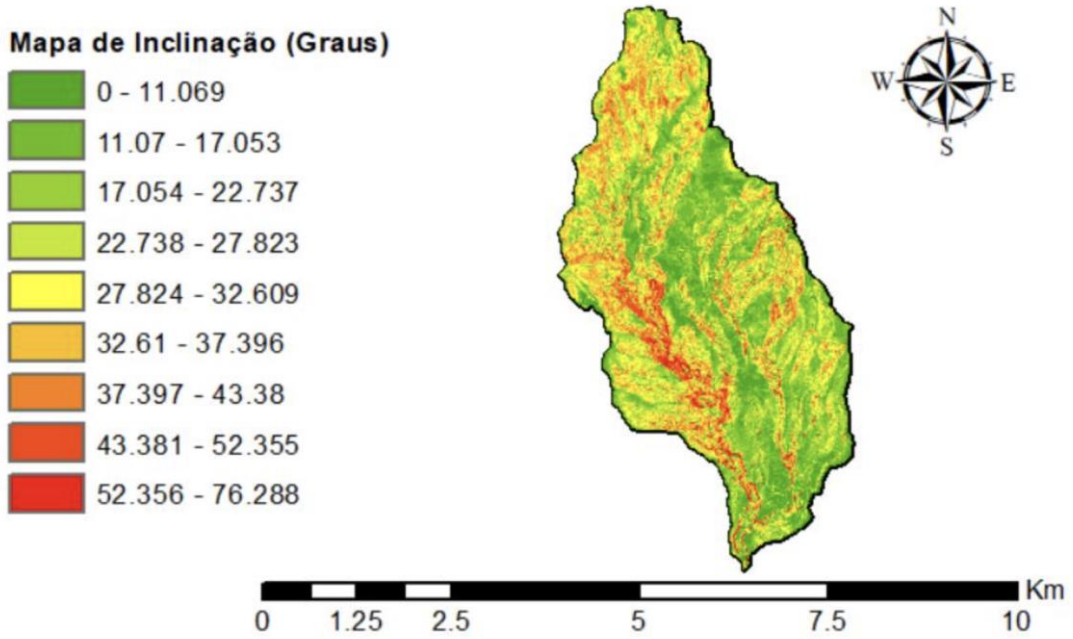


Figura – A 9 – Mapa de inclinação, em graus, da bacia da Ribeira do Vigário (Fonte: Autor, 2022)

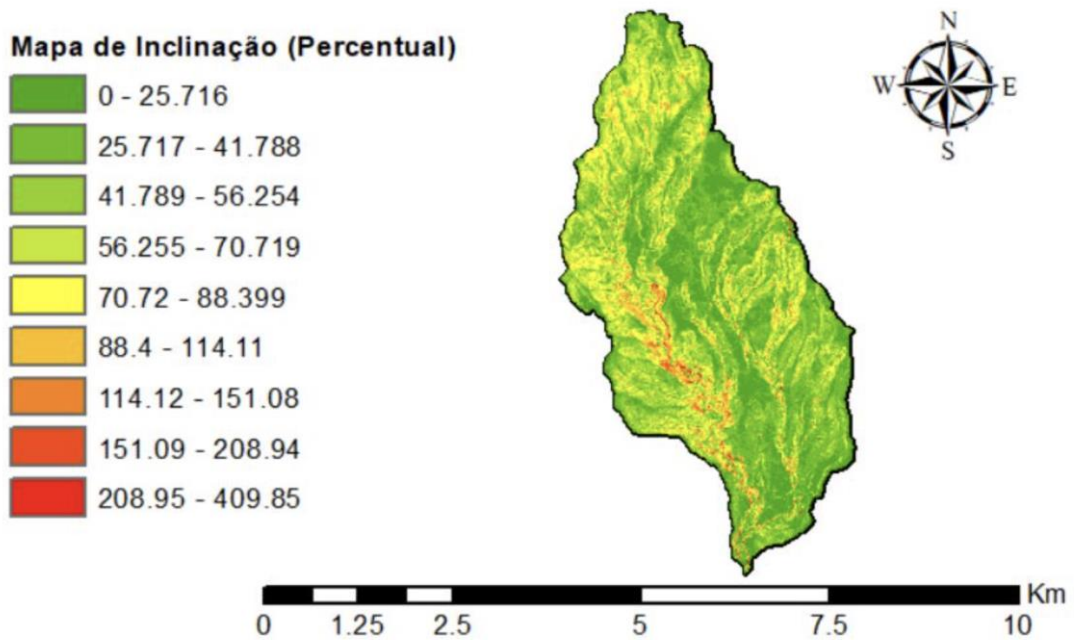


Figura – A 10 – Mapa de inclinação percentual da bacia da Ribeira do Vigário (Fonte: Autor, 2022)

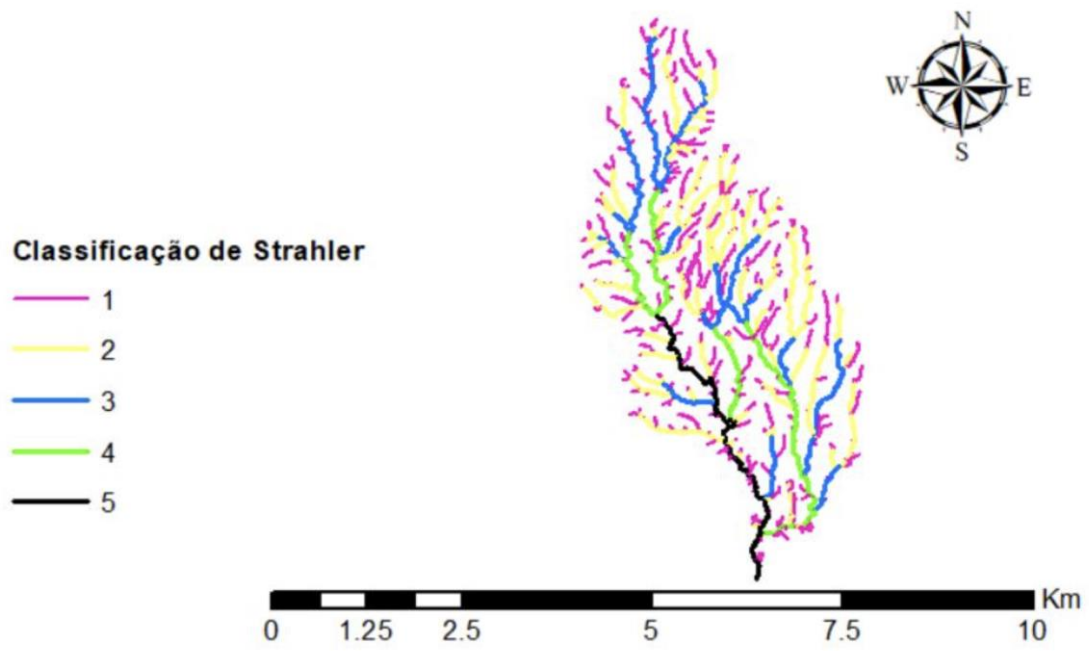


Figura – A 11 – Classificação de Strahler da bacia da Ribeira do Vigário (Fonte: Autor, 2022)

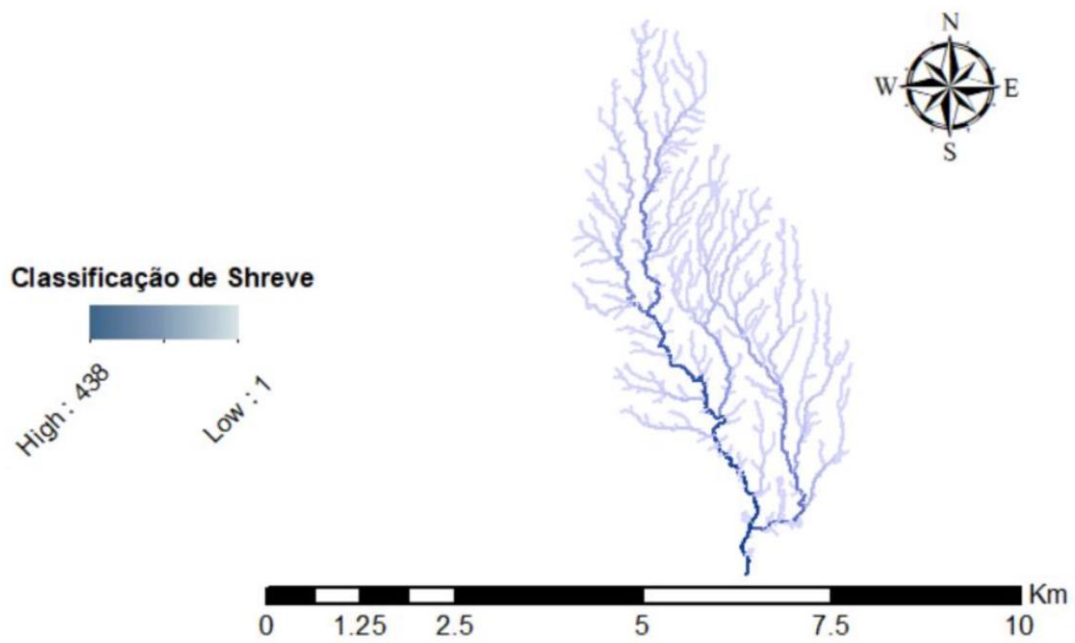


Figura – A 12 – Classificação de Shreve da bacia da Ribeira do Vigário (Fonte: Autor, 2022)

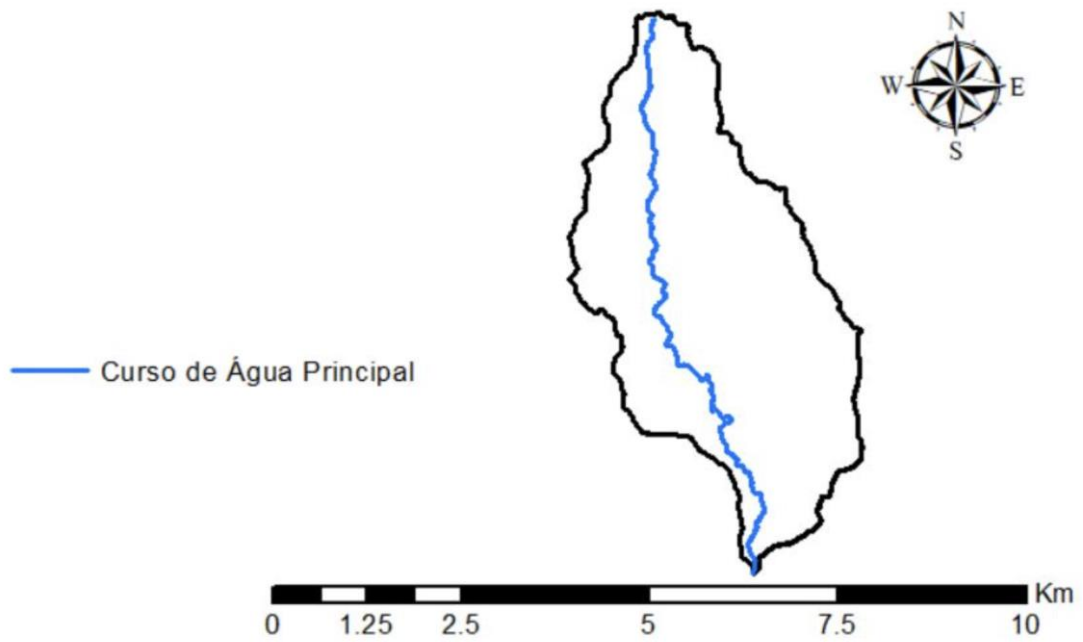


Figura – A 13 – Curso de água principal da bacia da Ribeira do Vigário (Fonte: Autor, 2022)

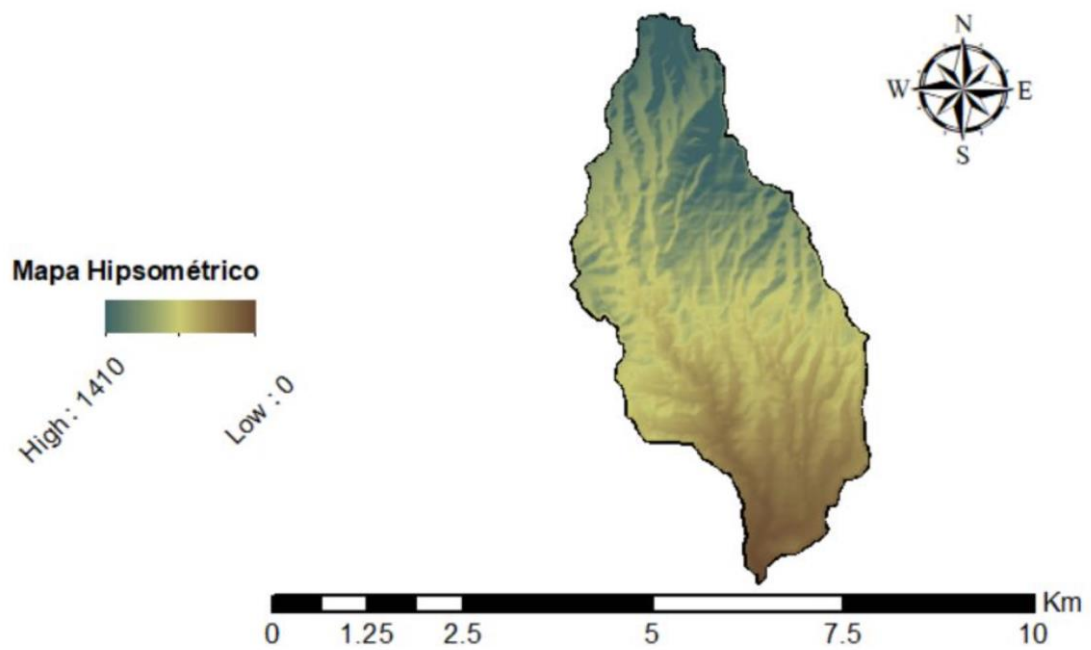


Figura – A 14 – Mapa hipsométrico da bacia da Ribeira do Vigário (Fonte: Autor, 2022)

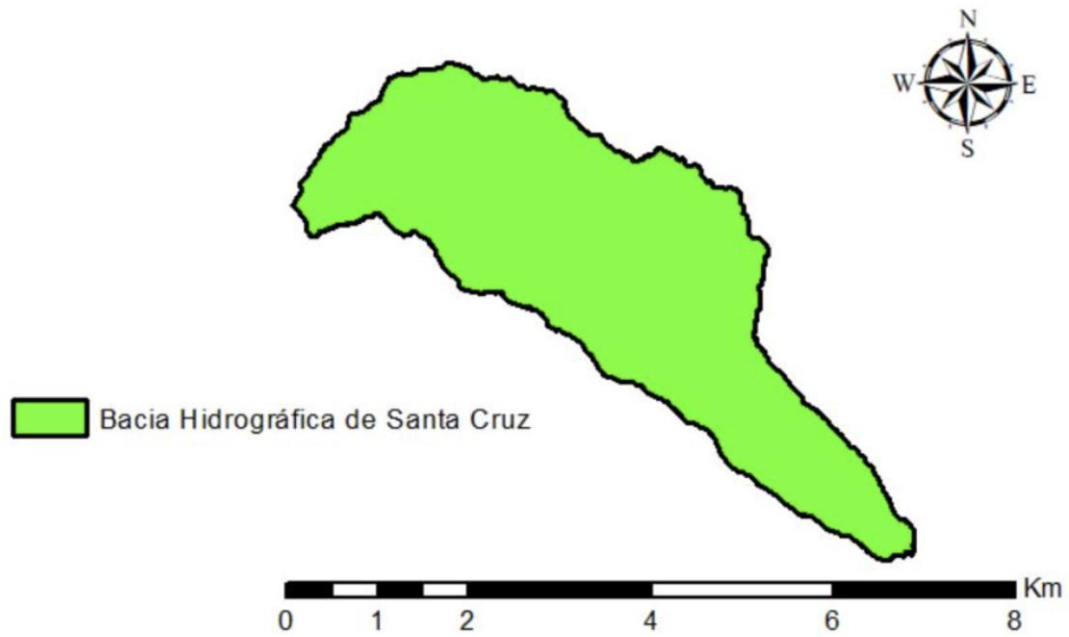


Figura – A 15 – Bacia hidrográfica de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

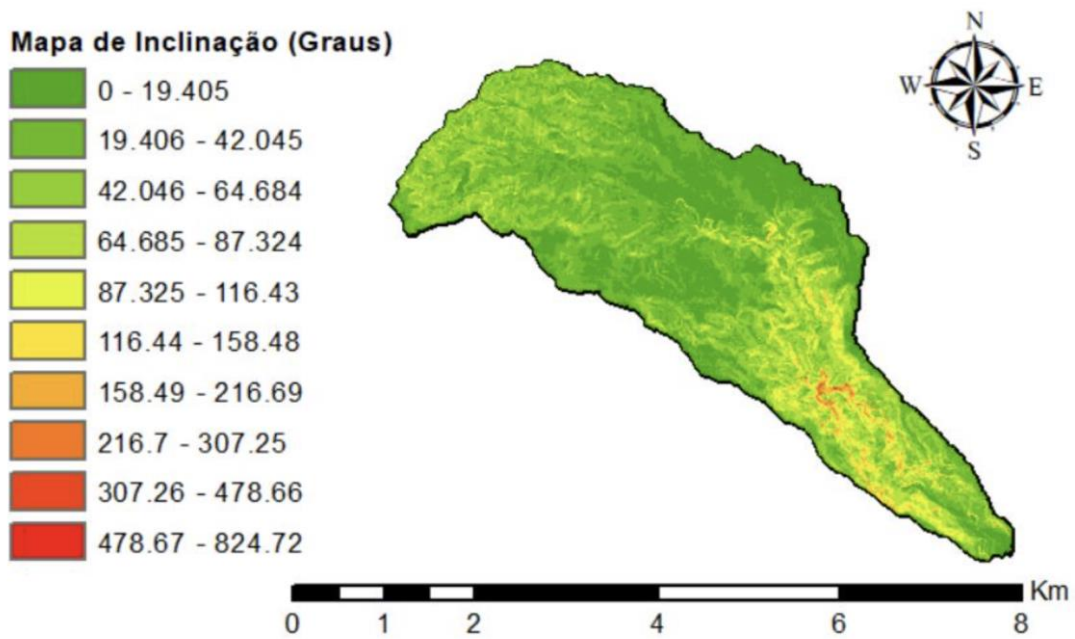


Figura – A 16 – Mapa de inclinação, em graus, da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

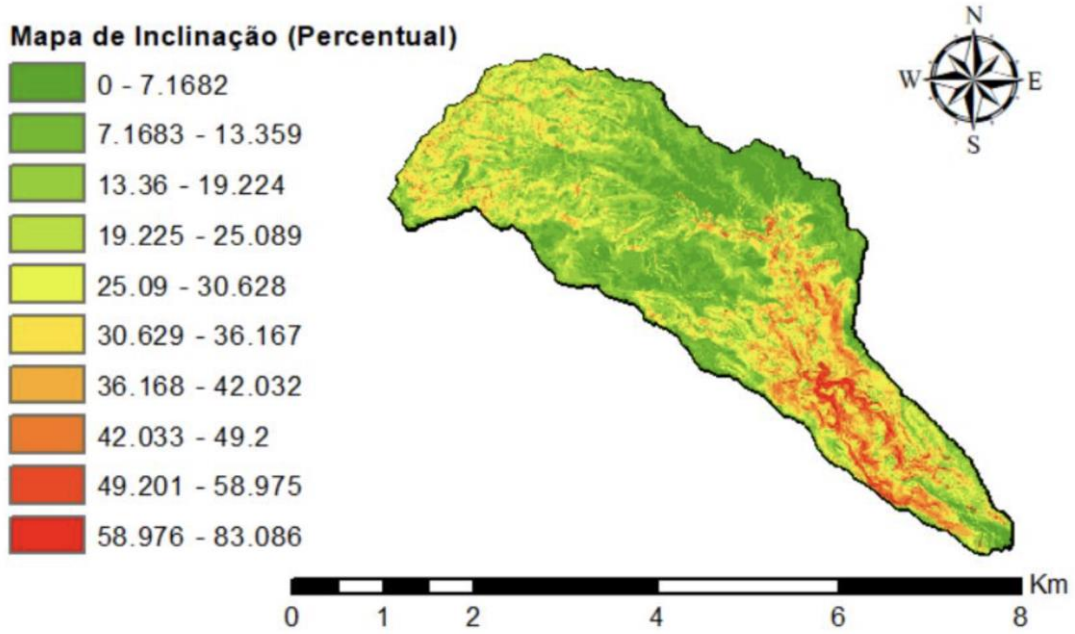


Figura – A 17 – Mapa de inclinação percentual da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

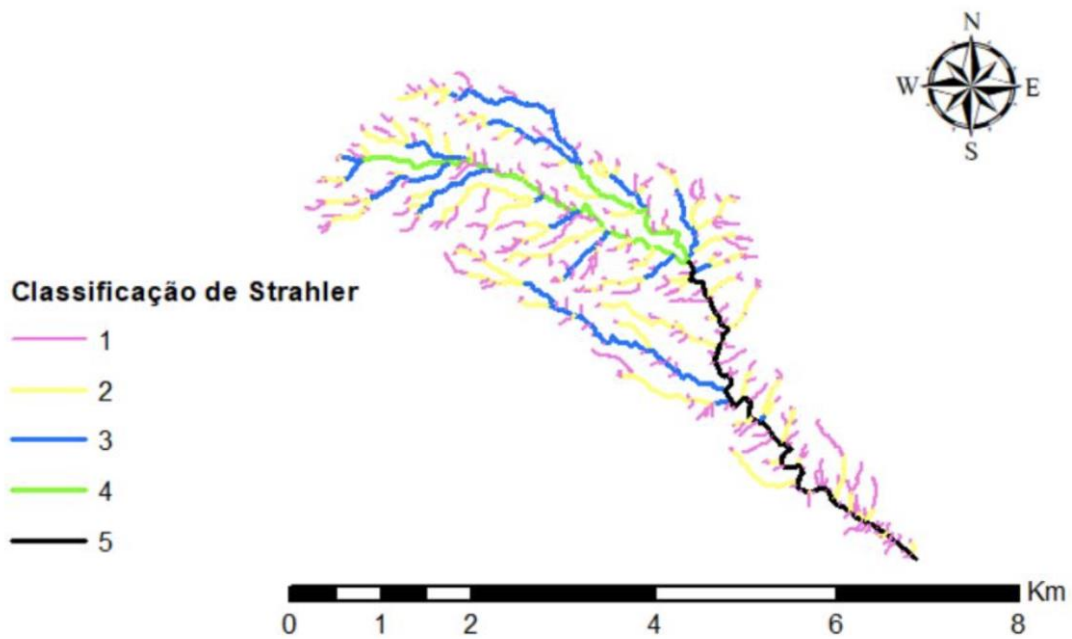


Figura – A 18 – Classificação de Strahler da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

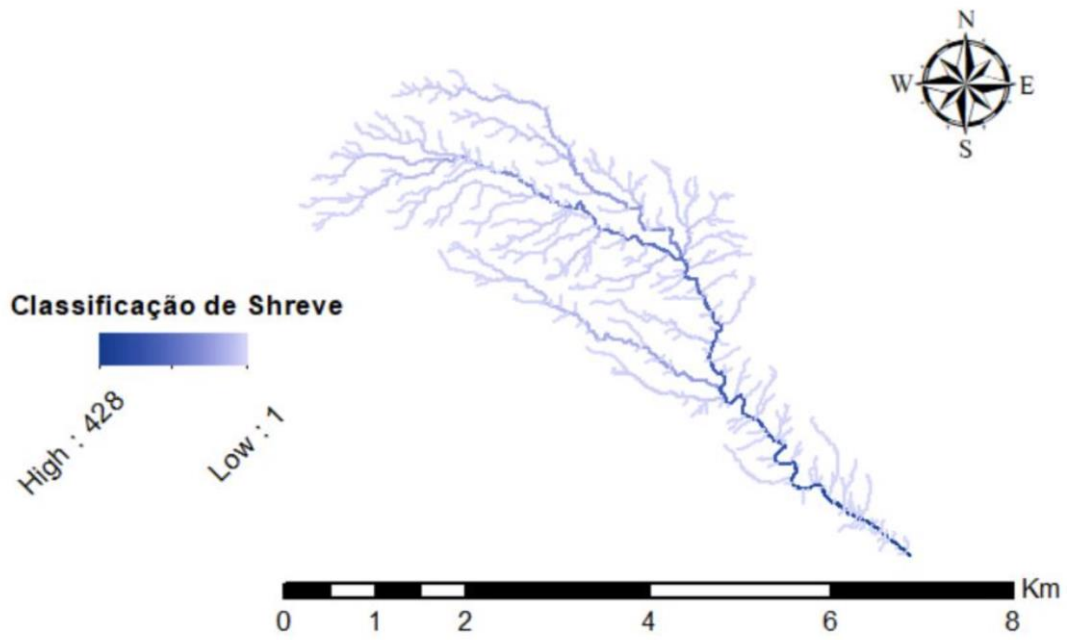


Figura – A 19 – Classificação de Shreve da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

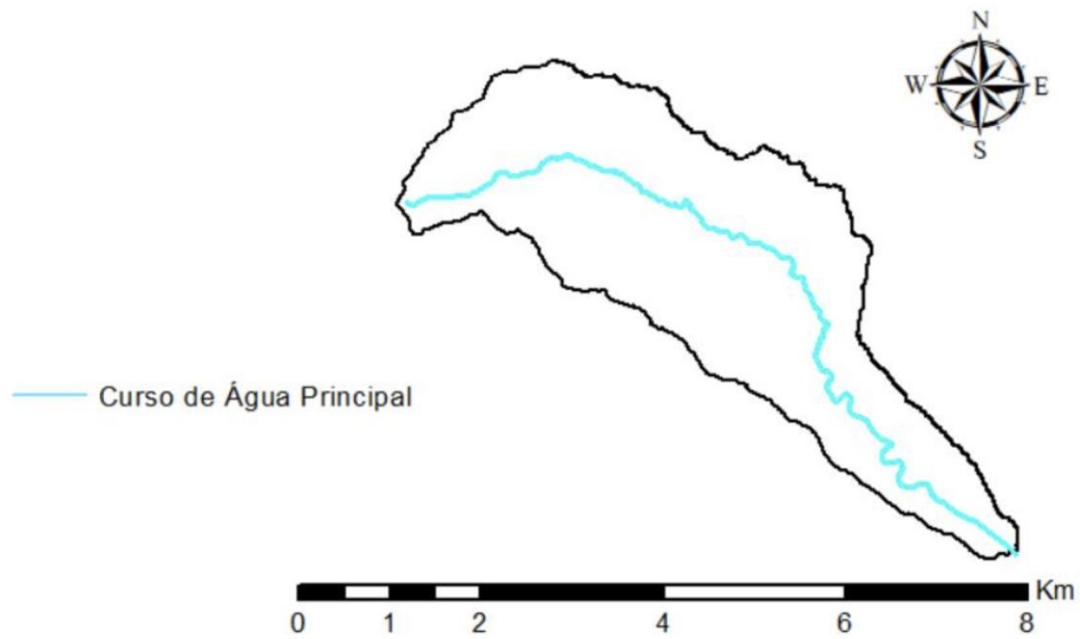


Figura – A 20 – Curso de água principal da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

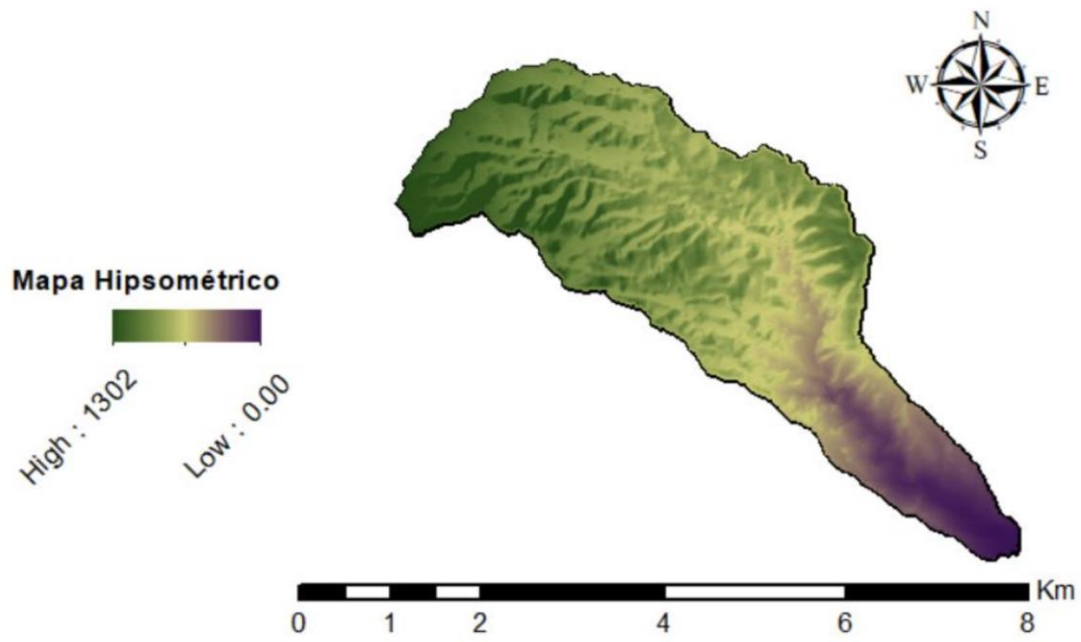


Figura – A 21 – Mapa hipsométrico da bacia de Santa Cruz (Fonte: Autor, 2022)

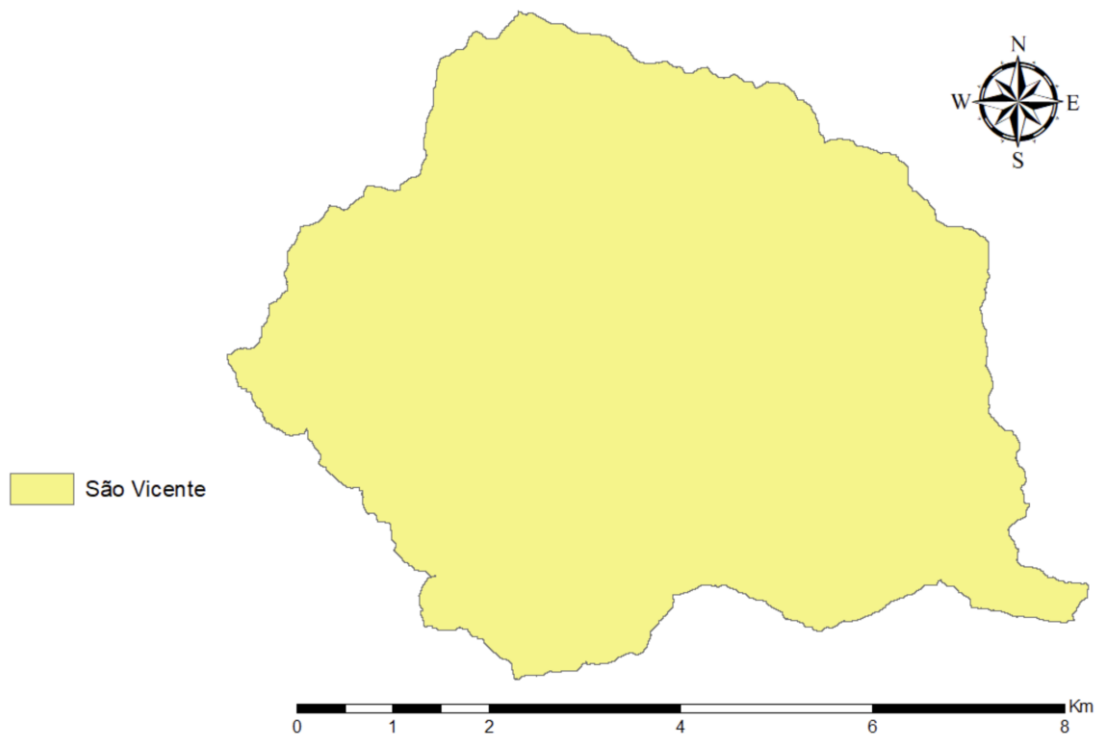


Figura – A 22 – Bacia hidrográfica de São Vicente (Fonte: Autor, 2022)

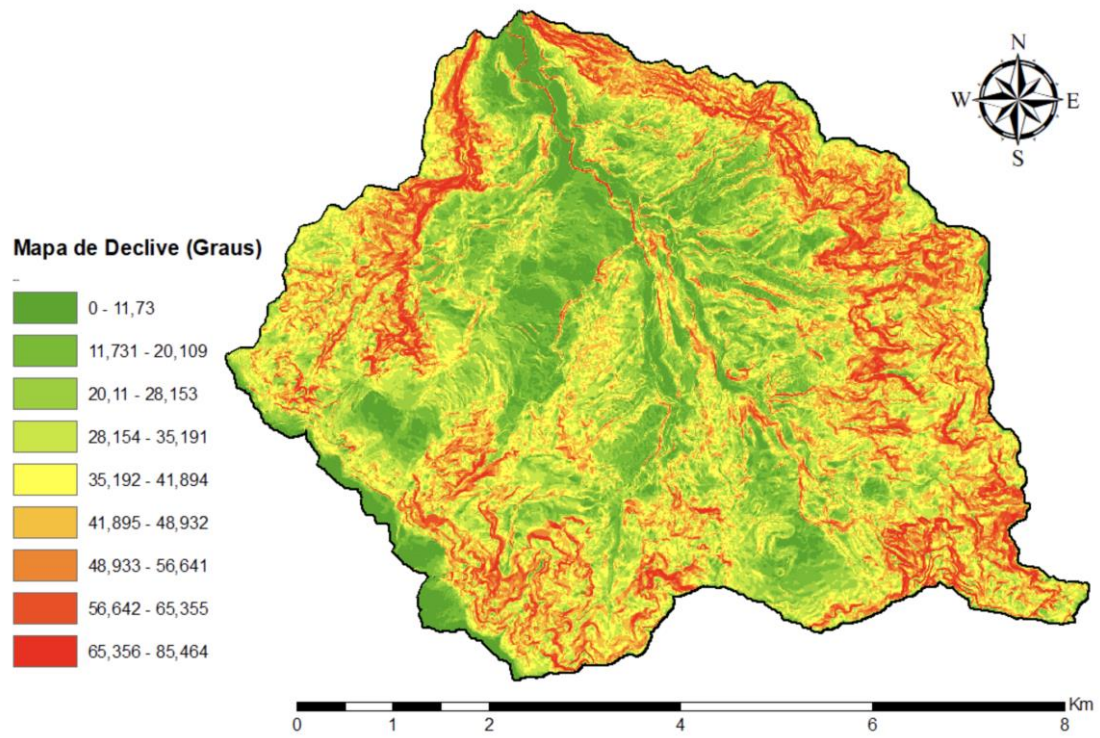


Figura – A 23 – Mapa de declive, em graus, da bacia de São Vicente (Fonte: Autor, 2022)

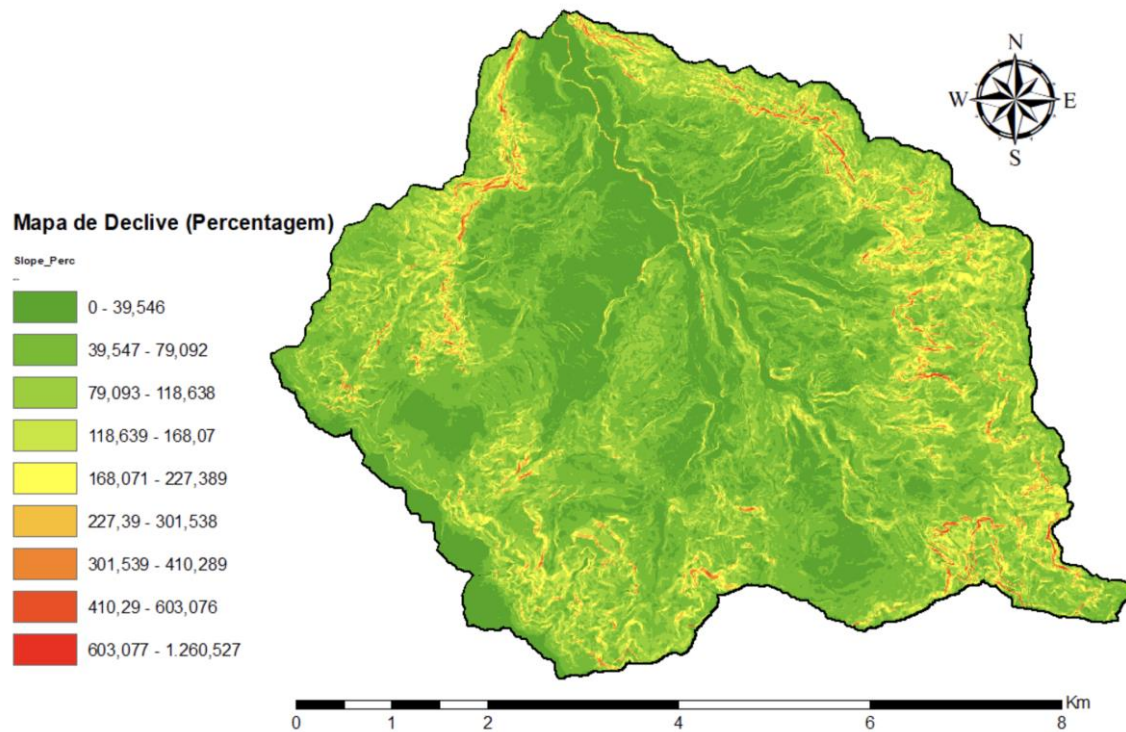


Figura – A 24– Mapa de declive percentual da bacia de São Vicente (Fonte: Autor, 2022)

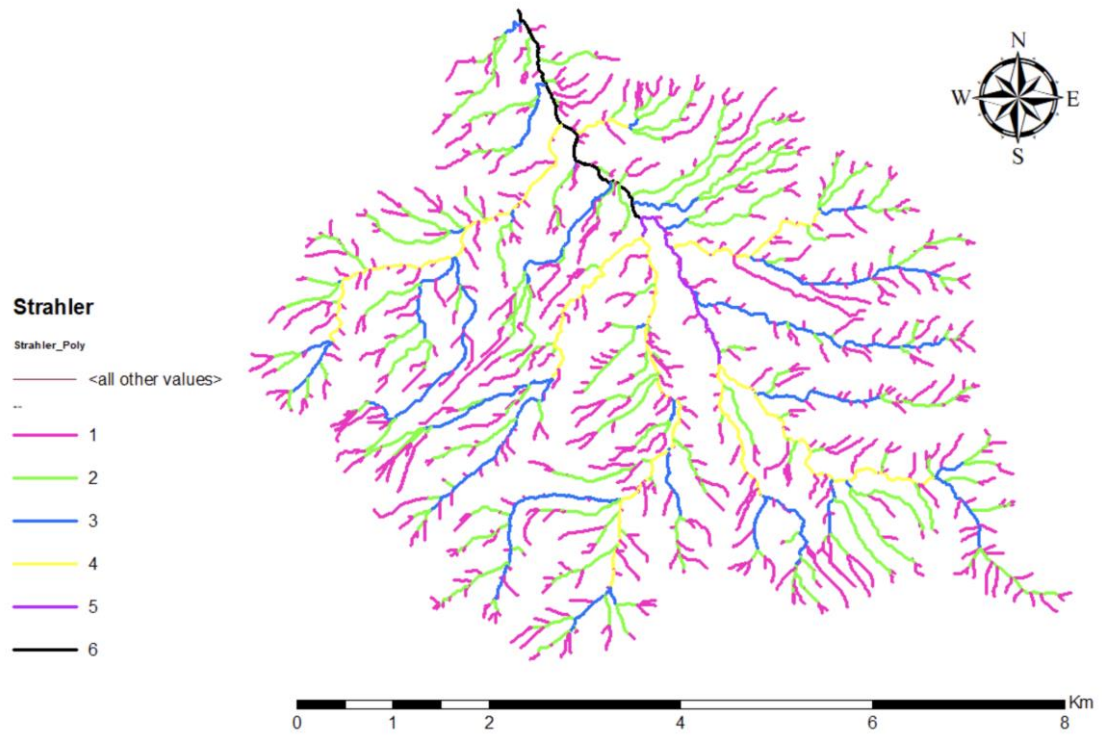


Figura – A 25 – Classificação de Strahler da bacia de São Vicente (Fonte: Autor, 2022)

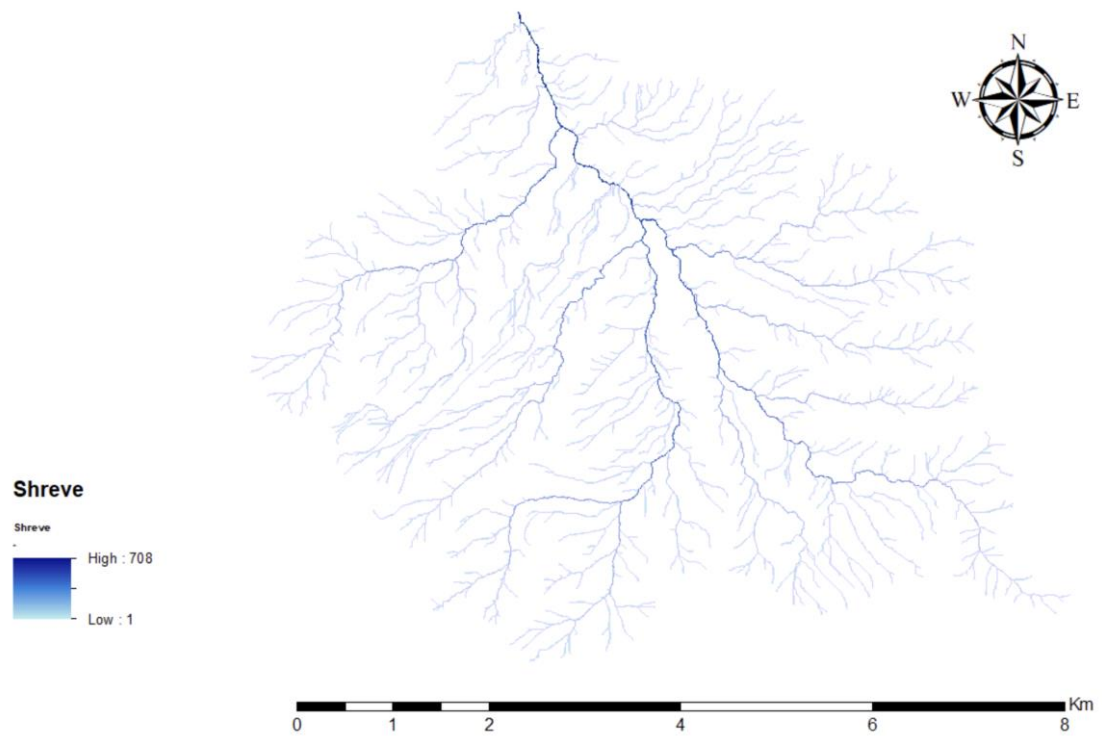


Figura – A 26 – Classificação de Shreve da bacia de São Vicente (Fonte: Autor, 2022)

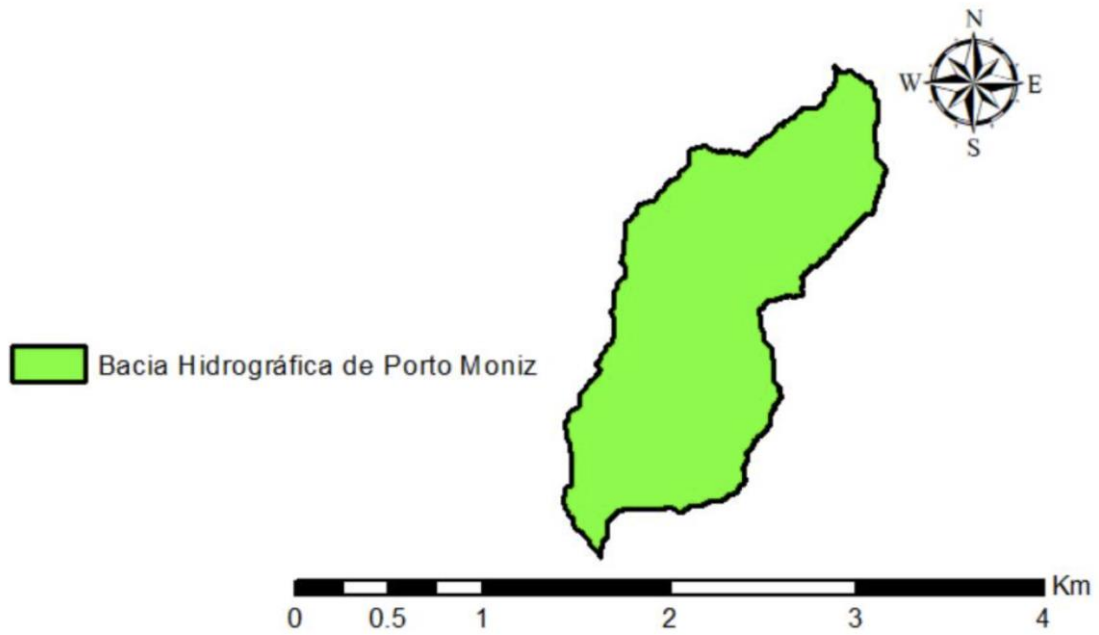


Figura – A 27 – Bacia hidrográfica de Porto Moniz (Fonte: Autor, 2022)

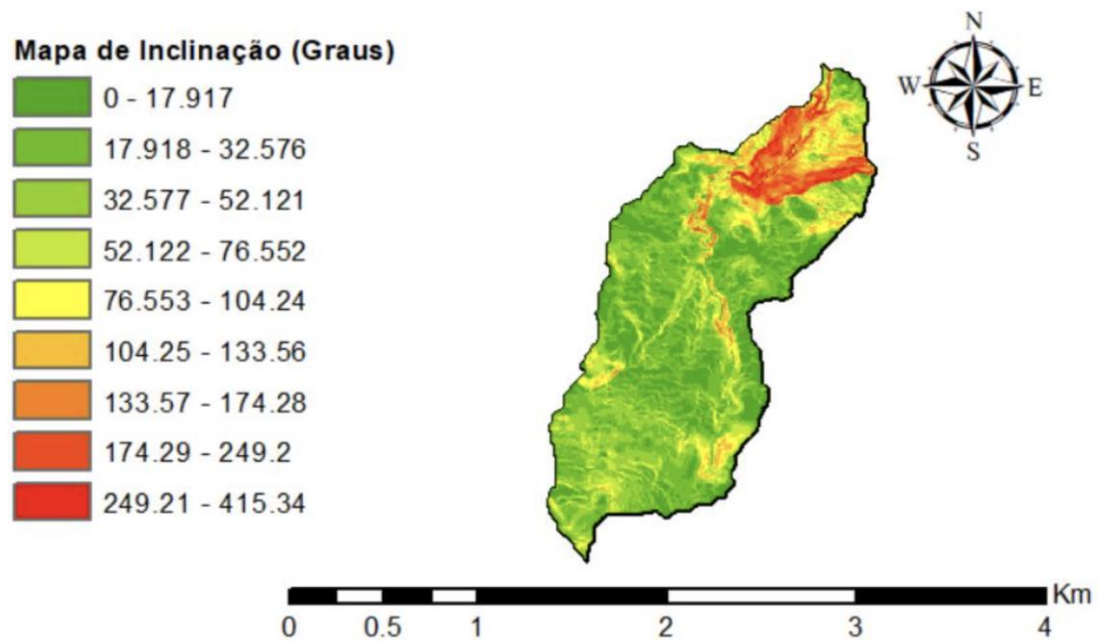


Figura – A 28 – Mapa de inclinação, em graus, da bacia de Porto Moniz (Fonte: Autor, 2022)

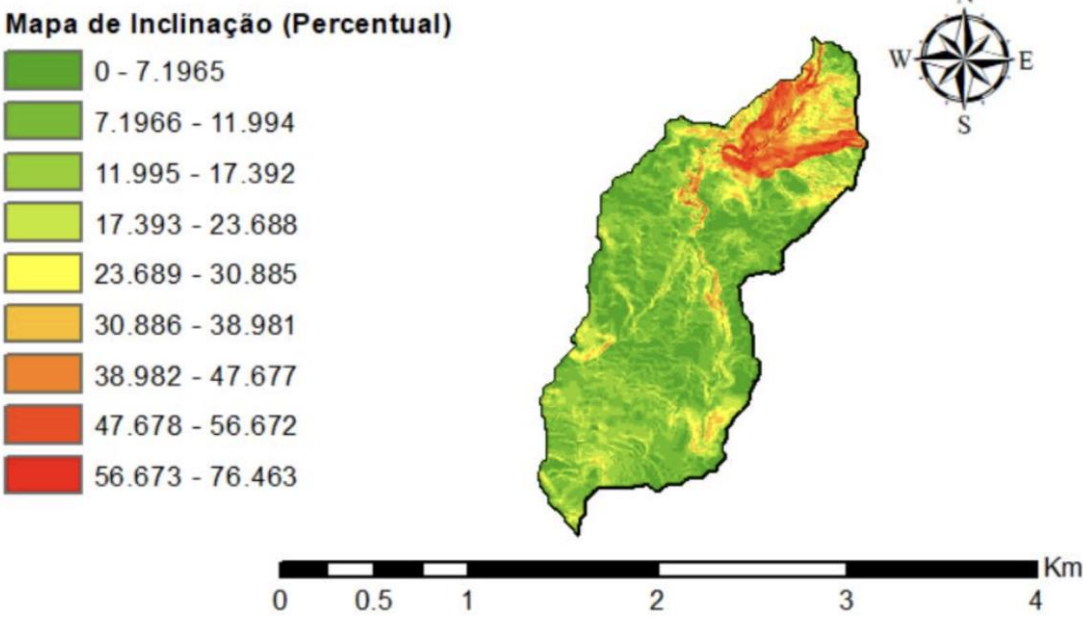


Figura – A 29 – Mapa de inclinação percentual da bacia de Porto Moniz (Fonte: Autor, 2022)

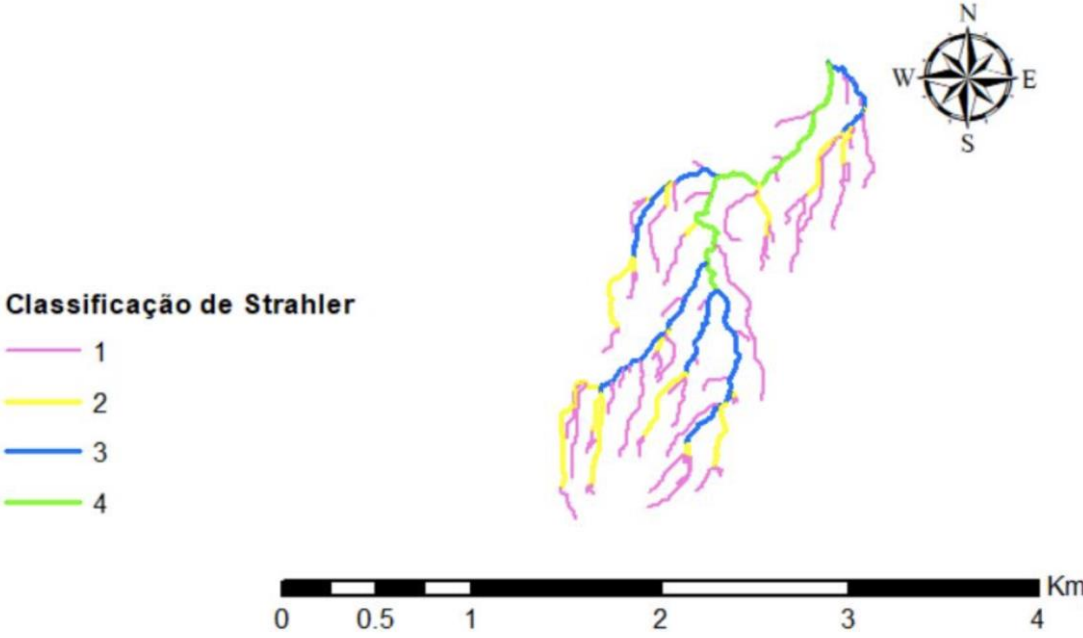


Figura – A 30 – Classificação de Strahler da bacia de Porto Moniz (Fonte: Autor, 2022)

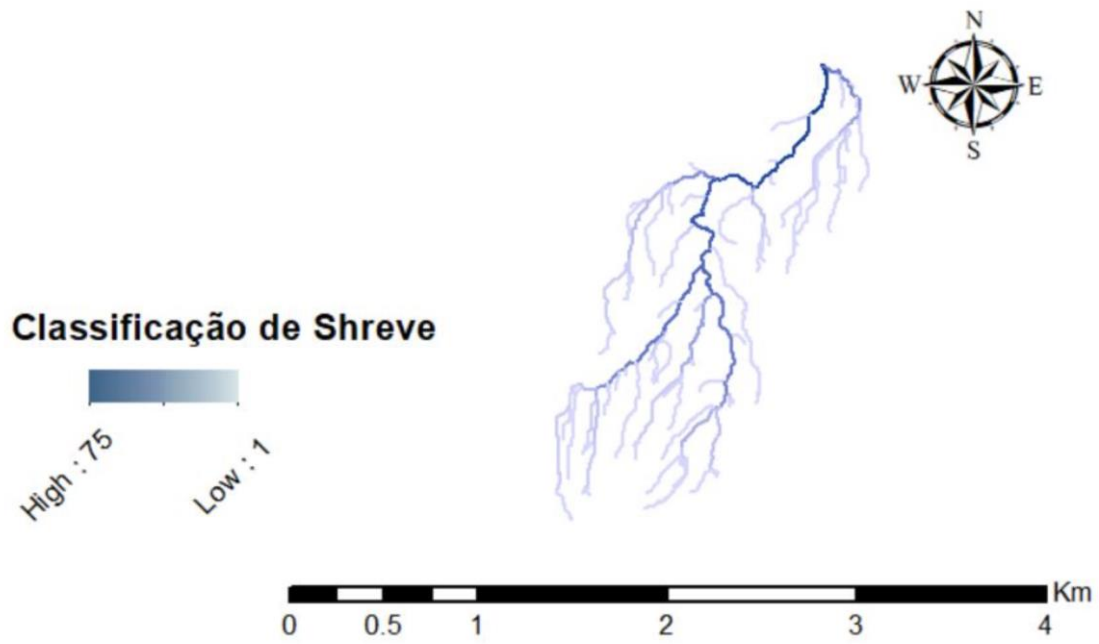


Figura – A 31 – Classificação de Shreve da bacia de Porto Moniz (Fonte: Autor, 2022)

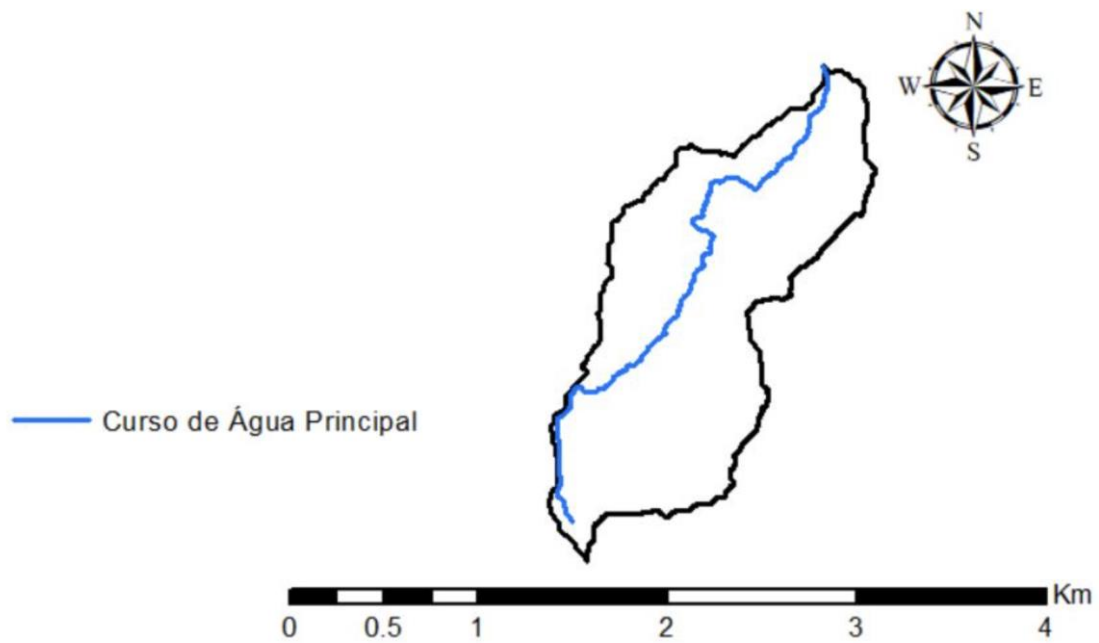


Figura – A 32 – Curso de água principal da bacia de Porto Moniz (Fonte: Autor, 2022)

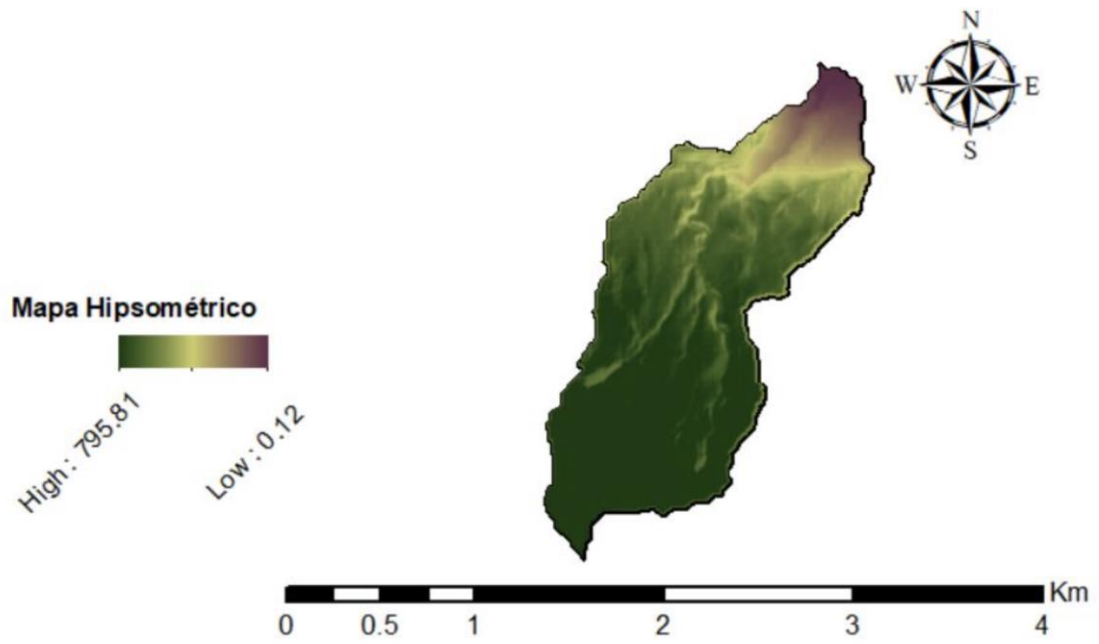


Figura – A 33 – Mapa hipsométrico da bacia de Porto Moniz (Fonte: Autor, 2022)